

doi: 10.3724/SP.J.1201.2014.01047

基于系统动力学的区域水资源二次供需平衡分析

王伟荣¹, 张玲玲¹, 王宗志²

(1. 河海大学 公共管理学院, 南京 211106; 2. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家实验室, 南京 210029)

摘要: 根据江苏省的水资源现状, 采取系统动力学仿真模拟方法对2020年和2030年50%、75%、95%保证率下全省水资源供需水进行预测, 在此基础上分别进行基于现状供水能力的一次供需平衡分析以及提高供水能力和节水措施下的二次供需平衡分析。结果表明, 一次供需平衡分析时, 供需缺口很大; 二次供需平衡分析时, 供需矛盾得到很大程度的改善, 2020年50%保证率下供需缺口降低49.70%, 2030年50%保证率下供需缺口降低47.43%。

关键词: 水资源; 系统动力学; 供需平衡; 二次平衡分析

中图分类号: TV213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0047-04

Second Time Supply and Demand Balance Analysis of Regional Water Resources Based on System Dynamics

WANG Wei rong¹, ZHANG Ling ling¹, WANG Zong zhi²

(1. School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 211106, China; 2. Nanjing Hydraulic Research

Institute State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: According to the present water resources conditions of Jiangsu Province, system dynamics simulation method was used to predict the water resources supply and demand balance in Jiangsu Province in 2020 and 2030 level year under different guarantee rates (50%, 75%, and 95%). On the basis, the first time supply and demand balance analysis of water resources was performed under the current conditions, and the second time supply and demand balance analysis of water resources was performed under the conditions of improved water supply capacity and water saving measures. The results showed insufficiency for the first time supply and demand balance analysis of water resources, and that the imbalance between supply and demand improves for the second time supply and demand balance analysis of water resources. The insufficiency can decrease 49.70% under the guarantee rate of 50% in 2020, and decrease 47.43% under the guarantee rate of 50% in 2030.

Key words: water resources; system dynamics; supply and demand balance; second time balance analysis

1 研究背景

江苏省水资源总量相对丰富, 但时空分布不均, 部分地区在非汛期出现水资源供不应求的局面。随着江苏省社会经济发展和人口增长, 水资源供需矛盾、水质恶化已成为江苏省社会经济发展的巨大障碍^[1]。因此, 开展水资源供需预测及供需平衡分析, 对江苏省的社会经济发展和水资源的可持续利用具有现实意义。

区域水资源供需平衡分析的目的是揭示区域内水资源供需矛盾, 探析水资源开发利用的途径和潜力, 为水资源配置打好基础。水资源供需平衡分析是环境保护、经济规划和水资源管理的决策依据^[2], 旨在为水资源利用提供理论和科学依据, 对经济的持续发展、生态环境良性循环具有十分重

要的意义。因此, 各地区相继开展了对水资源供需平衡的研究。顾世祥等^[3]基于三次供需分析对云南省水资源合理配置进行了研究; 李彦红^[4]根据济宁市水资源现状进行供需平衡分析, 在供需分析的基础上对济宁市水资源优化配置方案进行比选。但是传统的模型方法解释能力通常比较弱, 不能完整的体现出供需发展的动态过程, 而系统动力学是解决这一问题的有效方法。

系统动力学(System Dynamics, 简称SD)由美国麻省理工学院福雷斯特(Jay. w. Forrester)于1956年创立, 其基本思想是充分认识系统中的动态性和反馈机制, 研究复杂问题的反馈过程^[5], 并按一定的规则初步建立系统动力学结构模型。利用系统动力学模型对水资源系统的运行过程进行模拟的优势是它可以反映系统中各个环节、各个时刻的水流状

收稿日期: 2013-06-13 修回日期: 2013-11-27 网络出版时间: 2013-12-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01050.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301003; 201201022; 201001074); 国家自然科学基金(51109055; 51279223); 江苏省社会科学基金重点项目(11GLA001)

作者简介: 王伟荣(1987-), 女, 安徽亳州人, 硕士研究生, 主要从事水利行政方面的研究。E-mail: 591333996@qq.com.

态和供需平衡状况,因此采用系统动力学方法对水资源、经济以及环境三者耦合的系统进行分析,能够达到水资源开发利用、社会经济发展、生态环境保护协调一致的目标。

本文以江苏省为例,建立系统动力学模型,模拟江苏省 2006 年-2030 年的供需水量,反映未来江苏省水资源的供需能力。并通过二次供需平衡分析方法,探讨江苏省水资源供需现状和供需平衡缺口为水资源合理配置和合理利用提供依据。

2 研究数据

分析数据主要参考江苏省“十二五”规划和 2000 年-2010 年的《江苏省水资源公报》、《江苏省统计年鉴》^[6 8]。

2.1 水资源数据

江苏省水资源总体十分丰富,但降水量在年季之间变化很大,汛期主要集中在 5 月-9 月,易出现突发性干旱和洪涝,而且水资源时空分布不均,调蓄能力差,造成部分地区水资源不足。2005 年,全省平均降雨量 1 084.0 mm,全省总供水量 517.7 亿 m³。其中,地表水供水量 506.9 亿 m³,占总供水量的 97.9%;地下水供水量 10.8 亿 m³,占总供水量的 2.1%。

2.2 人口数据

2005 年末江苏省总人口数达到 7 474.5 万人,比上年增长 42 万,增长 0.6%。其中城镇人口 3 774.62 万,城镇化率达到 50.5%。多年来,江苏一直是全国人口密度最高的省份之一。

2.3 社会经济数据

改革开放以来,江苏经济发展取得了显著成就。2005 年,地区生产总值实现 18 305.66 亿元,“十二五”期间年均增长 12.5%。其中第一产业增加值 1 461.48 亿元,第二产业增加值 10 355.04 亿元,第三产业增加值 6 489.14 亿元,人均地区生产总值达到 244 908.15 元。

3 供需分析模型构建

3.1 二次供需分析思路

为揭示江苏省规划水平年水资源供需平衡态势及存在的问题,明晰江苏省节水型社会建设的方向,采用“二次平衡分析”方法对江苏省不同水平年供需平衡情势进行剖析^[9]。其中,一次平衡分析是在现状用水水平和供水条件下,依据江苏省当前发展模式,对未来规划水平年的水资源供需特征进行分析,充分展示在没有采取任何措施情势下区域水资源供需矛盾。二次平衡分析是在一次供需平衡分析之后,通过采取节水措施或挖掘现有水利工程设施的供水能力,并考虑规划建设的当地水源工程,再次进行的区域水资源供需平衡分析^[10]。

3.2 模型结构

供需水系统是区域内所有供水主体和所有需水主体及其相互作用构成的复合体,层次结构复杂,涉及资源、经济、环境等方面。同时,由于需水主体的有限理性和自适应性,及用水环境的多要素性和不确定性,供需水的有效模拟是一个复杂的过程,必须对系统中各子系统之间的相互作用进行有效描述。构建江苏省供需平衡分析模型时,把整个大系统分为资源、环境、社会等子系统。各个子系统之间相互联系,

一个系统的用水又会制约其他系统的用水,通过各种反馈渠道,将各个子系统耦合成一个复杂的有机整体。构建的系统流程图见图 1。

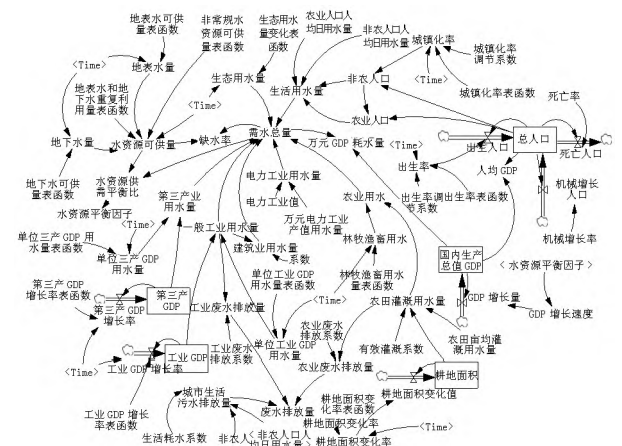


图 1 江苏省水资源供需预测模拟系统流图

Fig. 1 Flow chart for forecast simulation system of water resources supply and demand in Jiangsu Province

3.3 模型主要方程

3.3.1 可供水量预测

可供水量是指不同水平年、不同保证率条件下通过工程设施可提供的符合一定标准的水量,包括区域内地表水、地下水、非常规水(雨洪水和污水处理利用)等。可供水量的 SD 方程如下:

$$\text{可供水量} = \text{地表水量} + \text{地下水量} - \text{地表和地下水的重复利用} + \text{非常规水量} \quad (1)$$

3.3.2 生产需水预测

生产需水按产业结构划分,分为第一产业需水、第二产业需水和第三产业需水。第一产业需水主要是农业需水,包括农田灌溉需水和林牧渔需水;第二产业需水主要是工业需水和建筑业需水,包括一般工业需水和火电工业需水。生产需水的主要 SD 方程如下:

$$\text{农业需水} = \text{农田灌溉需水} + \text{林牧渔需水} \quad (2)$$

$$\text{工业 GDP} = \text{INT EG}(\text{工业 GDP 增长值}, \text{工业 GDP 现值}) \quad (3)$$

$$\text{工业需水} = \text{工业增加值} \times \text{单位工业增加值用水量} \quad (4)$$

$$\text{第三产业需水} = \text{第三产业增加值} \times \text{单位第三产业增加值用水量} \quad (5)$$

3.3.3 生活需水预测

模型中主要考虑常住人口的生活需水量,它受机械变动人口、出生率和死亡率的影响。该子系统模块主要研究人口数量的变化对生活需水的影响以及水资源状况和经济规模、速度增长对人口增速的影响。生活需水量由城镇人口、农村人口与城镇人均生活需水量、农村人均生活需水量决定,其主要的 SD 方程如下:

$$\text{总人口} = \text{出生人口} + \text{机械增长人口} - \text{死亡人口} + \text{总人口现值} \quad (6)$$

$$\text{城镇人口} = \text{城镇化率} \times \text{总人口} \quad (7)$$

$$\text{生活用水量} = \text{城镇人口} \times \text{城镇人均生活用水量} + \text{农村人口} \times \text{农村人均生活用水量} \quad (8)$$

3.3.4 生态需水预测

生态需水指城镇环境绿化用水量。生态需水与相应的生态保护、恢复目标以及生态系统自身需求直接相关。生态需水除了受绿化面积的影响外,主要受到政府部门相关政策及规划的影响。

3.4 模型检验

3.4.1 方程和量纲一致性检验

运用 Vensim 中的“Start Synthesim”工具对所建立的江苏省水资源供需平衡分析系统动力学模型进行了模型本身和单位的一致性检验。由于参数众多,且各个参数的单位设定并不一致,在构建方程的过程中,对各个不同的单位进行统一化,使模型通过量纲一致性检验。

3.4.2 历史性检验

检验时间为 2006 年至 2010 年。本次检验的变量选取生态需水量,相对误差均未超过 5%,检验结果见表 1。

表 1 生态用水检验结果

Table 1 Test results of ecological water use

年份	生态用水实际值/亿 m ³	模拟运行值/亿 m ³	相对误差(%)
2006	3.04	3.042	0.0658
2007	3.08	3.084	0.1299
2008	3.10	3.12	0.6410
2009	3.18	3.16	-0.6289
2010	3.20	3.21	0.3125

3.5 情景设计

根据江苏省“十二五”规划,本文采取了节水和增加供水

相结合的方案,即:一是减少工业用水定额和灌溉水利用系数,二是通过增加非常规水量。非常规水是指再生水,即用水量中的重复利用部分。二次供需分析方案设计见表 2。

表 2 二次供需分析方案设计

Table 2 The design of the second time supply and demand analysis

方案	灌溉水利用系数	万元工业 GDP 用水量/(m ³ ·万元 ⁻¹)	非常规水量/亿 m ³
当前模式(2010)	0.55	24	160
情景设计	0.58	19	175

4 模拟结果分析

4.1 一次供需平衡分析

在现有供水工程条件和现有发展模式下,江苏省进行供需平衡分析结果显示(表 3),规划水平年 2020 年 50% 保证率下缺水 65.49 亿 m³,缺水率 13.28%;2030 年 50% 保证率下缺水 72.57 亿 m³,缺水率 14.01%,说明未来江苏省水资源不能满足社会经济用水要求。

4.2 二次供需平衡分析

按照表 2 情景设计方案对江苏省进行的二次供需平衡分析,结果显示(表 4),在规划年 2020 年、2030 年在 50% 保证率下的新增供水量分别是 15 亿 m³、16.12 亿 m³;通过节水,2020 年、2030 年减少的用水量分别是 17.55 亿 m³、18.3 亿 m³,说明采取“挖潜”和“节流”措施后,江苏省水资源供需矛盾得到很大程度的改善,但还需继续实施其他措施(如通过外调水和产业结构的调整),才能达到供需平衡。

表 3 江苏省一次供需平衡结果

Table 3 The first time supply and demand balance analysis results in Jiangsu Province

保证率	水平年	可供水量/亿 m ³	需水量/亿 m ³					余缺水量/亿 m ³ (可供水量-需水量)	余缺水率(%)	
			农业		工业	生活	其他			小计
			农田灌溉	林牧渔畜						
P=50%	2020	493.30	275.61	40.11	179.81	32.34	30.92	558.79	-65.49	-13.28
	2030	518.10	280.52	43.52	182.22	34.81	49.60	590.67	-72.57	-14.01
P=75%	2020	492.62	276.08	40.11	179.81	32.34	34.24	562.58	-69.96	-14.20
	2030	516.34	282.21	43.52	182.22	34.81	50.27	593.03	-76.69	-14.85
P=95%	2020	490.94	278.33	40.11	179.81	32.34	43.63	574.22	-83.28	-16.96
	2030	512.58	285.46	43.52	182.22	34.81	53.94	599.95	-87.37	-17.05

表 4 江苏省二次供需平衡结果

Table 4 The second time supply and demand balance analysis results in Jiangsu Province

保证率	水平年	可供水量/亿 m ³	需水量/亿 m ³					余缺水量/亿 m ³ (可供水量-需水量)	余缺水率(%)	
			农业		工业	生活	其他			小计
			农田灌溉	林牧渔畜						
P=50%	2020	508.30	268.32	40.11	169.55	32.34	30.92	541.24	-32.94	-6.48
	2030	534.22	271.13	43.52	173.31	34.81	49.60	572.37	-38.15	-7.14
P=75%	2020	506.83	269.27	40.11	169.55	32.34	34.24	545.51	-38.68	-7.63
	2030	531.94	273.45	43.52	173.31	34.81	50.27	575.36	-43.42	-8.16
P=95%	2020	505.76	270.64	40.11	169.55	32.34	43.63	550.27	-50.51	-9.99
	2030	529.11	276.83	43.52	173.31	34.81	53.94	582.41	-53.3	-10.07

5 结语

利用系统动力学模型,对江苏省进行了两次供需平衡分

析,结果显示:一次供需平衡分析时,水资源供需矛盾十分突出;二次供需分析得出,江苏省供需矛盾得到了很大程度的

(下转第 81 页)

模型的实用性和有效性。

(2) 有风工况下,宽浅型水库水体最大更新时间为 203 d。在流速较大的区域,水体更新时间短;反之水体更新时间长。

(3) 无风工况下,宽浅型水库水体最大更新时间为 358 d。无风工况下水体更新时间明显长于有风工况,表明风速场对水库水体更新时间的影响较大,有助于促进水体中污染物的迁移扩散。

参考文献(References):

- [1] Zimmerman J T F. Mixing and Flushing of Tidal Embayments in the Western Dutch Wadden Sea: Part I. Distribution of Salinity and Calculation of Mixing Time Scales [J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1976, 10(2): 149-191.
- [2] Bolin B, Rodhe H. A Note on the Concepts of Age Distribution and Transit Time in Natural Reservoirs [J]. *Tellus*, 1973, 25: 58-62.
- [3] Ranasinghe R, C Ppttiarathi. Flushing Characteristics of a Seasonally open Tidal Inlet: A Numerical Study [J]. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14: 1405-1421.
- [4] Arneborg L. Turnover Times for the Water above Sill Level in Gullmar Fjord [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24: 443-460.
- [5] Tartinville B, Deleersnijder E, Rancher J. The Water Residence Time in the Mururoa Atoll Lagoon: Sensitivity Analysis of a Three-dimensional Model [J]. *Coral Reefs*, 1997, 17: 193-203.

- [6] Eric D, Jean M C, Eric J M D. The Concept of Age in Marine Modelling I. Theory and Preliminary Model Results [J]. *Journal of Marine Systems*, 2001, 28, 229-267.
- [7] Guyondet T, Koutitonsky V G, Roy S. Effects of Water Renewal Estimates on the Oyster Aquaculture Potential of an Inshore area [J]. *Journal of Marine Systems*, 2005, 58: 35-51.
- [8] Jin K R, Ji Z G, James R T. Three-dimensional Water Quality and SAV Modeling of a Large Shallow Lake [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2007, 33(1): 28-45.
- [9] Dias J M, Sousa M C, Bertin X, et al. Numerical Modeling of the Impact of the Ancao Inlet Relocation (Ria Formosa, Portugal) [J]. *Environmental Modeling & Software*, 2009, 24: 711-725.
- [10] Liu Z, Wei H, Liu G, et al. Simulation of Water Exchange in Jiaozhou Bay by Average Residence Time Approach [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 61: 25-35.
- [11] Shen Y M, Wang J H, Zheng B H, et al. Modeling Study of Residence Time and Water Age in Dahufang Reservoir in China [J]. *Science China*, 2011, 54(1): 127-142.
- [12] Zhang S X, Gao X P. Effects of Selective Withdrawal on Temperature of Water Released of Glen Canyon Dam [A]. *The International Conference on Environmental Pollution and Public Health [C]*. Chengdu, China, 2010, 1-4.
- [13] Zhang B, Lv J, Huo P, et al. Application of EFDC to Density Stratified Flow [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 256: 2486-2489.

(上接第 49 页)

改善,但仍有缺口。可见,未来江苏省的水资源已不能满足本地的国民经济发展和社会需求。

由于本地节水措施实施不到位导致水资源大量浪费,因此要实现区域水资源平衡,江苏省最应做的是在全省加强节水工作。节水工作要从各方面同时入手,增强人们保护水资源和节水意识。节水是实现区域水资源平衡的一条重要途径,但不是唯一途径。比如,还可利用河、湖、塘蓄水,增加调蓄设施,配以提引水工程,以丰水年拦蓄的汛期降雨径流弥补枯水年的短缺;进行产业结构调整、农业种植结构调整和时空调度。另外,外调水同样也是实现区域水平衡的主要途径。

参考文献(References):

- [1] 刘昌明. 二十一世纪中国水资源若干问题的讨论 [J]. *水利水电技术*, 2002, 33(1): 15-19. (LIU Chang-ming. Discussion on Some Water Resources Problems in China in Twenty-first Century [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2002, 33(1): 15-19. (in Chinese))
- [2] 周益,李援农. 石羊河流域水资源供需平衡分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2008, 19(6): 86-89. (ZHOU Yi, LI Yuan-nong. Water Resources Supply and Demand Analysis in Shiyang River Basin [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2008, 19(6): 86-89. (in Chinese))
- [3] 顾世祥,李俊德,谢波. 云南省水资源合理配置研究 [J]. *水利水电技术*, 2007, 38(12): 54-58. (GU Shi-xiang, LI Jun-de, Xie Bo. Study on Reasonable Allocation of Water Resources in Yunnan Province [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2007, 38(12): 54-58. (in Chinese))
- [4] 李彦红. 基于供需平衡的济宁市水资源优化配置研究 [R].

2011. (LI Yan-hong. The Optimal Allocation Research of Water Resources Based on Supply and Demand Balance in Jining City [R]. 2011. (in Chinese))

- [5] 王振江. 系统动力学引论 [M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1988. (WANG Zhen-jiang. Introduction to System Dynamics [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1988. (in Chinese))
- [6] 江苏省人民政府办公厅. 江苏省水资源“十二五”综合规划 [R]. 2007. (The General Office of the People's Government of Jiangsu Province. The Water Resources “twelve fifth” Planning in Jiangsu Province [R]. 2007. (in Chinese))
- [7] 江苏省水利厅. 江苏省水资源公报 [Z]. 2005-2010. (Water Resources Department of Jiangsu Province. Water Resources Bulletin of Jiangsu Province [Z]. 2005-2010. (in Chinese))
- [8] 江苏省统计局. 2010 年江苏省统计年鉴 [M]. 江苏: 江苏统计出版社, 2010. (Statistics Bureau of Jiangsu Province. Statistical yearbook of Jiangsu Province [M]. Jiangsu: Jiangsu Statistical Press, 2010. (in Chinese))
- [9] 水利部水利水电规划设计总院. 全国水资源综合规划技术大纲 [R]. 2002: 35-36. (Water Conservancy and Hydropower Planning and Design Institute of Ministry [R]. The National Integrated Water Resources Planning Technology. 2002: 35-36. (in Chinese))
- [10] 张黎渊. 基于三次平衡原理的水资源供需平衡分析 [J]. *河南水利与南水北调*, 2008, (1): 19-20. (ZHANG Li-yuan. Water Supply and Demand Balance Analysis Based on the “three time” Balance Principle [J]. *Henan Water Conservancy and the South to North Water Diversion Project*, 2008, (1): 19-20. (in Chinese))