

基于系统动力学的江苏省水资源承载力的仿真与控制

高亚, 章恒全

(河海大学 商学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 为了研究江苏省水资源承载力,运用系统动力学方法,构建了江苏省水资源承载力系统动力学模型,并设计4种方案模拟2013-2020年江苏省水资源承载力水平,选取供需差和COD排放总量作为评价指标评价江苏省水资源承载力。结果表明:江苏省水资源承载力在近几年不能满足社会经济发展需求,方案4可以有效解决江苏省水资源供需矛盾问题,并提出解决江苏省水资源承载力不足问题的对策,即应充分应用科学技术,综合考虑开源、节流、产业结构调整和水污染控制。

关键词: 水资源承载力; 系统动力学; 仿真; 江苏省

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)04-0103-07

Simulation and control of water resource carrying capacity in Jiangsu Province based on system dynamics

GAO Ya, ZHANG Hengquan

(Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to study the water resource carrying capacity in Jiangsu Province, the paper applied the system dynamics to build the system dynamics model of water resource carrying capacity in Jiangsu Province. It designed four methods to simulate the level of water resource carrying capacity of Jiangsu Province from 2013 to 2020. Supply - demand difference and COD emission were selected as the evaluation indexes to evaluate the water resource carrying capacity of Jiangsu Province. The results show that the water resource carrying capacity of Jiangsu Province can not meet the needs of social economic development in recent years. The fourth method can effectively solve the contradiction between supply and demand of water resource in Jiangsu Province. Finally, it put forward to the countermeasures to solve the insufficient of water resource carrying capacity of Jiangsu Province. The countermeasures are to made full use of science and technology, and comprehensively considered opening resource, saving water, the adjustment of industrial structure and water pollution control.

Key words: water resource carrying capacity; system dynamics; simulation; jiangsu province

1 研究背景

随着人口的逐年增加,人类对水资源的需求越来越多,而水资源被严重污染和浪费,导致许多地区出现不同程度的水资源污染和水资源短缺问题。近年来,我国许多地区出现了水资源用水紧张、污染严重等问题。据统计,2010-2014年,人均水资源量分别为2 310、1 730.2、2 186、2 095.7和2 079.5 m³/人,从整体而言,人均水资源量有所减少。2010-2013年,用水人口呈逐年递增趋势,供水总量虽

然也呈递增趋势,但人均供水总量却呈递减趋势,说明我国水资源供需矛盾问题日益突出,成为阻碍我国经济健康稳定发展的主要原因之一^[1]。

随着科学、文化、思想等的进步,承载力的概念逐渐应用到各类领域,如资源承载力等^[2]。随着全球水资源问题的突显,为了实现社会、经济、环境和水资源之间的相互可持续发展,对水资源承载力的研究的学者越来越多^[3]。对水资源承载力进行研究,比较有代表性的是北美湖泊协会对湖泊进行研究,定义了湖泊承载力概念^[4]。相比之下,我国学

收稿日期:2016-01-22; 修回日期:2016-04-03

作者简介:高亚(1991-),女,江苏宿迁人,在读研究生,主要从事管理科学与工程研究。

通讯作者:章恒全(1957-),男,安徽绩溪人,教授,博士生导师,主要从事工程管理、项目管理和风险管理等。

者对水资源承载力研究,主要集中在研究水资源承载力的定义、理论及研究方法。赵筱青等^[5]运用系统动力学方法对昆明市水资源承载力进行了研究,并提出相应对策,提高昆明市水资源承载力。陈威等^[6]运用系统动力学和密切值法对武汉市水资源承载力进行研究评价,并提出5种不同的水资源承载力变化方案。

此外,还有许多学者对我国其他地区进行了水资源承载力研究,如对渭河流域、滨海新区、湖南省等地的水资源承载力进行研究。其中主要采用主成分分析法和灰色神经网络发对江苏省水资源承载力进行分析和预测^[7-9]。黄莉新^[10]采用系统动力学方法,考虑江苏省水资源的特点,计算分析不同方案下的江苏省水资源承载力,为提高江苏省水资源承载力提供依据。

本文以江苏省为研究边界,构建江苏省水资源承载力的系统动力学模型,分析评价江苏省水资源承载力,并提出相应对策建议。

2 江苏省水资源承载力系统动力学模型构建

2.1 系统边界和模型基准年的确定

本文主要是针对江苏省水资源承载力进行研究,所确定的系统边界为江苏省全省地理空间边界。该系统边界将影响水资源承载力的主要因素考虑在内,并考虑这些因素之间的相互作用和关系^[11]。

本文拟定的水资源承载力系统模型历史基准年为2005年,预测基准年为2013年。历史数据检验时段为2005-2013年,模拟预测时间段为2013-2020年,模型设置模拟步长为1年。

2.2 系统模型结构分析

影响江苏省水资源承载力的因素众多,针对水资源承载力的量化指标也较多,所以水资源承载力系统动力学模型结构较为复杂。

2.2.1 系统模型子系统分类 考虑到社会、经济、生态环境及水资源状况对水资源承载力的影响,本文在相关数据搜集及相关文献资料整理的基础上,将江苏省水资源承载力系统划分为5个子系统,即社会子系统、经济子系统、生态子系统、水污染子系统和水资源子系统。各一级子系统之间相互影响、相互作用,共同影响着水资源承载力。

2.2.2 系统模型子系统分析

(1)社会子系统。对水资源承载力产生影响的

社会因素主要包括人口数量及生活用水量,所以本文所定义的社会子系统主要是指生活用水子系统,包括城市生活用水和农村生活用水等。

(2)经济子系统。经济因素主要包括三大产业的产值及用水量。经济子系统用水主要指生产用水子系统。三大产业结构及规模比例的不同,对水资源的需求量也会不同,从而对水资源承载力产生不同的影响。考虑江苏省三大产业比例及不同的用水结构,本文分析的第一产业用水主要通过农业用水求得,第二产业用水主要通过工业用水(电力工业用水和一般工业用水)求得。

(3)生态子系统。近年来,生态环境的变化对人类生活的影响越来越大,其中对水资源的影响不容忽视。根据江苏省近些年的水资源公报数据显示,江苏省生态环境用水主要集中在城市环境用水,且生态用水的比例逐渐增加。生态用水数量难以计算,主要受城市绿地面积及道路面积等的影响,其次还与国家、政府相关政策等有关。本文主要根据江苏省水资源公报得到江苏省生态环境用水量。

(4)水污染子系统。水污染主要包括来自工业生产产生的工业污水排放和生活污水排放^[12]。在生活污水和工业污水排放的过程中,会产生COD(化学需氧量)的排放,COD的排放量可以反映出水体中含有的有机污染物浓度,COD排放量越大,说明水体污染越严重。

(5)水资源子系统。一个地区的水资源主要由地表水资源和地下水资源构成,水资源供水量为主要包括当地的地表水水资源和地下水水资源及各类水利工程蓄水、供水等。水资源子系统主要通过水资源供水总量与总用水量之间的关系反映供需压力(供需平衡关系)。

2.3 系统模型构建

(1)系统流图绘制。根据上述对水资源承载力系统分析,构建江苏省水资源承载力系统动力学模型。运用Vensim PLE绘制江苏省水资源承载力系统动力学模型流图(见图1)。

本文所构建的江苏省水资源承载力系统模型中,选取的水平变量L有5个(人口数量、农田灌溉面积、牲畜数量、工业增加值和第三产业增加值),速率变量有5个(人口增长量、灌溉面积变化量、牲畜数量变化量、工业产值增工业产值增长量和第三产业产值增长量),辅助变量有22个,表函数有21个,常数变量有1个(中水回用率)。

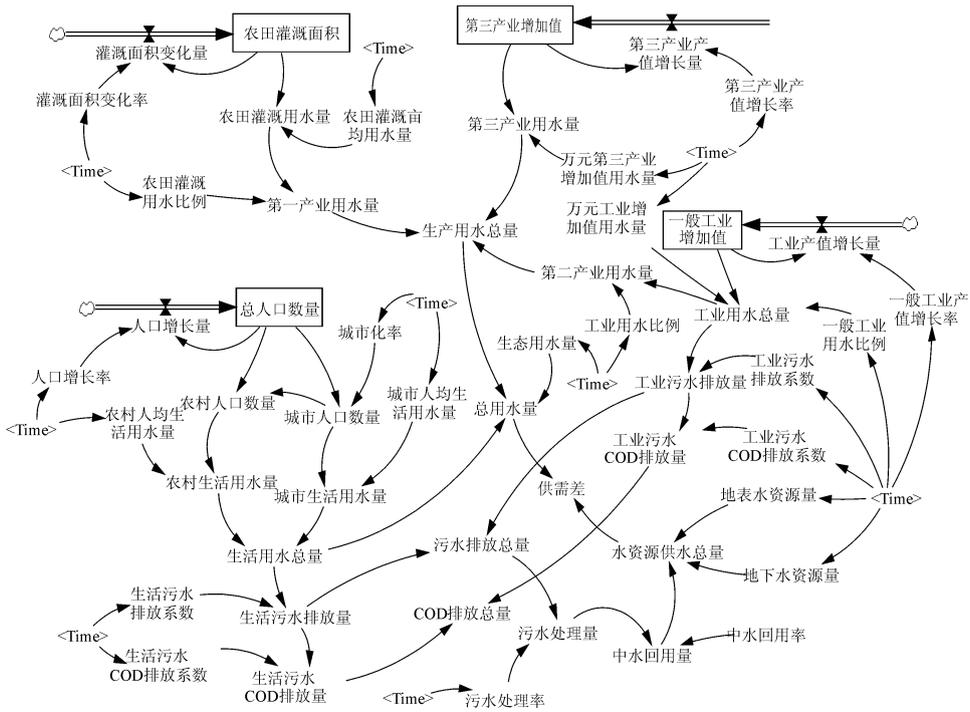


图 1 江苏省水资源承载力系统流图

(2) 系统模型方程设定。本文所构建的江苏省水资源承载力系统模型较为复杂,模型中所设定的方程较多,各子系统中所包含的方程如下:

① 社会子系统。社会子系统中共包含 5 个方程:

- 城市人口数量 = 总人口数量 × 城市化率 (1)
- 农村人口数量 = 总人口数量 - 城市人口数量 (2)
- 城市生活用水量 = 城市人口数量 × 城市人均生活用水量 (3)
- 农村生活用水量 = 农村人口数量 × 农村人均生活用水量 (4)
- 生活用水总量 = 城市生活用水量 + 农村生活用水量 (5)

式中:城市人口数量、农村人口数量、总人口数量的单位为万人;城市生活用水量、农村生活用水量、生活用水总量的单位为 10^8 m^3 ;城市人均生活用水量、农村人均生活用水量的单位为 L/d。

② 经济子系统。经济子系统中共包含 6 个方程:

- 农田灌溉用水量 = 农田灌溉面积 × 农田亩均用水量 (6)
- 第一产业用水量 = 农田灌溉用水量 ÷ 农田灌溉用水比例 (7)
- 工业用水总量 = 一般工业增加值 × 万元工业增加值用水量 ÷ 一般工业用水比例 (8)
- 第二产业用水量 = 工业用水总量 ÷ 工业用水比例 (9)

$$\text{第三产业用水量} = \text{第三产业增加值} \times \text{万元第三产业增加值用水量} \quad (10)$$

$$\text{生产用水总量} = \text{第一产业用水量} + \text{第二产业用水量} + \text{第三产业用水量} \quad (11)$$

式中:农田灌溉用水量、第一产业用水量、工业用水总量、第二产业用水量、第三产业用水量、生产用水总量的单位为 10^8 m^3 ;农田灌溉面积的单位为万亩;农田亩均用水量的单位为 $\text{m}^3/\text{亩}$;一般工业增加值、第三产业增加值的单位为 10^8 元;万元工业增加值用水量、万元第三产业增加值用水量的单位为 $\text{m}^3/10^4$ 元。

③ 生态子系统。为方便计量,生态子系统中只设定了一个参数,即生态用水量。本文将生态用水量用表函数的形式表示,具体如下:

$$([(2005, 0) - (2020, 4)] (2005, 2.92), (2006, 3.04), (2007, 3.08), (2008, 3.1), (2009, 3.18), (2010, 3.21), (2011, 3.26), (2012, 3.3), (2013, 3.24))$$

④ 水污染子系统。水污染子系统中共包含 6 个方程:

- 生活污水排放量 = 生活用水总量 × 生活污水排放系数 (12)
- 生活污水 COD 排放量 = 生活污水排放量 × 生活污水 COD 排放系数 (13)
- 工业污水排放量 = 工业用水总量 × 工业污水排放系

数 (14)

工业污水 COD 排放量 = 工业污水排放量 × 工业污水 COD 排放系数 (15)

污水排放总量 = 生活污水排放量 + 工业污水排放量 (16)

COD 排放总量 = 生活污水 COD 排放量 + 工业污水 COD 排放量 (17)

式中:生活污水排放量、工业污水排放量、污水排放总量的单位为 10^8 t;生活污水 COD 排放量、工业污水 COD 排放量、COD 排放总量的单位为 10^4 t;生活污水排放系数、工业污水排放系数的单位为 t/m^3 。

⑤水资源子系统。水资源子系统中共包含 2 个方程:

水资源供水总量 = 地表水资源量 + 地下水资源量 + 中水回用量 (18)

供需差 = 总用水量 - 水资源供水总量 (19)

式中:水资源供水总量、地表水资源量、地下水资源量、中水回用量、总用水量、供需差的单位为 10^8 m^3 。

3 江苏省水资源承载力系统动力学模型分析

3.1 系统模型数据来源

本文构建的江苏省水资源承载力系统动力学模型中所有数据均来源于《2005 - 2014 年江苏省统计年鉴》、《2005 - 2013 年江苏省水资源公报》、《2005 - 2013 年江苏省环境状况公报》及国家数据网上所公布的数据。

3.2 系统有效性检验

本文对江苏省水资源承载力系统模型检验主要是指历史性检验。本文以历史基准年和预测基准年为时间段(2005 - 2013),将历史实际值与模型模拟值进行比较,误差在 10% 以内认为模型是有效的,可以用来预测 2013 - 2020 年江苏省水资源承载力情况。本文所构建的模型变量较多,拟选取以下几个变量检验模型误差,模型历史检验结果详见表 1。

3.3 系统模型现状预测分析

本文以 2013 年为预测基准年,预测时段为 2013 - 2020 年。通过系统动力学模型模拟运行,得到 2013 - 2020 年江苏省水资源承载力系统中主要评价指标(生活用水总量、第一产业用水量、第二产业用水量、第三产业用水量、COD 排放总量和供需差)变化趋势,详见图 2。

由图 2 中各评价指标变化趋势图可知:2013 -

2020 年期间,生活用水总量整体趋势在增加,但增加幅度较小;三大产业用水量整体呈上升趋势,且需求增加幅度比较大,水质方面所呈现的 COD 排放总量从 2013 年开始增加,说明水体污染在未来会加重;供需差主要反映供水量与用水量之间的差值,图上显示供需差呈上升趋势,说明随着生活、生产等用水量的增加,水资源供水总量已满足不了总用水量需求。

综上所述,江苏省水资源承载力已慢慢不能满足社会生活、生产要求,需制定方案,解决江苏省水资源承载力不足问题。

4 江苏省水资源承载力系统模型仿真方案设计

4.1 系统模型决策变量选取

江苏省水资源承载力系统动力学模型中选取了状态变量、速率变量、表函数和常数变量,一般情况下可以将表函数和常数变量作为决策变量,改变和控制模型的变化趋势。

本文有 21 个表函数和 1 个常数变量,结合所构建模型结构、江苏省“十二五”规划和江苏省水资源承载力的具体情况,选取 19 个决策变量,即城市化率、城镇人口人均用水量、农村人口人均用水量、农田亩均用水量、农田灌溉用水比例、一般工业产值增长率、万元工业增加值用水量、一般工业用水比例、工业用水比例、第三产业产值增长率、万元第三产业增加值用水量、生活污水排放系数、生活污水 COD 排放系数、工业污水排放系数、工业污水 COD 排放系数、污水处理率、中水回用系数、地表水资源量和地下水资源量。

4.2 系统模型方案设计

影响水资源承载力大小的因素主要有两点:水资源量和水质,所以提高江苏省水资源承载力大小的主要依据就是从水资源量和水质两个方面进行调整。水资源量方面的调整主要包括水资源供水总量的增加和水资源用水总量的减少,即开源和节流;水质方面的调整主要是改善水资源质量,减少污染物的排放,避免水质型缺水。不管是采用开源增加水资源供水总量,还是采用节流减少水资源用水总量,都必须保证水质满足要求,减少水体污染物的排放。

本文主要设计 4 种改善江苏省水资源承载力的方案详见表 2,每种方案都考虑水污染的治理控制问题。水污染控制指标的设定详见表 3。

表1 2005-2013年模型历史检验结果

指标	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
总人口数量	$H/10^4$ 人	7588.24	7655.66	7723.13	7762.48	7810.27	7869.34	7898.8	7919.98	7939.49
	$S/10^4$ 人	7588.24	7654.10	7722.11	7790.16	7829.85	7878.06	7937.64	7967.36	7988.72
	$E/\%$	0	-0.02	-0.01	0.36	0.25	0.11	0.49	0.60	0.62
生活用水总量	$H/10^8$ m ³	30.78	31.75	32.40	32.98	33.95	34.00	34.34	34.71	35.46
	$S/10^8$ m ³	31.24	32.00	32.77	33.51	34.17	35.03	35.31	36.07	36.14
	$E/\%$	1.49	1.36	1.14	1.61	1.73	2.00	1.46	2.59	0.52
生产用水总量	$H/10^8$ m ³	484.01	505.65	509.87	513.24	512.52	515.00	518.50	514.20	460.20
	$S/10^8$ m ³	501.56	539.07	555.42	529.41	525.72	489.76	473.73	485.16	453.67
	$E/\%$	3.63	6.61	8.93	3.15	2.58	-4.90	-8.63	-5.65	-1.42
污水排放总量	$H/10^8$ t	51.94	51.56	50.55	50.90	52.36	55.55	59.18	58.84	59.20
	$S/10^8$ t	52.62	54.71	53.32	53.49	54.81	54.10	58.28	59.70	56.33
	$E/\%$	1.30	6.12	5.48	5.09	4.68	-2.61	-1.52	1.47	-4.85
水资源供总量	$H/10^8$ m ³	517.70	540.20	545.28	549.27	549.44	552.17	556.17	552.23	498.83
	$S/10^8$ m ³	519.74	542.44	547.53	551.52	551.78	554.54	558.79	554.94	501.42
	$E/\%$	0.39	0.41	0.41	0.41	0.43	0.43	0.47	0.49	0.52

注:表1中 H 指历史实际值, S 指模拟值, E 指相对误差。

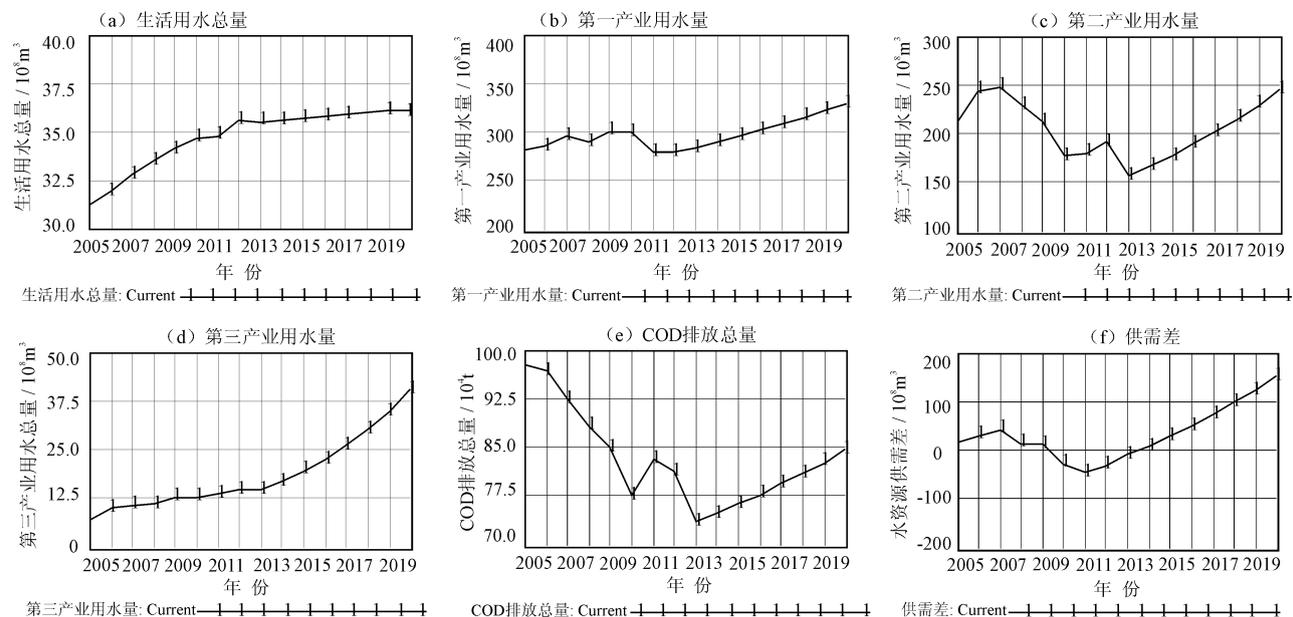


图2 主要评价指标变化趋势图

4.3 系统模型方案模拟结果分析

通过江苏省水资源承载力系统动力学模型模拟运行得到4种方案的运行结果。本文选取供需差和COD排放总量两个指标评价4种方案的效果。4种方案运行结果详见表4,4种方案下的两个指标变化趋势见图3。

由表4和图3可知,现状和4种方案下的江苏省水资源承载力变化情况如下:

(1)现状预测。江苏省水资源承载力在现状预测下的结果显示从2014年开始会出现水资源供需

矛盾,且供需差距越来越大,到2020年时有 152.46×10^8 m³的供需差;COD排放总量从2013年开始一直呈上升趋势,到2020年时有 84.56×10^4 t的COD排放量,说明水体污染会越来越严重。

(2)方案1:开源+控污。与现状预测相比,方案1下的江苏省水资源承载力有所提高,水资源供需矛盾从2016年开始出现,到2020年时有 116.73×10^8 m³的供需差;COD排放总量呈下降趋势,到2020年时有 34.45×10^4 t的COD排放量,COD排放总量减少了一半,说明水体污染得到一定的控制。

表2 4种方案设计内容

方案	设计内容
方案1 开源+控污	通过科学技术方面的进步,严格控制水污染和提高水资源供水量,主要调整地表水资源量、地下水资源量、中水回用率和污染控制指标等指标。
方案2 节流+控污	主要从生活用水、工业用水、农业用水、第三产业用水等方面考虑节水措施。
方案3 产业结构调整+控污	主要调整三大产业的增长比例,改变三大产业的用水结构。
方案4 综合型	结合方案1、方案2和方案3,从整体上改善江苏省水资源承载力。

表3 控污指标设定

年份	污水 处理率	控污指标			
		生活污 水排放 系数	生活污水 COD排放 系数	工业污 水排放 系数	工业污 水COD 排放系数
2013	0.92	1.0	1.5	0.12	0.95
2014	0.95	0.9	1.2	0.10	0.80
2015	0.98	0.8	1.0	0.08	0.70
2016	0.99	0.7	0.9	0.07	0.69
2017-2020	0.99	0.7	0.9	0.07	0.69

(3)方案2:节流+控污。与现状预测和方案1相比,方案2下的江苏省水资源承载力又有所提高,水资源供需矛盾也是从2016年开始出现,到2020

年时有 $100.59 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的供需差,供需差在不断减小,说明供需矛盾得到进一步的改善;COD 排放总量与方案1中的COD 排放总量相近,到2020年时有 $31.85 \times 10^4 \text{ t}$ 的COD 排放量,说明COD 排放量得到了进一步的控制。

(4)方案3:产业结构调整+控污。与现状预测和方案1、2相比,方案3下的江苏省水资源承载力有了更进一步的提高,水资源供需矛盾从2018年开始出现,到2020年时有 $48.72 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的供需差,供需矛盾得到了很大的改善;COD 排放总量在不断减少,到2020年时有 $30.16 \times 10^4 \text{ t}$ 的COD 排放量,均小于方案1和方案2。

表4 2013-2020年4种方案运行结果

方案指标		2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
现状预测	A	-8.94	9.98	30.08	51.47	74.26	98.59	124.61	152.46
	B	73.56	74.86	76.25	77.72	79.28	80.94	82.69	84.56
方案1	A	-21.77	-11.88	-0.92	16.63	39.22	63.34	89.12	116.73
	B	73.56	51.60	38.37	31.57	32.23	32.93	33.67	34.45
方案2	A	-8.94	-15.13	-2.79	9.96	30.46	52.31	75.64	100.59
	B	73.56	49.88	36.47	29.29	29.88	30.50	31.16	31.85
方案3	A	-8.94	-20.15	-26.58	-28.06	-11.39	6.77	26.70	48.72
	B	73.56	49.90	36.04	28.86	29.17	29.49	29.82	30.16
方案4	A	-21.77	-65.04	-85.73	-96.97	-82.11	-65.97	-48.31	-28.86
	B	73.56	48.29	34.35	26.89	27.17	27.45	27.75	28.05

注:表4中A指供需差,单位: 10^8 m^3 ;B指COD 排放总量,单位: 10^4 t 。

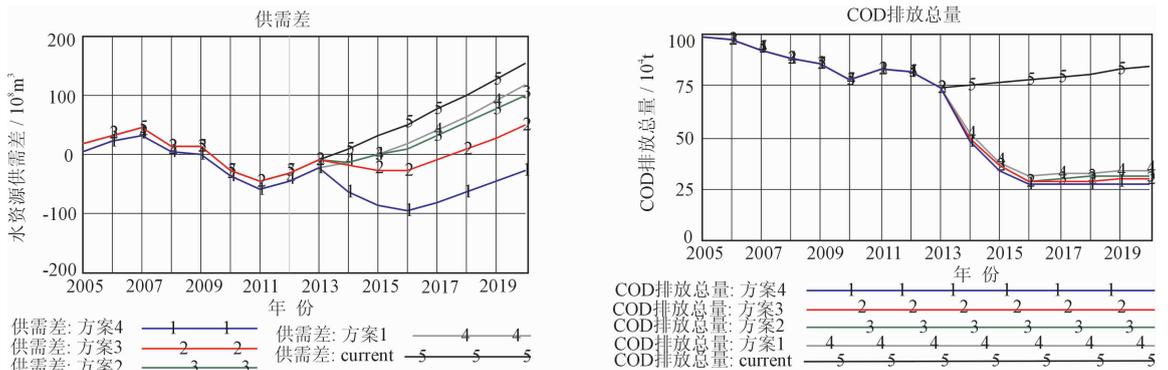


图3 4种方案下的供需差和COD 排放总量仿真图

(5)方案4:综合型。方案4是综合方案1、方案2和方案3所有的决策变量,将3种方案结合在一起所形成的方案。从表4和图3中可以得到,从2013年开始到2020年,江苏省没有出现水资源供需矛盾,说明方案4使得江苏省水资源承载力得到很大的提高,能够有效的解决江苏省水资源供需问题。到2020年时,供需差为 $-28.86 \times 10^8 \text{ m}^3$;COD排放总量低于其他方案,到2020年时,COD排放量为 $28.05 \times 10^4 \text{ t}$ 。

综上所述,方案4(综合型)在总体效果上最好,可以完全解决江苏省近几年的水资源供需矛盾问题,有效改善江苏省水资源承载力水平,所以方案四是本文所设计的最理想的方案。

5 结论

水资源在一定空间范围内表现出稀缺性,包括水资源量的稀缺性和水资源质的稀缺性。随着城市化进程的加快和社会经济的快速发展,江苏省对水资源承载力的要求会越来越高。通过对江苏省水资源承载力的分析研究,可以得出:

(1)对江苏省水资源承载力现状预测发现,生活用水始终呈现上升趋势,从2013年开始上升趋势减缓;产业用水和COD排放量从2013年开始又呈现出上升趋势,说明产业用水量在急剧增加,污染排放也在加大,最终导致江苏省水资源供需差从2013年开始变得越来越大。

(2)为了提高江苏省水资源承载力,仅对某一方面(如方案1、方案2、方案3)进行改善是不可行的,单独改善供水量、节约用水、三产结构在短时间内无法提高江苏省水资源承载力,无法满足社会发展需求。

(3)本文运用系统动力学方法所构建的江苏省水资源承载力系统模型是有效的,本文所设计的方案4,即综合型方案,可以极大提高江苏省水资源承载力水平,并保证江苏省水资源不出现供需矛盾,且

水体COD排放量控制在很低的范围内,可以保证水资源质量满足社会生活需求。

综上所述,本文为提高江苏省水资源承载力,建议江苏省应加强科学技术的提高,综合考虑开源、节流、产业结构调整和水污染控制,这是提高江苏省水资源承载力的最佳决策方案。

参考文献:

- [1] 童纪新,顾希.基于主成分分析的南京市水资源承载力研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(1):122-125.
- [2] 阿琼,基于SD模型的天津市水资源承载力研究[D].天津:天津大学,2008.
- [3] 刘佳骏,董锁成,李泽红.中国水资源承载力综合评价研究[J].自然资源学报,2011,26(2):258-269.
- [4] North American Lake Management Society, University of Minnesota. Remote sensing methods for lake management: a guide for resource managers and decision-makers[M]. North American Lake Management Society, 2009.
- [5] 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.
- [6] 陈威,周铨.武汉市水资源承载力评价应用研究[J].中国农村水利水电,2014(6):98-101.
- [7] 许朗,黄莺,刘爱军.基于主成分分析的江苏省水资源承载力研究[J].长江流域资源与环境,2011,20(12):1468-1474.
- [8] 章恒全,何薇.基于主成分回归与灰色神经网络模型的水资源承载力需水量预测[J].水资源与水工程学报,2014,25(1):103-108.
- [9] 宋晓猛,杨小芳,张玲,等.江苏省水资源承载力评价及可持续利用对策[J].人民黄河,2009,31(4):72-73.
- [10] 黄莉新.江苏省水资源承载能力评价[J].水科学进展,2007,18(6):879-883.
- [11] 罗宇,姚帮松.基于SD模型的长沙市水资源承载力研究[J].中国农村水利水电,2015(1):42-46.
- [12] 荣绍辉.基于SD仿真模型的区域水资源承载力研究——以应城市为案例[D].武汉:华中科技大学,2009.