

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.04.003

基于系统动力学的南阳市水资源供需平衡分析

郝光玲^{1,2,3}, 王 焜^{1,2,3}, 李春晖^{1,2}, 张力小³, 朱 洁^{1,2,3}

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 北京师范大学水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;
3. 北京师范大学水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要:利用系统动力学模型定量模拟了南水北调中线工程渠首所在地南阳市的水资源供需情况,并在分析水资源供需平衡影响因子的基础上,假定了传统发展模式、强调经济增长的发展模式、经济发展与环境相协调模式等3种南阳市社会经济发展模式,对未来水资源的供需平衡状况进行分析。结果表明,按照传统发展模式,未来几年南阳市将面临严峻的水资源短缺形势;强调经济增长的发展模式则会使水资源短缺问题进一步加剧;在协调型模式下,水资源供求矛盾最小。指出为解决水资源供需矛盾、保障南水北调工程的供水安全,必须尽快转变经济发展方式,依靠节水投资、科技进步、水资源管理等手段来提高水资源利用率,从根本上减少水资源需求量,维持水资源供需平衡和社会经济持续健康发展。

关键词:水资源;供需平衡;系统动力学模型;经济发展模式;南阳市

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)04-0015-05

Analysis of water supply and demand balance in Nanyang City based on system dynamics

HAO Guangling^{1,2,3}, WANG Xuan^{1,2,3}, LI Chunhui^{1,2}, ZHANG Lixiao³, ZHU Jie^{1,2,3}

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In this paper, the water supply and demand situation in Nanyang City, which is the location of the head of the Middle Route Project of South-to-North Water Diversion, was simulated using system dynamics model. Based on the analysis of the factors affecting the balance of water supply and demand, three social and economic development programs of Nanyang City, that is, "traditional development mode", "emphasized economic growth development mode" and "economic and environmental coordination development mode" were assumed. Meanwhile, future water resources supply and demand balance were analyzed. The results showed that under the "traditional development mode", Nanyang City would face severe water shortages in the future years; under the "emphasized economic growth development mode", water shortages in Nanyang City would be further intensified; under the "economic and environmental coordination development mode", there would be a minimum conflict between water supply and demand. Therefore, in order to solve the contradiction between water supply and demand and ensure water supply security of South to North Water Diversion Project, the economic development mode should be changed as soon as possible and some effective measures, such as relying on water-saving investment, technological progress, water resources management and other means, should be taken to improve the utilization of water resources. Only in this way can we fundamentally reduce the amount of water resources, maintain water supply and demand balance water resources and can the social economy develop continuously and healthily.

Key words: water resources; balance of supply and demand; system dynamics model; economic development model; Nanyang City

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(12011BAC12B02)

作者简介:郝光玲(1990—),女,硕士研究生,研究方向为流域水资源安全评价与管理。E-mail:hg1370@163.com

通信作者:王焜,教授,E-mail:wangx@bnu.edu.cn

水资源是人类生存和社会生产所必需的基础性资源,水资源的供需矛盾严重制约着区域社会经济的发展。随着人口的增加和社会经济的发展,淡水资源的供需矛盾变得日益突出,水资源需求预测已经成为近年来各个国家和地区开展水资源规划的首要任务。城市水资源需求量涉及人们生产和生活的各个方面,且各部分之间相互作用,是一个复杂系统。水资源供需系统的主要反馈回路是:区域社会经济发展→社会经济发展需水→供需差值→区域社会经济发展。它可以用来定性和定量地描述一定时域内复杂的系统行为。系统动力学(system dynamics)以反馈控制理论为基础,擅于处理高阶次、非线性、时变的问题,目前已经成功用于社会、经济和生态等复杂大系统的许多分析与管理决策中,在水资源承载力、需水量预测等方面的应用也越来越广泛^[1-2]。运用系统动力学模型进行水资源供需平衡预测是一个行之有效的方法。

南阳市是南水北调中线工程的渠首所在地和重要水源地,是丹江口水库的主要淹没区和移民搬迁安置区,在整个南水北调中线工程建设中占有非常重要的地位。近几年,一方面,随着南阳市国民经济的高速发展和人口的增长,对淡水资源的需求不断增加;另一方面,南阳市属于水资源缺乏地区,结构性缺水问题突出,同时,水资源浪费和水污染加剧了南阳市水资源供需矛盾^[3]。为此,对南阳市未来几年的水资源需求进行预测,深入分析南阳市水资源供需矛盾,研究水资源与社会经济发展的长期相互作用和影响,不仅能为南阳市科学高效配置水资源、促进水资源的可持续利用和节水型社会建设提供技术支持,而且对南水北调中线工程实施后的供水安全保障具有举足轻重的战略意义。

本文基于系统动力学原理,运用 STELLA 软件,综合考虑影响水资源需求的第一、二、三产业子系统,以及人口和社会发展子系统等,建立南阳市水资源供需系统模型,分析未来 10 年水资源的需求量和供给量,并依据模型的敏感性分析结果假定南阳市未来的社会经济发展方案。在拟定的发展方案下,对南阳市水资源供需平衡进行预测,从而找到加强水资源科学管理、促进用水合理化、节约水资源和维持水资源可持续利用的有效途径,为南阳市水资源合理配置与经济政策制定提供参考^[4]。

1 南阳市水资源概况

南阳市位于河南省西南部,年平均降水量为 709 ~ 1 168 mm,多年平均水资源总量为 68.43 亿 m^3 ,人均水资源占有量为 642.5 m^3 ,仅为全国人均水

资源占有量的 28%。根据富肯·玛克的“水紧缺指标”,南阳市属于重度缺水地区^[5]。

南阳市水资源开发利用中存在诸多问题,主要表现在:①降水分布极度不均。首先是时间分布不均,南阳市降水主要集中在 6—9 月,降水量占全年降水量的 60% ~ 70%,其他月份则雨水稀少;其次是水资源区域分布不均,水资源分布与经济发展程度极不相称。水资源时空分布不均,极大地限制了对水资源的开发利用^[6]。②水资源量呈减少趋势,且过度开采,导致出现降落漏斗。南阳市城市供水主要依靠开采浅层地下水,大规模地下水开采导致白河南岸等地区出现地下漏斗并进一步扩展^[5]。③水资源浪费严重。目前,南阳市工农业生产多为传统生产方式,生产方式落后、用水方式粗放、效率不高致使水资源浪费现象十分严重,进一步加剧了水资源短缺的局面。④水环境污染。南阳市河流污染严重,工业废水是重点污染源,商业污水和生活污水未经处理排放也加剧了水环境污染。

由于南阳市水资源量减少,且全民节水 and 环境保护意识不强,水资源浪费和污染现象严重,在未来几年中,水资源问题将制约南阳市社会经济可持续发展,并为南水北调供水安全带来隐患。

2 系统动力学模型构建

2.1 模型边界条件

基于系统动力学原理,运用 STELLA 软件,建立南阳市水资源供需系统模型(图 1),定量模拟南阳市水资源供需平衡情况。根据系统结构和系统边界划分原则,将直接参与或对水资源环境和经济系统有较大影响的因素划分在边界之内,而将间接参与或虽然直接参与但影响相对较小的因素划分在边界之外。本模型以南阳市的行政边界作为空间研究边界,时间边界取 2006—2030 年,时间步长为 1 年。人口数量、灌溉面积、各产业的水资源需求量、生活需水量和各产业产值等对整个系统有较大的影响,因而包含在内容边界内。政策制定方面,由于侧重于研究社会经济政策的影响效果,因此只考虑了水利投资等一些主要因素。

2.2 模型结构

模型主要分析了人口、经济和社会子系统对南阳市水资源供需的影响。南阳市水资源供需系统中各要素相互影响、相互制约,形成具有多重反馈的因果关系,涉及的反馈回路主要有:①人口→水资源需求量→水资源供需比→人口;②工业产值→工业用水量→水资源供需比→工业产值增长率→工业产值;③总产值→节水投资→水资源需求量→水资源

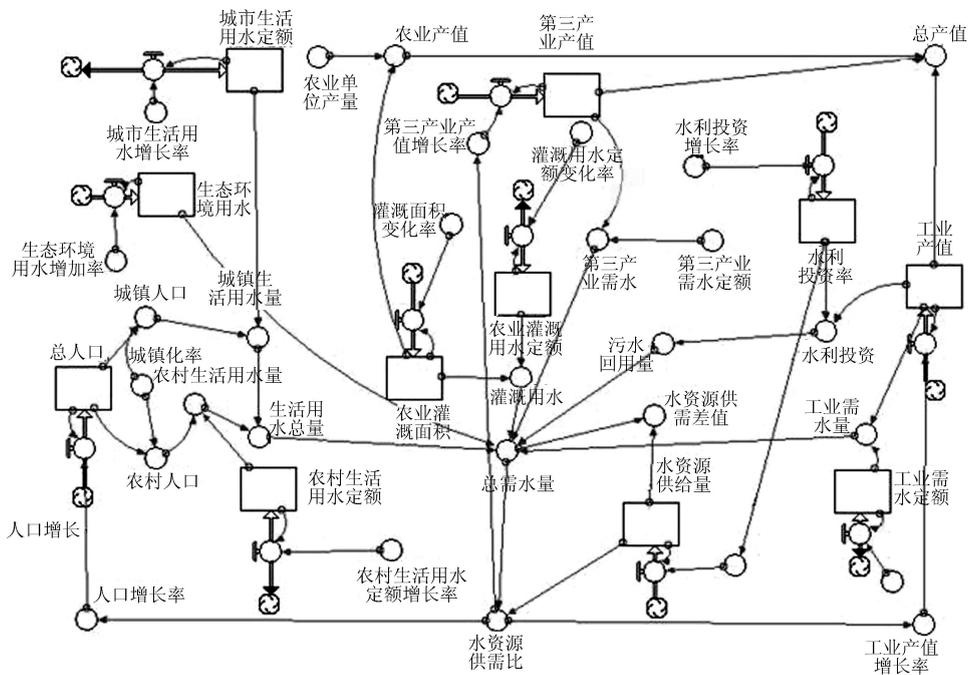


图1 南阳市水资源供需系统模型

供需比→总产值。

2.3 模型参数确定

模型所采用的社会经济发展、水资源量和水资源供需等数据资料均引自《河南省统计年鉴》(2006—2012年)、《南阳市水资源公报》(2006—2012年)、《南阳市国民经济和社会发展统计公报》(2006—2012年)等,或经计算整理获得;模型的参数也从统计年鉴、统计公报和水资源公报中直接引用,或通过数学、统计学方法计算出结果,再代入模型中。

2.4 模型验证

该模型以2006年为基准年进行历史检验,跨度考虑2007—2010年。表1中列出了系统模型2008

年、2009年的一些主要参数的模拟结果。与实际系统的历史数据进行比较,结果表明,绝大部分的相对误差小于10%,最大相对误差为19.35%。由此可见,构建的模型所描述的系统行为与实际系统行为基本相符,可以用于未来系统的模拟。

3 模拟方案

3.1 主要变量及初始值

根据南阳市水资源供需系统中各个影响因子的反馈关系,设定模型的主要参数的初始值如表2所示。

表1 2008—2009年南阳市水资源供需系统模拟结果

年份	总人口			城镇人口			第三产业产值			生活需水		
	实际值/ 万人	模拟值/ 万人	误差/ %	实际值/ 万人	模拟值/ 万人	误差/ %	实际值/ 亿元	模拟值/ 亿元	误差/ %	实际值/ 万t	模拟值/ 万t	误差/ %
2008	1096	1090	-0.55	401	403	0.54	435.95	376.70	13.59	38000	34000	10.53
2009	1164	1095	-5.93	403	405	0.57	516.42	424.45	-17.81	35700	34200	-4.20
年份	农业需水量			工业总产值			总产值			总需水量		
	实际值/ 万t	模拟值/ 万t	误差/ %	实际值/ 亿元	模拟值/ 亿元	误差/ %	实际值/ 亿元	模拟值/ 亿元	误差/ %	实际值/ 亿t	模拟值/ 亿t	误差/ %
2008	122700	115600	-5.79	856	735	-14.14	1636.43	1496.65	-8.54	23.71	27.65	16.62
2009	118800	118300	-0.42	896	801	-10.60	1780.04	1615.83	-9.23	24.14	28.81	19.35

表2 南阳市水资源系统主要参数的初始值

总人口/ 万人	城镇人口/ 万人	人口 增长率/%	农业用水 定额/万hm ²	生态环境 用水量/万t	农灌面积/ 万hm ²	农业产值/ 亿元
1166	374	0.5	4.67	1800	119.53	423.62
工业产值/ 亿元	工业万元 产值需水量/t	第三产业 产值/亿元	农村生活用水 定额/(t·人 ⁻¹)	城镇生活 需水定额/t	第三产值万元 需水量/t	工业产值 增长率/%
1248.59	108	694.99	20	40	0.01	13

3.2 敏感性分析

为了找出对水资源供需量平衡影响较大的影响因子,需要对参数进行敏感性分析。分析时每次只改变一个参数,其他所有参数保持不变。以 2006 年为计算基准年,定义敏感性:

$$S = \Delta Y / \Delta X \quad (1)$$

式中: S 为参数敏感性; ΔY 为供需比变化量; ΔX 为参数变化量。

到 2015 年时,影响因子的取值范围及其敏感性见表 3。

表 3 影响因子的取值范围及敏感性

影响因子	取值范围/%	水资源供需比变化范围	敏感性
污水处理投资增长率	0 ~ 15	0.88 ~ 0.94	0.40
城镇生活用水定额变化率	-15 ~ 0	0.88 ~ 0.92	-0.27
工业用水定额变化率	-15 ~ 0	0.82 ~ 1.01	-1.30
水利投资率	2 ~ 5	0.86 ~ 1.33	15.67
农村生活用水定额变化率	0 ~ 15	0.83 ~ 0.92	-0.60
农业需水定额变化率	-10 ~ 0	0.79 ~ 1.00	-2.10

对不同影响因子进行分析发现,污水处理投资增长率、城镇生活用水定额变化率、工业用水定额变化率、水利投资率、农村生活用水定额变化率和农业需水定额变化率等都不同程度地对水资源供需平衡产生影响。敏感性值为负说明增大影响因子的取值会使水资源供需比减小,敏感性值为正则说明增大影响因子取值使得水资源供需比增大。其中水利投资率对水资源供需比的灵敏性为 15.67,对水资源供需系统的影响最为敏感;其次是农业需水定额变化率,其对水资源供需比敏感性为-2.10,说明南阳市农业用水占很大比重,农业节水能够较为有效地减少水资源需求量。污水处理投资增长率和城镇生活用水定额变化率敏感性分别为 0.40 和-0.27,对水资源供需比影响最小,在制定模拟方案时,应充分考虑影响因子的敏感程度,并根据影响因子的敏感程度确定其取值范围。

3.3 方案介绍

以 2012 年为现状年,对南阳市水资源供需平衡情况进行模拟分析,模拟步长为 1 年,模拟时间到

2030 年。根据控制变量的确定原则,提取部分决策变量。通过调整几种变量的组合,确定传统发展模式、强调经济增长的发展模式和经济发展与环境协调的发展模式 3 种发展方案。方案中的参数主要依据影响因子的敏感性分析结果及参考文献来确定^[7]。同时,南水北调工程 2014 年 12 月正式通水,南阳市作为南水北调中线工程河南段的 11 个受水省辖市之一,计划每年分配到城市用水 4.9 亿 m³,在一定程度上缓解了供水压力。本研究中的供需水模拟也相应地从 2015 年开始考虑了调水后供水量增加对南阳市可利用水资源的影响。

方案一:传统发展模式。假定经济发展速度、投资水平及现状用水量增长情况等决策变量维持现状不变,运行模型来分析水资源的供需趋势。

方案二:强调经济增长的发展模式。该发展模式强调经济增长的重要性,相比方案一,在方案二中提高各产业产值增长率,各产业用水量增加;同时提高农村和乡镇生活用水及生态用水增长率。

方案三:经济发展与环境相协调的发展模式。对经济发展速度进行调整,尽量满足居民生活用水(适当提高农村生活用水和减少城市生活用水),提高水利投资率,减少农灌用水定额和工业用水定额,同时增加环境生态用水,确保生态需水。

4 模拟结果分析

依据表 4 确定的参数值运行南阳市水资源供需系统模型,得到了南阳市 3 种发展方案下的水资源供需比(图 2)。在 3 种假定的发展方案下,水资源供需比都不大于 1(方案三中,至 2030 年水资源供需比达到 1),即水资源供小于需,且第一、第二种方案下水资源供需比在持续减小。方案一中,经济发展、投资水平及用水量维持现状时,水资源供需比年均减少 0.6%,追求经济发展的方案二比方案一中水资源供需比下降得更快,年均减少 1.28%。如果按照现有发展模式发展,至 2014 年底,全市将缺水约 5 亿 t,且地下水超采严重,将给南阳市生态环境带来严重影响。到 2030 年底,南阳市水资源供需比为 0.67,水资源短缺形势非常严峻。相比传统发展模式,强调经济增长的发展模式提高了经济增长速度,尽管在水利投资和生态环境方面也加大了投入,

表 4 3 种方案下的模型主要参数及取值

方案	工业用水定额/ (t·万元 ⁻¹)	农业用水定额/ (t·万元 ⁻¹)	投资 百分比/%	工业用水定额 增长率/%	农业用水定 额增长率/%	农村用水定额 增长率/%	城镇用水定额 增长率/%	工业产值 增长率/%	生态环境用水 增长率/%
方案一	100.0	68.0	1.0	-5.0	-5.0	0.0	0.0	13.0	2.0
方案二	100.0	68.0	2.0	-5.0	-5.0	5.0	5.0	15.0	3.0
方案三	95.0	65.0	3.0	-7.0	-7.0	5.0	-5.0	12.0	4.0

注:投资百分比是指节水投资在工业生产总值中所占的比例。

但水资源紧张形势依然加剧,说明经济增长速率对水资源供需敏感性较强。到2030年,水资源供需比仅为0.6,城市将面临严重的供水困难,威胁人类生存和社会经济及生态环境的健康发展,所以一味追求经济增长的发展模式不可持续,是必须要摒弃的经济发展方式。“经济发展与环境相协调的发展模式”不单纯追求经济的增长,将经济增长速率放缓;提倡在尽量满足居民生活用水的同时注意节水,减少工农业用水定额和城镇居民用水量,适当增加农村居民生活用水量;依靠增加科技投入和节水基础设施建设来减少工农业用水需求;同时加大对生态环境的重视程度,保障生态需水供给,增加生态环境用水量。在3种方案中,经济发展与环境相协调的模式的水资源紧张程度最小,且水资源短缺形势会逐步缓解,至2030年,水资源供需或可达到平衡。由此说明,加大投入,减少工农业生产用水定额,减少生活用水,建设节水型社会是实现水资源供需平衡的重要保障。

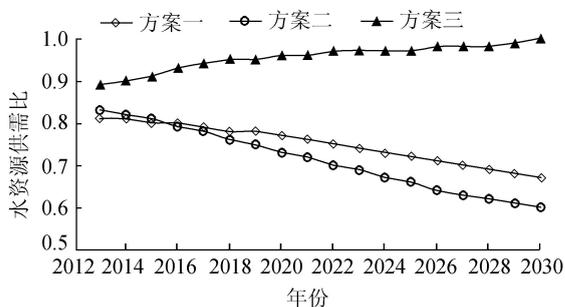


图2 3种模拟方案下的南阳市水资源供需比

5 结语

本文运用系统动力学方法对南阳市水资源供需系统进行了模拟,结果表明模拟期内南阳市水资源供需矛盾十分突出。为实现南阳市水资源供需平衡,缓解水资源危机,维持社会经济的健康发展,必须转变现有落后的经济发展方式,提高各行业用水效率,加大节水投资,构建节水型产业体系,提高全民节水意识,加强水利基础设施建设和重要水源工程建设,加快水资源循环利用,以保证水资源供需平衡和实现水资源可持续发展^[8-9]。由于水资源供需系统的反馈关系复杂,要提高模拟精度,还需要对影响水资源供需系统的社会经济、资源和环境子系统之间的相互关系作更加深入的研究。

参考文献:

[1] 李静芝,朱翔,李景保,等. 基于系统动力学的湖南省水资源供需系统模拟研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(1): 46-52. (LI Jingzhi, ZHU Xiang, LI Jingbao, et al. Simulation of water resources supply and

demand system in Hunan Province based on system dynamics[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(1): 46-52. (in Chinese))

[2] CHENG Li. System dynamics model of Suzhou water resources carrying capacity and its application[J]. Water Science and Engineering, 2010, 3(2): 144-155.

[3] 石智雷,谭宇. 水资源与区域社会经济协调发展分析:以河南省南阳市为例[J]. 湖北民族学院学报:哲学社会科学版, 2011, 29(1): 138-142. (SHI Zhilei, TAN Yu. Coordinate development between water resources and regional social economy: take Nanyang in Henan Province as an example [J]. Journal of Hubei University for Nationalities: Philosophy and Social Sciences, 2011, 29(1):138-142. (in Chinese))

[4] LAN J Y. Application of AHP in environmental pollution prevention planning [J]. Meteorological and Environmental Research, 2010, 1(2): 69-75.

[5] 曹邦卿,张静,杨俊平,等. 南阳市水的健康循环与水资源优化配置研究[J]. 地下水, 2008, 30(5): 62-66. (CAO Bangqing, ZHANG Jing, YANG Junping, et al. Research on water health circulation and water resources optimization disposition in Nanyang City [J]. Ground Water, 2008, 30(5): 62-66. (in Chinese))

[6] 徐金鹏. 南阳市水资源优化配置[D]. 武汉:武汉大学, 2004.

[7] 陈南祥,王延辉. 基于系统动力学的河南省水资源可持续利用研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(4): 34-37. (CHEN Nanxiang, WANG Yanhui. The water resource sustainable utilization of Henan Province based on system dynamics[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(4): 34-37. (in Chinese))

[8] 常进,王卫平,陈星,等. K-LPPC模型在水资源可持续利用评价中的应用[J]. 水资源保护, 2013, 29(4): 50-53. (CHANG Jin, WANG Weiping, CHEN Xing, et al. Application of K-LPPC model to evaluation of sustainable utilization of water resources [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(4): 50-53. (in Chinese))

[9] 杜荣江,方玉霞. 提高我国水资源利用效率的措施与对策[J]. 水资源保护, 2010, 26(3): 91-93. (DU Rongjiang, FANG Yuxia. Measures and countermeasures for improving water resources utilization efficiency in China [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(3): 91-93. (in Chinese))

(收稿日期:2015-03-25 编辑:徐娟)