

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.04.011

基于系统动力学的江苏水资源系统安全仿真与控制

杜梦娇¹, 田贵良¹, 吴 茜¹, 蒋 咏²

(1. 河海大学商学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省水资源服务中心, 江苏 南京 211100)

摘要:在对区域水资源系统分析的基础上,构建了江苏水资源安全系统动力学模型,并进行了模拟仿真。结果表明 2018 年后江苏省将出现水资源供需安全问题。通过定量分析找出影响江苏省水资源安全系统的 4 大动力因素,并设计 6 种不同的解决方案,通过方案对比分析得出水资源可持续发展的最优方案是综合型方案。最后,对江苏省水资源可持续发展提出了相应的政策建议。

关键词:水资源系统安全;系统动力学;仿真模拟;江苏省

中图分类号:X24 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)04-0067-07

Simulation and control of water resources system security in Jiangsu Province based on system dynamics

DU Mengjiao¹, TIAN Guiliang¹, WU Xi¹, JIANG Yong²

(1. Business School, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Jiangsu Province Water Resources Service Center, Nanjing 211100, China)

Abstract: Based on quantitative analysis of a regional water resources system, a dynamic model was constructed for the water resources security system in Jiangsu Province. A simulation case study was conducted. The results show that Jiangsu Province will have water resources supply and demand security problems after the year 2018. Through quantitative analysis, four dynamic factors that influence the water resources security system of Jiangsu Province were determined, and six kinds of solutions were designed. Through comparison of these solutions, the comprehensive solution was determined to be the optimum solution for the sustainable utilization of water resources. In addition, corresponding recommendations for sustainable development of the water resources in Jiangsu Province are proposed.

Key words: water resources system security; system dynamics; simulation; Jiangsu Province

水资源是人类社会赖以生存和发展的基础性资源,是维持区域和国家安全的战略性资源,同时也是区域生态环境系统持续良性循环的控制性要素,保障水资源安全是社会可持续发展的前提。目前,水安全问题已引起了世界的广泛关注。2000 年海牙世界级部长会议以及斯德哥尔摩世界水讨论会的主题都是“21 世纪水安全”,世界水讨论会提出要用创新的思想解决 21 世纪水安全问题。第 14 届世界水大会探讨了全球变化的背景下应对全球水危机,进行水的供给、需求管理和保障水基本卫生的途径和方法。

各国专家学者也积极开展了这方面的研究,产生了许多建设性成果。Grey 等^[1]认为水安全与经济社

会发展息息相关,并且尚未实现水安全的国家比已经实现水安全的国家面临着更大的挑战,必须加强水管理。Zeitoun 等^[2]提出了“水安全网”,并认为为了实现国家水安全必须综合考虑社会和生物物理的进程,从长远来看,国家水安全的实现必须要遵循公平分配的原则。程国栋等^[3-5]认为水安全与粮食安全、国家安全紧密相关,国家应构建虚拟水贸易的实行政策,拓展保障地区水安全、粮食安全的非工程途径。

系统动力学是一门研究系统内部信息反馈机制的科学,被广泛应用于经济社会的各个领域,解决了很多实际问题。赵筱青等^[6]运用系统动力学模型对昆明市水资源承载力进行情景模拟,提出了优化

基金项目:江苏省社会科学基金(10GLC013);国家自然科学基金(51279058)

作者简介:杜梦娇(1989—),女,硕士研究生,研究方向为水资源管理。E-mail:mengjiao9099@qq.com

通信作者:田贵良,副教授。E-mail:tianguiliang@hhu.edu.cn

昆明市水资源承载力的相关对策。曾霞等^[7]建立了武汉市城市圈系统动力学模型,通过定量分析探索武汉城市圈水资源科学管理的最佳方案。但是,以上研究都仅从发现问题然后解决问题的角度出发,而很少从深层次讨论问题产生的根源。本文从系统的观点出发,结合江苏省水资源特点构建了区域水资源系统安全模型,并找出了影响该系统安全的几大动力因素,在此基础上设计了6种不同方案,提出了保障水资源安全的相关建议,以确保地区水资源安全并实现资源高效利用。

1 区域概况与方法分析

1.1 研究区域概况

江苏省地处长江中下游,是东部沿海的发达省份。随着经济的发展,江苏人口也在稳步增加。截至2013年,江苏地区生产总值59 753.37亿元,其中第二产业增加值高达29 086.06亿元,常住人口总量7 939.49万人,其中城镇人口占总人口的64.1%,随着新型城镇化进程的加快,城镇化率将逐年上升。江苏水域面积大,水系发达。全省水源主要来源于沂沭泗、淮河下游、长江和太湖水系等3大流域系统。此外,沂河、沭河、淮河、苏北灌溉总渠、江南运河等主要水道纵横贯通,形成了四通八达的水网体系。

经济的发展、人口的增加以及城镇化进程的加快必然导致江苏在未来一段时期内用水需求增大,水资源供需矛盾日益凸显。当前,江苏省水资源安全主要面临的问题有:①人口增加以及城镇化进程加快使得生活用水不断增多,人均水资源量越来越少;②污染排放量大,但污水处理能力的不足,使得水环境质量每况愈下。

1.2 方法分析

系统动力学是以反馈控制理论为基础,以仿真技术为手段,研究复杂系统的方法^[8]。系统中各子系统都是由最基本的单元和一阶反馈回路构成。反馈回路中包括积累变量、速率变量、辅助变量和常量。积累变量是最终决定系统行为的变量,随着时间变化,当前时刻的值等于过去时刻的值加上一段时间的变化量;速率变量是直接改变积累变量的变量,反映积累变量的输入和输出的速度;辅助变量的值由系统中其他变量的计算获得,当前时刻的值和历史时刻的值相互独立。根据系统结构和变量之间的定量关系构建状态、速率以及辅助方程用以正确描述客观系统的复杂变化,其数学描述如下:

$$\text{状态方程: } L(t) = L(t_0) + \int_{t_0}^t (I(s) - O(s)) ds \quad (1)$$

$$\text{速率方程: } R(t) = \frac{dL(t)}{dt} = I(t) - O(t) \quad (2)$$

辅助变量方程:

$$A(t) = f(L_1(t), \dots, L_n(t), R_1(t), \dots,$$

$$R_m(t), C_1, \dots, C_q) \quad (3)$$

式中: $L(t)$ 为 t 时刻积累变量值; $L(t_0)$ 为 t_0 时刻积累变量值; $I(t)$ 为积累变量的流入速率; $O(t)$ 为积累变量的流出速率; $R(t)$ 为 t 时刻速率变量值,数值上为 $L(t)$ 的导数; $A(t)$ 为 t 时刻辅助变量值,其值由系统中其他变量计算获得, $L_1(t) \sim L_n(t)$ 为系统中 n 个积累变量; $R_1(t) \sim R_m(t)$ 为系统中 m 个速率变量, $C_1 \sim C_q$ 为系统中 q 个常量。

2 区域水资源安全系统动力学模型构建

2.1 区域水资源安全系统模型结构

区域水资源安全系统结构复杂,影响因素繁多,根据上文的分析,将区域水资源安全系统划分为供水子系统、需水子系统、经济子系统、水生态子系统以及人口子系统5个子系统,各系统之间通过相关要素进行相互影响与制约,共同构成水资源安全复杂系统。各个子系统结构如图1所示。

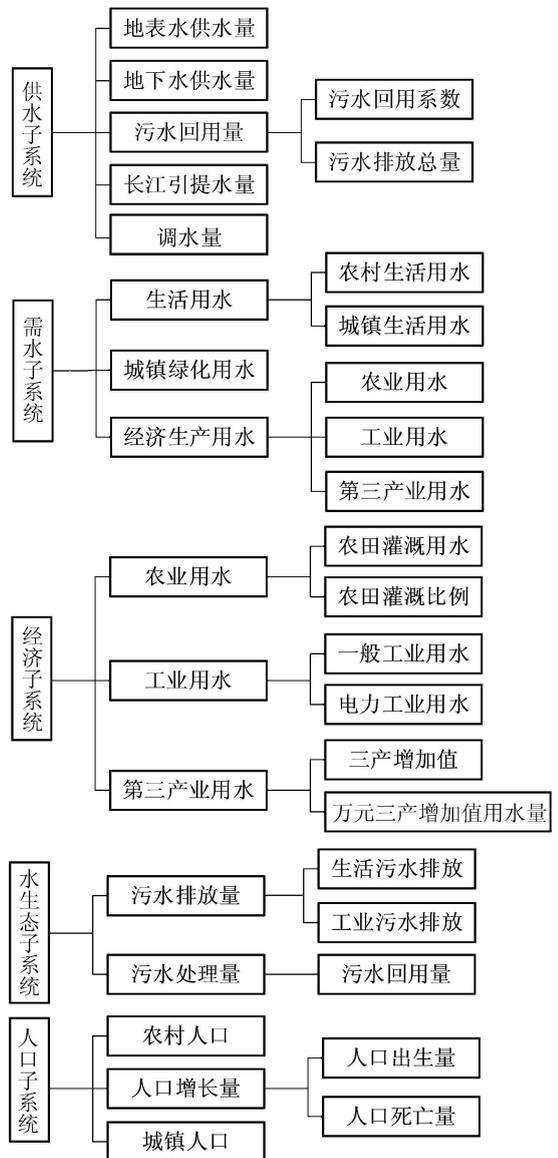


图1 水资源安全子系统结构

2.2 水资源安全系统主要反馈回路

水资源安全系统主要反馈回路如下：

人口数量→+生活用水量→+总用水量→+水资源供需缺口→+缺水率→-人口增长量→-人口数量。

人口数量→+生活污水排放量→+污水排放总量→+污水回用量→+总供水量→-水资源供需缺口→-缺水率→+人口增长量→+人口数量。

一般工业总产值→+一般工业用水量→+工业用水量→+经济生活用水量→+总用水量→+水资源供需缺口→+缺水率→-一般工业总产值变化值→-一般工业总产值。

一般工业总产值→+一般工业用水量→+工业用水量→+工业污水排放量→+污水回用量→+总供水量→-水资源供需缺口→-缺水率→+一般工业总产值变化值→+一般工业总产值。

第三产业增加值→+第三产业用水量→+经济生活用水量→+总用水量→+水资源供需缺口→+缺水率→-第三产业产值增长量→-第三产业增加值。

2.3 水资源安全系统流程

根据上文分析结果,应用 Vensim 软件画出区域水资源供需安全系统流程见图 2。

水资源供给不仅要求水资源数量上要满足社会生产的需求,还要保证水资源的质量,即降低水污染,保护水生态。因此模型分为两个部分:①用水资源供需缺口来研究水资源在数量上是否满足江苏省社会、经济、生活及生态的用水数量;②用水体 COD 总量来研究水资源的质量安全。

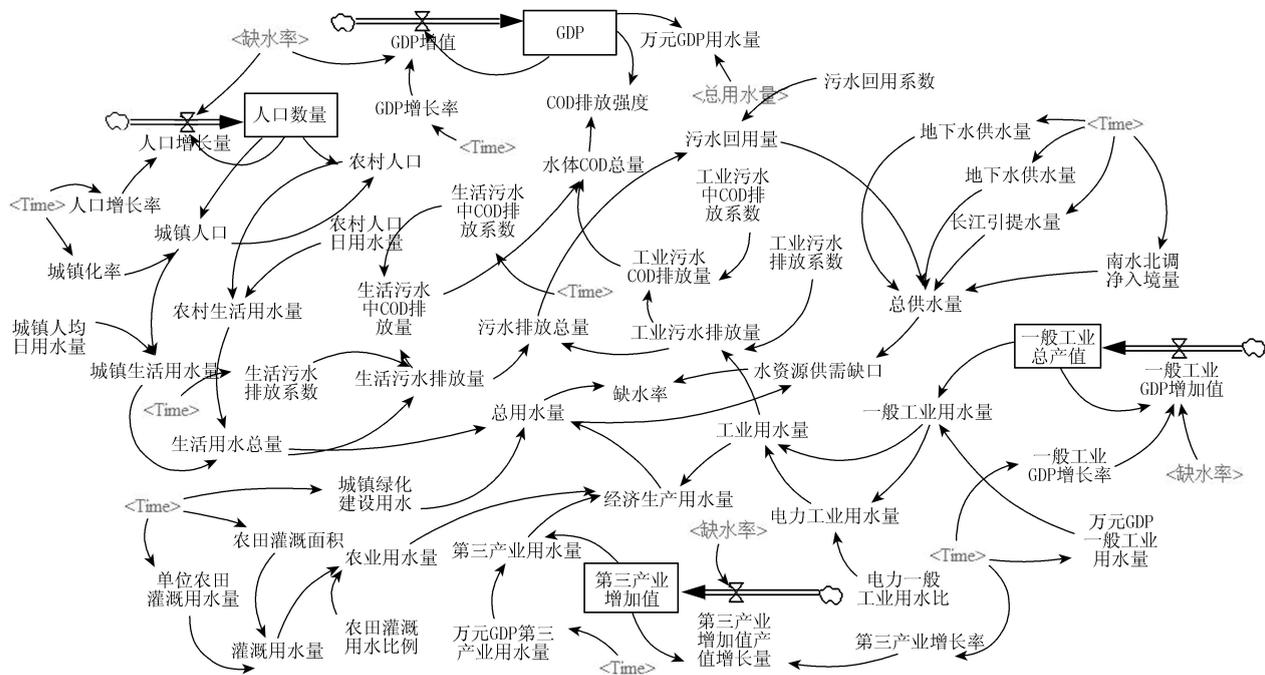


图 2 区域水资源安全系统流程

3 江苏省水资源安全系统动力学模型

3.1 模型的边界

将系统的空间边界确定为江苏省的地理边界,为使系统更具有真实性,系统的空间边界还把与江苏省内水资源密切相关的相关变量纳入系统之中。时间上,选取 2004—2013 年为历史数据统计时间段,2013—2020 年为模拟时间段,分别将 2004 年和 2013 年作为历史检验基准年和预测基准年,步长为 1 年。

3.2 主要变量

a. 总用水量为生活用水量、城镇绿化建设用水和经济生产用水量的总和。

b. 经济生产用水量为农业用水量、第三产业用水量和工业用水量的总和。

c. 工业用水量为一般工业用水量和电力工业用水量的总和。

d. 一般工业用水量为一般工业总产值与一般工业万元 GDP 用水量的积。

e. 电力工业用水量为一般工业用水量和电力工业用水系数的积。

f. 总供水量为地下水供水量、地表水供水量、长江引水量、南水北调净入境量和污水回用量的总和。

3.3 模型检验

选用历史检验的方法对江苏省水资源供需安全系统动力学模型进行检验。由于模型涉及的变量较多,笔者对人口数量、生活用水总量、农业用水量、工业用水量、第三产业用水量、污水排放总量等参数进行检验,以 2004—2013 年的历史数据为基础,将模

型仿真值与历史数据进行比较,计算两者的误差。结果发现,所有被检测的变量其仿真值与历史(真

实)值之间的误差都低于10%(表1),表明该模型通过了历史检验。

表1 检验结果

| 年份 | 人口 | | | GDP | | | 生活用水总量 | | |
|------|---------|---------|------|----------|---------|---------|----------------------|----------------------|-------|
| | 历史值/万人 | 仿真值/万人 | 误差/% | 历史值/亿元 | 仿真值/亿元 | 误差/% | 历史值/亿 m ³ | 仿真值/亿 m ³ | 误差/% |
| 2004 | 7522.95 | 7522.95 | 0.0 | 15003.60 | 15003.6 | 0.00 | 29.99 | 31.4130 | 4.74 |
| 2005 | 7588.24 | 7539.88 | 0.6 | 18598.69 | 18592.7 | -0.03 | 30.78 | 31.7862 | 3.27 |
| 2006 | 7655.66 | 7556.54 | 1.3 | 21742.05 | 21712.5 | -0.14 | 31.57 | 32.1593 | 1.87 |
| 2007 | 7723.13 | 7573.77 | 1.9 | 26018.48 | 25989.9 | -0.0011 | 32.4 | 32.3847 | -0.05 |
| 2008 | 7762.48 | 7591.19 | 2.2 | 30981.98 | 30953.9 | -0.09 | 32.98 | 32.6113 | -1.12 |
| 2009 | 7810.27 | 7608.65 | 2.6 | 34457.30 | 34398.1 | -0.17 | 33.59 | 32.9913 | -1.78 |
| 2010 | 7869.34 | 7628.13 | 3.1 | 41425.48 | 41346.5 | -0.19 | 34.00 | 33.6883 | -0.92 |
| 2011 | 7898.80 | 7649.87 | 3.2 | 49110.27 | 49036.9 | -0.15 | 34.40 | 34.0914 | -0.90 |
| 2012 | 7919.98 | 7669.83 | 3.2 | 54058.22 | 53989.7 | -0.13 | 34.70 | 34.3347 | -1.05 |
| 2013 | 7939.49 | 7688.62 | 3.2 | 59161.75 | 59064.7 | -0.16 | 35.50 | 34.5728 | -2.61 |

| 年份 | 工业用水量 | | | 第三产业用水量 | | | 污水排放总量 | | |
|------|----------------------|----------------------|-------|----------------------|----------------------|-------|----------------------|----------------------|-------|
| | 历史值/亿 m ³ | 仿真值/亿 m ³ | 误差/% | 历史值/亿 m ³ | 仿真值/亿 m ³ | 误差/% | 历史值/亿 m ³ | 仿真值/亿 m ³ | 误差/% |
| 2004 | 201.3 | 210.193 | -4.42 | 6.30 | 6.2896 | 0.16 | 46.60 | 49.1377 | 5.45 |
| 2005 | 209.6 | 228.223 | -8.89 | 7.11 | 7.0041 | 1.49 | 51.90 | 53.1394 | 2.39 |
| 2006 | 222.2 | 234.508 | -5.54 | 9.35 | 9.3211 | 0.31 | 51.56 | 54.2075 | 5.13 |
| 2007 | 227.2 | 237.369 | -4.48 | 10.57 | 10.5871 | -0.16 | 50.55 | 55.0072 | 8.82 |
| 2008 | 211.3 | 207.364 | 1.86 | 10.48 | 10.4365 | 0.42 | 50.90 | 52.0721 | 2.30 |
| 2009 | 196.5 | 192.434 | 2.07 | 11.92 | 11.8184 | 0.85 | 52.36 | 51.7079 | -1.25 |
| 2010 | 193.8 | 174.897 | 9.75 | 13.00 | 12.9774 | -0.17 | 55.50 | 51.9404 | -6.41 |
| 2011 | 194.9 | 184.803 | 5.18 | 13.30 | 13.2954 | -0.30 | 59.18 | 54.9179 | -7.20 |
| 2012 | 182.9 | 171.269 | 6.36 | 13.70 | 13.6664 | -0.25 | 58.84 | 54.6527 | -7.12 |
| 2013 | 178.5 | 186.838 | -4.41 | 13.80 | 13.7477 | 0.38 | 59.20 | 57.5966 | -2.71 |

3.4 系统动力因素分析

将水资源供需缺口作为水资源安全的一个重要指标,当水资源供需缺口为负数时说明江苏省存在水资源安全问题,当水资源供需缺口为正数时表示江苏省水资源系统暂时安全。由于数据的可获得性,本文以2014年《江苏省水资源公报》的数据为准,以2013年为预测基准年,对2013—2020年的数据进行预测,以此判断未来江苏省水资源安全问题,并寻找影响江苏省水资源安全的动力因素。

3.4.1 水资源安全预测

由图3可知,江苏省在2013—2018年期间,水资源供需缺口为负数,尚处于水资源供需安全状态。但是,水资源供需缺口已由2013年的-83.3283亿 m³变为-2.4541亿 m³,总供水量与总用水量之间的差距

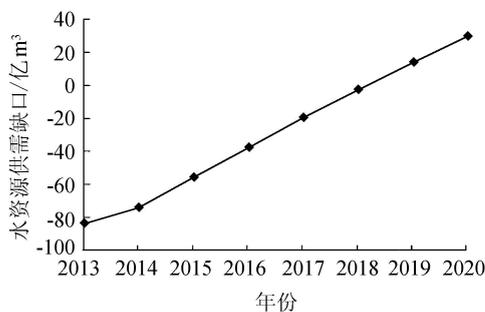


图3 水资源供需缺口预测

在不断缩小。从2019年开始,水资源供需缺口变为了正数,这说明江苏省水资源供给已无法满足需求,水资源将处于不安全状态。水资源供需缺口从2019年的14.1664亿 m³增长到2020年的30.0336亿 m³,并且仍存在着上升趋势。

从水污染的角度来看,江苏省水体COD总量在未来有下降的趋势,这和江苏加大污水治理投资相关,但是从图4看,下降幅度并不明显,COD总量仍在100万 t以上,江苏省在水资源短缺的情况也面临着水污染问题,这将加剧水资源系统的不安全系数。

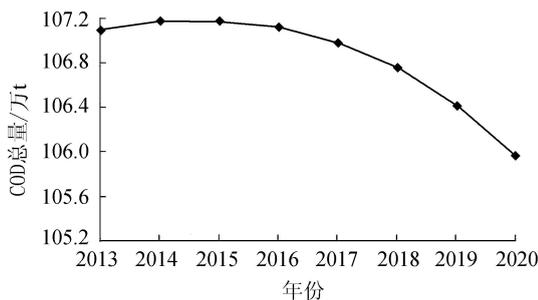


图4 水体COD总量预测

3.4.2 水资源系统动力因素分析

由于水安全系统中涉及的变量较多,对水安全的影响因素众多,在众多影响因素中有些因素对系统影响较小,有些影响相对较大。对系统涉及的参

数变动 10%，以此观察水资源供需缺口的变化情况。若水资源供需缺口变化大于 10%，则把此参数确定为系统的动力因素。通过定量分析，确定江苏省水资源安全系统的动力因素有：单位农田灌溉用水量，万元 GDP 一般工业用水量，一般工业增长率，电力一般工业用水比。虽然农田灌溉面积的变动会引起水资源供需缺口的大幅改变，但是由于农田灌溉面积未来基本上变化不大，所以不把它视为水资源安全系统的动力因素。表 2 描述了不同影响因素对水资源系统的影响。

目前，江苏省总用水量中，农业用水占 50% 左右，而单位农田灌溉用水量是农业用水量的决定因素。但是，农业产值是在第一产业、第二产业、第三产业三者中产值最低的。未来，江苏省可以通过农田灌溉技术进步降低单位农田灌溉用水量，将农业节水向单位用水产值较高的行业转移。其次就是工业用水较多，由于江苏省是电力大省，工业用水中较大一部分是电力工业用水。但是，电力工业产值较低，江苏省在水资源供需短缺的情况下，可以调整电力一般工业用水比，在保证江苏省电力使用的同时，尽可能减少电力工业用水，将节余的用水向一般工业或第三产业转移。从表 2 还可以看到，万元 GDP 第三产业用水量以及第三产业增长率的增加或减少，对水资源供需缺口的影响不大。目前，江苏省地区 GDP 总值中，第三产业所占比重为 45% 左右，且

在继续增长。由于第三产业增长快，用水少，未来江苏省应该重视第三产业的发展，成功实现产业结构升级，既能带动地区经济增长，也能缓解地区用水短缺的矛盾。城镇绿化建设用水的变动几乎不影响水资源供需缺口，但是，由于城镇绿化问题关系到环境、居民的幸福指数等问题，从水资源的角度来看，良好的环境更有利于植被生长，这在一定程度上有利于水生生态系统的稳定。所以，江苏省不应在城市绿化建设用水上节约部分水资源，而应重视城镇绿化建设。

4 水资源安全问题解决方案

由于江苏省目前已存在水资源安全问题，并且根据以上已找出的影响江苏省水资源安全的动力因素，可以通过调整动力因素的参数，给出解决目前困境的方案。

4.1 解决方案

4.1.1 维持现状型方案

维持现状型方案是将所有的参数保持不变，然后将该方案的模拟结果与其他方案模拟结果进行对比。根据模拟结果可知，虽然江苏省水资源丰富，但如果按照目前的发展趋势，水资源的需求量的增长速度大于水资源的供给速度，水资源的供需缺口不断增大（负向增大）。根据预测，到 2018 年以后江苏省将出现水资源短缺现象，短缺量约为 30.033 6 亿 m³。其

表 2 不同影响因子下水资源供需缺口的变化

| 影响因子 | 年份 | 常规 | | 参数提高 10% | | | 参数降低 10% | | |
|---|------|--------|---------------------------|----------|---------------------------|--------------|----------|---------------------------|--------------|
| | | 影响因子值 | 供需缺口/ 亿 m ³ | 影响因子值 | 供需缺口/ 亿 m ³ | 供需缺口 变化/% | 影响因子值 | 供需缺口/ 亿 m ³ | 供需缺口 变化/% |
| 城镇化率 | 2013 | 0.64 | -48.5687 | 0.704 | -47.6370 | -1.9183 | 0.576 | -49.5184 | 1.9554 |
| | 2020 | 0.71 | 66.5963 | 0.781 | 67.6459 | 1.5761 | 0.639 | 65.5251 | -1.6085 |
| 城镇人均日 用水量(m ³) | 2013 | 0.143 | -48.5687 | 0.1573 | -46.1318 | -5.0174 | 0.1287 | -51.0236 | 5.0545 |
| | 2020 | 0.143 | 66.5963 | 0.1573 | 69.3425 | 4.1237 | 0.1287 | 63.8286 | -4.1559 |
| 城镇绿化建设 用水量(亿 m ³) | 2013 | 3.2 | -48.5687 | 3.52 | -48.1318 | -0.8996 | 2.88 | -48.8976 | 0.6772 |
| | 2020 | 3.4 | 66.5963 | 3.74 | 66.9255 | 0.4943 | 3.06 | 66.2455 | -0.5268 |
| 农田灌溉面积 (亿 hm ²) | 2013 | 0.038 | -48.5687 | 0.042 | -19.3289 | -60.2030 | 0.034 | -77.8264 | 60.2398 |
| | 2020 | 0.04 | 66.5963 | 0.044 | 96.5166 | 44.9279 | 0.036 | 36.6545 | -44.9602 |
| 单位农田灌溉 用水量(m ³ /hm ²) | 2013 | 6720 | -48.5687 | 7392 | -19.3289 | -60.2030 | 6048 | -77.8264 | 60.2398 |
| | 2020 | 6510 | 66.5963 | 7161 | 96.5166 | 44.9279 | 5859 | 36.6545 | -44.9602 |
| 万元 GDP 第三产业 用水量(m ³) | 2013 | 5.22 | -48.5687 | 5.742 | -47.1983 | -2.8216 | 4.698 | -49.9570 | 2.8584 |
| | 2020 | 3.1 | 66.5963 | 3.41 | 68.2444 | 2.4748 | 2.79 | 64.9266 | -2.5072 |
| 第三产业增长率 | 2013 | 0.1281 | -48.5687 | 0.14091 | -46.3968 | -4.4718 | 0.11529 | -50.4911 | 3.9581 |
| | 2020 | 0.0769 | 66.5963 | 0.08459 | 70.5344 | 5.9134 | 0.06921 | 63.3530 | -4.8701 |
| 万元 GDP 一般工业 用水量(m ³) | 2013 | 19.3 | -48.5687 | 21.23 | -30.0041 | -38.2234 | 17.37 | -67.1334 | 38.2236 |
| | 2020 | 15 | 66.5963 | 16.5 | 91.7149 | 37.7177 | 13.5 | 41.4775 | -37.7180 |
| 一般工业增长率 | 2013 | 0.088 | -48.5687 | 0.0968 | -26.3943 | -45.6557 | 0.0792 | -68.6445 | 41.3349 |
| | 2020 | 0.075 | 66.5963 | 0.0825 | 111.9330 | 68.0769 | 0.0675 | 27.7621 | -58.3128 |
| 电力一般工业用水比 | 2013 | 2.78 | -48.5687 | 3.058 | -34.9154 | -28.1113 | 2.502 | -62.2221 | 28.1115 |
| | 2020 | 2.78 | 66.5963 | 3.058 | 85.0699 | 27.7397 | 2.502 | 48.1227 | -27.7397 |
| 污水回用系数 | 2013 | 0.05 | -48.5687 | 0.055 | -48.8570 | 0.5936 | 0.045 | -48.2805 | -0.5934 |
| | 2020 | 0.05 | 66.5963 | 0.055 | 66.2479 | -0.5232 | 0.045 | 66.9447 | 0.5232 |

中生活、生态、第三产业用水较少,而工业用水和农业用水较多,工业将代替农业成为用水大户,其中电力工业用水量将占用水总量的 28.5%。

2020 年的污水排放总量为 69.6543 亿 m^3 ,比 2013 年污水排放量增加 12.0245 亿 m^3 。虽然污水处理能力和污水回用量有所提高,但是与污水总量相比,污水处理能力和污水回用能力有很大的提升空间。

4.1.2 节约用水型方案

节约用水型方案是从生活、农业和工业 3 个方面节约用水来减少水资源的使用量,从而达到水资源的可持续发展目的。生活用水可以通过降低城市人均日用水量来减少生活用水总量,农业用水的节约主要通过减少单位面积灌溉用水量来实现,工业用水的节约则通过降低一般工业 GDP 万元用水量来实现。但生活用水量的刚性较强,降低幅度较小,且城镇人均日用水量对水资源供需缺口的影响比单位面积农田灌溉用水量和万元 GDP 一般工业用水量小得多,所以主要应通过降低单位面积灌溉用水和万元 GDP 一般工业用水量来缓解水资源供需矛盾问题。可将单位灌溉面积用水量和万元 GDP 一般工业用水量分别降低 10%。经模拟可知,2020 年的用水总量为 516.942 亿 m^3 ,与改变前相比用水量减少了 9.6%。水资源供需缺口为 14.1664 亿 m^3 ,水资源缺口减少了 53.8872 亿 m^3 。

4.1.3 产业调整型方案

产业调整型是在减缓工业发展速度同时,大力发展第三产业。工业结构调整一方面通过减少电力产业的发展,另一方面降低一般工业的发展速度,而电力产业的发展通过降低电力用水系数来进行调整,一般工业的发展通过降低一般工业的 GDP 增长率来进行调整。因此将电力用水系数从 2.75 降低为 2,一般工业 GDP 增长率降低 10%。加快第三产业的发展主要通过提高第三产业的 GDP 增长率来进行调整。因此将第三产业增长率提高 10%,经过模拟可知,用水总量为 494.118 亿 m^3 ,减少了 77.798 亿 m^3 ,水资源供需缺口为 -47.2167 亿 m^3 ,不存在水资源短缺问题。

4.1.4 开源型方案

江苏省的水资源供给主要包括地表水和地下水,其中绝大部分的水资源供给来源于地表水,其中部分来源于长江引提水。开源型是指以保护地下水为目的,充分利用污水处理后的水资源以及长江引提水量。污水回用量通过提高污水回用系数来进行调整,因此 2020 年将污水回用系数提高两倍,同时将长江引提水量增加至 130 亿 m^3 。与未改变前相比,

2020 年江苏省水资源供给量增加了 6.2%,水资源量供需缺口由 30.0036 亿 m^3 转为 -3.42181 亿 m^3 ,不存在供需安全。

4.1.5 污染治理型方案

污染治理型就是加快污水的治理,实现水生态安全。一方面减少污水的排放,通过降低生活和工业污水排放系数来减少污水的排放,将生活污水排放系数由 0.998 降低至 0.8,工业污水排放系数由 0.1343 降低至 0.12,将污水回用系数由 0.05 增加至 0.1。经模拟可知,水体 COD 总量由 106.418 万 t 降低为 90.6987 万 t。

4.1.6 综合型方案

综合型方案是将以上 4 种方案进行整合,在节水、产业调整、开源与污染治理的基础上形成的方案。节水方面:单位面积耕地灌溉用水量降低 9%,万元 GDP 一般工业用水量降低 8%;产业调整方面:将电力工业用水系数降为 2.3,一般工业 GDP 增长率降低 8%,第三产业增长率提高 8%;开源方面:将污水回用系数提高至 0.08,长江引体水量增加至 120 亿 m^3 ;治污方面:生活污水排放系数降低 5%,工业污水排放系数降低至 0.12。经模拟可知,2020 年用水总量为 473.016 亿 m^3 ,供水总量为 563.009 亿 m^3 ,充分实现了社会经济对水资源的可持续利用及水生态环境的保护。

4.2 6 种方案的对比分析

水资源供需缺口是衡量水资源供需安全的最重要指标,它可以较为直观地表现出江苏省某一年的水资源短缺程度。6 种方案下的水资源供需缺口仿真结果和水体 COD 总量仿真结果如图 5、图 6 所示。从图 5 中可以看出,江苏省在未来的一两年就会出现水资源短缺问题。如果维持现状,2018 年以后随着经济社会的发展,江苏省将出现水资源缺口,并且缺口将进一步增大,各产业之间将出现用水竞争状

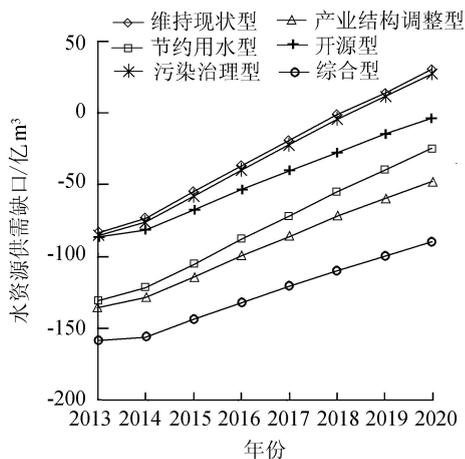


图 5 6 种方案下的水资源供需缺口仿真结果

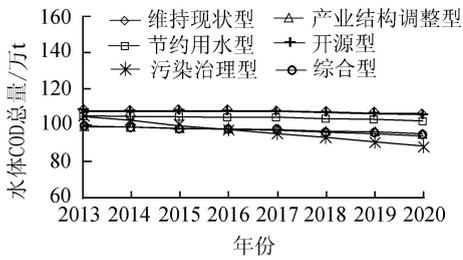


图6 6种方案下水体COD总量仿真结果

况,不利于江苏省社会的发展。

节约用水型方案可以降低水资源供需缺口,但是单独依靠降低单位用水量,当水量下降到一定程度后,由于单位水资源的刚性需求,水资源需求量很难有下降的空间,因此供水压力是维持现状型方案之后最大的,并且很快又会出现供需缺口。

产业调整型方案总体效果较节约型方案好。虽然,未来几年在产业结构调整的方案下,江苏省仍会出现供需缺口,但是,供水压力明显小于节约型方案。

开源型方案见效较好,能够快速减小供水压力,但是在2018年以后,随着经济生产的快速发展,一方面经济生产需水量增加较快,另一方面,水资源供给量有限,因此供需缺口会进一步增大,但增大幅度比节约型方案小。

污染治理型方案只考虑了污水回用量的增大,对于其他因素没有考虑,而污水回用量在总供水量所占比例较小,因此此方案效果较差。

综合型方案在总体上效果最好,从模拟结果中可以知道,综合性方案在未来一段时间内将不存在水资源供需缺口,而且发展趋势较慢。从治污的角度来看,综合性方案治理污染的成效仅次于污染治理方案,是最理想的方案。

5 结 语

水资源安全问题主要是在一段时间内由于区域水资源的质和量的供需矛盾所引发的。随着经济社会的发展和城镇化进程的加快,江苏省对水资源安全提出了更高的要求。笔者运用系统动力学方法综合考虑了经济、社会、环境、生态和水5个方面,构建了江苏省水资源安全模型,提出了水资源安全问题的解决方案。综合型方案的设计为解决江苏省即将面临的水资源安全问题提供了一种较为可行的途径。在该方案下,未来的很长一段时间内江苏省水资源供需缺口将不复存在,且水污染状况不断改善,充分实现了社会经济对水资源的可持续利用及水生态环境的保护。

未来,江苏省若要对水安全的严格控制,必须改变现状,向节约用水、产业结构调整、开源、污染

治理等方面综合调整,并辅之以科学的管理,来提高水资源利用效率,减少水资源污染,保护水生态环境和水资源安全,实现区域水资源的可持续利用。

参考文献:

- [1] GREY D, SADOFF C W. Sink or swim? Water security for growth and development [J]. Water Policy, 2007, 9(6): 545-571.
- [2] ZEITOUN M. The global web of national water security [J]. Global Policy, 2011, 2(3): 286-296.
- [3] 程国栋. 虚拟水: 中国水资源安全战略的新思路 [J]. 中国科学院院刊, 2003, 4(1): 15-17. (CHENG Guodong. Virtual water: a strategic instrument to achieve water security [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2003, 4(1): 15-17. (in Chinese))
- [4] 田贵良. 虚拟水贸易影响水安全及粮食安全研究综述 [J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2014, 16(1): 56-60. (TIAN Guiliang. Research overview on impact of virtual water trade concerning water security and food security [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2014, 16(1): 56-60. (in Chinese))
- [5] 钟华平, 耿雷华. 虚拟水与水安全 [J]. 中国水利, 2004(5): 22-23. (ZHONG Huaping, GENG Leihua. Virtual water and water safety [J]. China Water Resources, 2004(5): 22-23. (in Chinese))
- [6] 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(增刊2): 339-342. (ZHAO Xiaqing, RAO Hui, YI Qi. Study on water resource carrying capacity in Kunming City based on SD model [J]. China Population Resources and Environment, 2011(sup2): 339-342. (in Chinese))
- [7] 曾霞, 陆健华. 区域水资源供需系统仿真及优化决策研究 [J]. 统计与决策, 2015(4): 64-67. (ZENG Xia, LU Jianhua. Regional water resource supply and demand system simulation and optimization decision [J]. Statistics and Decision, 2015(4): 64-67. (in Chinese))
- [8] 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. (LUO Yu, YAO Bangsong. The water resources carrying capacity based on SD model in Changsha [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(1): 42-46. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-07-20 编辑: 徐 娟)

