

基于 STELLA 的安徽省水资源供需预测研究

孙炼, 李春晖, 贾晓丽, 王烜, 蔡宴朋

(北京师范大学 环境学院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要: 利用系统动力学软件 STELLA 建立由水资源供给和居民、工业、农业、生态环境、公共需水等子系统组成的水资源供需系统模型,对安徽省 2012-2030 年水资源供需情势进行模拟分析,模拟效果较好。参数灵敏度分析表明,模型结果对工业增加值增长率、万元工业增加值用水量、农田有效灌溉系数的变化最为敏感。基于此提出应对水资源短缺问题的 3 种综合调控方案(方案 I,方案 II 和方案 III)。结果表明:与现有发展模式相比,方案 I 和方案 II 延迟了水资源短缺的时间;以经济平稳增长、生态环境友好为目标的方案 III 则会有效地解决未来水资源供需矛盾。最后在各种模式的基础上提出了应对水资源问题措施,为缓解安徽省水资源矛盾、优化水资源配置提供参考。

关键词: 水资源; 水资源供需预测; STELLA; 水资源供需系统模型; 安徽省

中图分类号:TV213

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2015)02-0051-07

Study on supply and demand prediction of water resources in Anhui based on STELLA

SUN Lian, LI Chunhui, JIA Xiaoli, WANG Xuan, CAI Yanpeng

(Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, School of
Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The paper built the supply and demand model of water resources which comprised the subsystems such as water resources supply, domestic, industry, agriculture, ecology and environment, public water demand by using system dynamic software STELLA to simulate the supply and demand situation of water resources in Anhui from 2012 to 2030. The simulation result is good. The sensitivity analysis of parameters shows that the model is robust to the change in model parameters related to the growth rate of industrial added value, water demand of industrial added value per 10,000 Yuan and effective irrigation coefficient of farmland. The three different scenarios (scenario I, scenario II, and scenario III) of water shortage conditions were proposed. The scenario I and II delayed the time of water resources shortage compared with current development mode. While scenario III can solve the contradiction of water shortage in the coming 18 years by pursuing the aim of stable economic growth and ecology - friendly. In the end, the paper put forward some measures to deal with the problem of water resources which can provide reference for alleviating the contradiction of water resources shortage and the optimum allocation of water resources in Anhui.

Key words: water resources; prediction of supply and demand of water resources; STELLA; supply and demand model of water resources; Anhui Province

近年来安徽省经济社会保持高速发展,对水资源的需求与日俱增,部分地区存在地下水超采、城市及农业水资源短缺局势。采用科学的方法预测安徽省未来水资源供需情况,对于促进安徽省社会经济可持续发展具有重要的现实意义。目前对安徽省水资源

系统的动态研究和水资源-经济社会-生态综合系统的研究不足;运用主成分分析、层次分析法、模糊综合评价等方法研究安徽水资源承载力现状,难以全面反映未来的水资源供给状况。系统动力学(SD)是基于系统结构理论的方法,是系统科学和管理科学的一

收稿日期:2014-11-24; 修回日期:2014-12-21

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(973)(2010CB951104)

作者简介:孙炼(1990-),男,安徽祁门人,硕士研究生,主要从事水资源规划与管理方面研究。

通讯作者:李春晖(1976-),男,安徽临泉人,副教授,主要从事水资源评价与管理。

个重要分支^[1],可以较好地把握系统的复杂、非线性反馈关系^[2]。与传统模拟和优化模型相比,SD最显著的特点是所阐释研究系统的内生结构,探讨组成系统的元素如何相互连接、相互影响^[3]。水资源系统具有错综复杂的因果关系,是一个受到经济社会影响较大的复杂系统,一些研究者已经注意到了SD方法在水资源领域的适用性^[4-7]。

STELLA 是基于SD环境开发的应用软件,因具备强大的建模环境和简便的操作方式备受国外推崇^[8],应用领域广泛。Simonovic等^[9]利用STELLA II建立的目标导向模型,分析了其在埃及尼罗河水资源规划中的潜在优势。Sánchez-Román等^[10]建立基于STELLA平台的动力学系统仿真模型,对巴西 Piracicaba, Capivari 和 Jundiaí 河流域 2004-2054 年的水资源承载力进行模拟和评估。Assarf^[11]利用STELLA的系统动力环境建立基于经济学原理的地下水资源管理模型,探索中东和北非地区不同的政策制定和管理者及不同需水部门的水资源管理政策。Dawadi等^[12]将气候变化和人口增长与STELLA模型相结合,研究未来20年美国Las Vegas Valley地区的水资源供需变化。国内在水资源管理研究方面应用此软件较少。

本文拟建立统筹安徽省水资源供需的工业、农业、居民生活、生态环境、公共需水等子系统的STELLA模型,利用该模型模拟安徽省2012-2030年的水资源供需系统,分析影响安徽省水资源供需的敏感参数,以及考虑引江济淮等工程供水后的安徽省水资源供需情势。在此基础上,提出相应的方案,为缓解安徽省水资源短缺问题、优化配置水资源提供参考。

1 研究区概况

安徽省地处华东腹地,长江、淮河分别横贯南北,为暖温带与亚热带的过渡区,近5年平均年降水量1 122 mm。2012年安徽省常住人口5 988万人,城镇人口比例为46.5%,人均GDP 2.88万元。安徽省水资源时空分布不均,南多北少、山区多平原少;多年平均水资源量711亿m³,其中地表水662亿m³,地下水175亿m³,地表、地下重复量126m³;人均水资源量1 125 m³,其中淮北六市人均水资源占有量仅400 m³,远低于世界公认缺水警戒线的下限(1 000 m³)。2012年安徽省有效灌溉面积359万hm²,全省供用水量288.56亿m³。总体上安徽省水资源供需存在矛盾,生态环境和农业用水难

以保证,用水效率较低,局部水环境问题依然严峻。

2 模型建立

建立系统动力学模型需要4个基本构造块:栈(stock)、流(flow)、转换器(converter)和连接器(connector)。栈用方框表示,代表事物的积累,存储进入和流出栈的物质;流用带阀门的箭头表示,用来描述系统中的活动,连接到栈上的流会引起栈中存量的增加或减少,流上的箭头表示物质或非物质正向流动方向;转换器用圆圈表示,用以存储常量,包括存储系统外部输入的定义、计算代数关系及作为图表函数,并把它传输到其他模块中为其他变量所用;连接器用一条带有箭头的线段或虚线表示,作用是连接模型中的元素,和流不同,连接器传送的是信息^[7,13]。本文以isee Systems公司(2006)开发的9.0.1版本STELLA作为模型建立的平台。

水资源供需系统模型由水资源供给系统和水资源需求系统组成。参考水资源公报的水资源需求部门,水资源需求由居民需水、工业需水、农业需水、公共需水及生态环境需水5个子系统组成;水资源供给系统由地表供水、地下供水和再生水利用3部分组成。如图1所示,各子系统通过水资源的供给与利用关系相互联系,相互影响,采用水资源短缺率(WSD)定量描述水资源的短缺程度,表达式见式(1)~(3)。

$$TS = SS + GS + RS \quad (1)$$

$$TW = DW + IW + AW + PW + EW \quad (2)$$

$$WSD = \frac{TW - TS}{TW} \times 100\% \quad (3)$$

式中:TS、SS、GS和RS分别为总供水量、地表水供水量、地下水供水量和再生水利用量;TW、DW、IW、AW、PW和EW分别为总需水量、居民需水量、工业需水量、农业需水量、公共需水量和生态环境需水量;WSD为水资源短缺率。

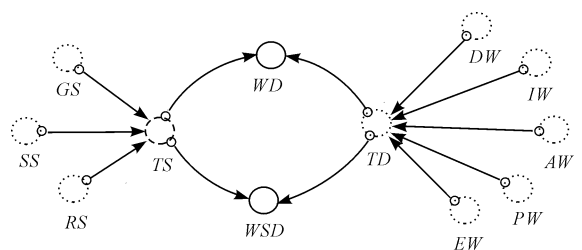


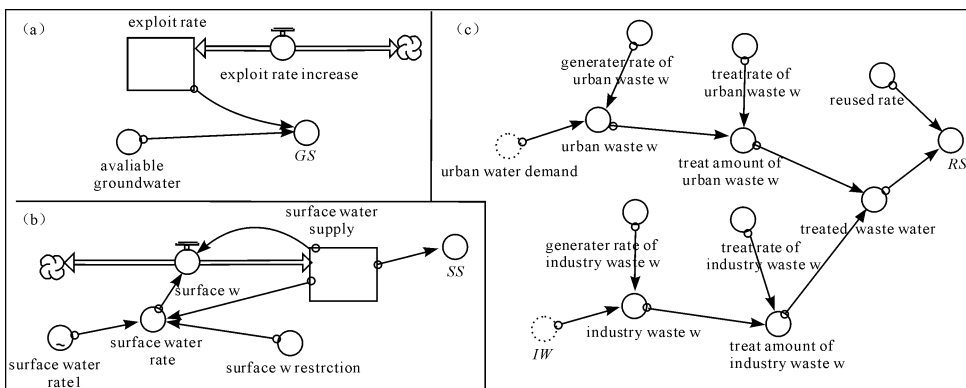
图1 水资源系统供需组成

2.1 水资源供给系统

水资源供给由地下水供水、地表水供水、工业及

城镇居民生活再生水利用 3 部分组成。从 2005 - 2012 年安徽省地下水开采逐渐增加,年均增长约 11.2%,图 2(a)中地下水开采率通过该栈和输入该栈的开采率的年增长率计算。地下水开采率和可开采地下水量(多年平均为 159 亿 m^3)之积为地下水供水量。(b)中转换器表示受安徽省地表水资源总量的限制,地表水供水达到 300 亿 m^3 时,其地表水

增长率将受到抑制而变为 0。2025 年后安徽省“引江济淮”工程将建成并投入使用,预计新增地表供水量 30 亿 m^3 。再生水利用部分(见图 2(c)),利用量与城市或工业废水的产生量、处理量有关。废水产生后,经过处理后的城市生活废水回用水量与处理后工业废水回用水量之和为总处理后废水量,其与废水再利用率之积为再生水利用量。



(a) 中 exploit rate: 地下水开采率; exploit rate increase: 地下水开采率年增长率; available groundwater: 可开采地下水量; (b) 中 surface water supply: 地表水资源供给量; surface w: 年地表水资源变化量; surface water rate: 地表水增长率; surface water rate1: 地表水增长率表函数; surface w restriction: 地表水资源总量限制; (c) 中 generate rate of urban waste w, generate rate of industry waste w 分别表示城市生活、工业废水产生率; urban waste w, industry waste w 分别表示城市生活、工业废水产生量; treat rate of urban waste w, treat rate of industry waste w 分别表示城市生活、工业废水处理率; treat amount of urban waste w, treat amount of industry waste w 分别表示处理后的城市生活、工业废水量; treated waste water 表示处理后废水量; reuse rate 表示废水再利用率。

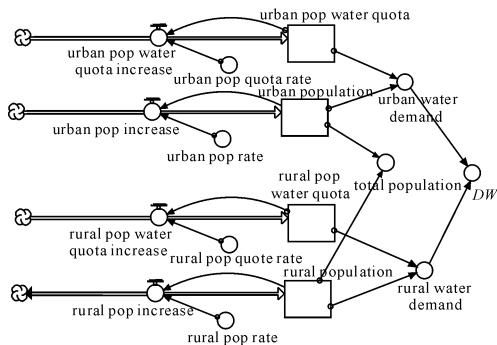
图 2 水资源供给系统

2.2 水资源需求系统

(1) 居民生活需水。居民生活需水(DW)由城镇居民生活需水和农村生活需水两部分之和构成(图 3),各部分为相应的人口数和人均需水定额之积。城市或农村的人口数和人均需水定额(图 3 中的 4 个栈)均通过统计数据计算出相应的年均增长率(图 3 中与流相连接的转换器)在 STELLA 中实现。安徽省是人口流动大省,人口数据采用常住人口,分为城镇常住人口和乡村常住人口。

地的亩均需水定额和面积年际变化较大,其模型中数值通过表函数实现。安徽省其他农业需水主要由林、牧、渔、畜的需水组成,总需水量相较于水浇地、水田、菜地的需水量小,林、牧、渔、畜四部分需水量合并处理。

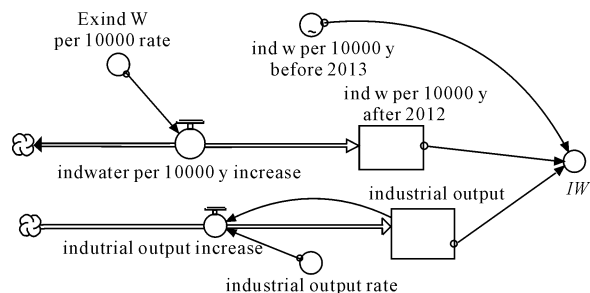
(2) 工业需水。以工业增加值和万元工业增加值(ind water per 10000 y after 2012)用水量作为状态变量,两状态变量之积为工业需水量(图 4)。验证期万元工业增加值用水量(ind w per 10000 y before 2013)的年际变化较大,因此其数值通过表函数实现。预测期万元工业增加值用水量根据《全国水资源总体规划》^[14]设定 2030 年基本目标值(EX ind w per 10000 yuan)。假定预测期要保持同样的工业发展速度,取增速为 13%。



图中各英文名称含义依次如下: urban pop water quota increase, rural pop water quota increase 分别表示城市、农村人均需水定额增加值; urban pop quota rate, rural pop quota rate 分别表示城市、农村人均需水定额增长率; urban pop water quota, rural pop water quota 分别表示城市、农村人均需水定额; urban pop increase, rural pop increase 分别表示城市、农村人口增加量; urban pop rate, rural pop rate 分别表示城市、农村人口增长率; urban population, rural population 分别表示城市、农村人口数; urban water demand, rural water demand 分别表示城市、农村居民生活需水量; total population 表示总人口。

图 3 居民生活需水

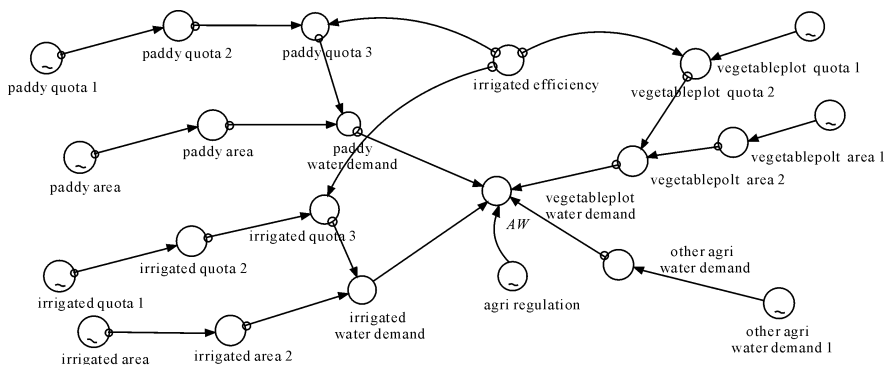
(3) 农业需水。农业需水(AW)由水浇地灌溉需水、水田灌溉需水、菜田灌溉需水及其他农业需水四部分组成(图 5)。除其他农业需水外,灌溉需水以亩均用水定额和土地面积计算。验证期各类型土



图中各英文名称含义依次如下:EX ind w per 10000 yuan: 预测期万元工业增加值用水量;indwater per 10000 y increase: 工业用水增加量;ind w per 10000 y after 2013;预测期万元工业增加值;ind w per 10000 y before 2013: 万元工业增加值表函数;Industrial output increase 工业增加值增加量; Industrial output rate: 工业增加值增长率;industrial output: 工业增加值

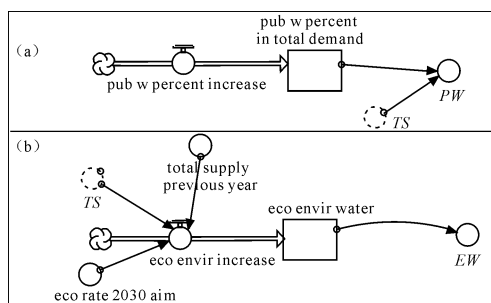
图4 工业需水

灌溉水利用效率会影响农业需水量,效率越高,有限的水资源将会得到更为充分的利用,需水量则越少。灌溉水利用效率的影响在模型中等效转换成



图中各英文名称含义依次如下:paddy quota1, irrigated quota1, vegetableplot quota1 分别表示水浇地、水田、菜田需水定额表函数;paddy quota2, irrigated quota2, vegetableplot quota2 分别表示的水浇地、水田、菜田亩均需水定额;paddy quota3, irrigated quota3, vegetableplot quota3 分别表示灌溉系数调节下的水浇地、水田、菜田需水定额;paddy area, irrigated area, vegetableplot area 分别表示水浇地、水田、菜田面积表函数;paddy area2, irrigated area2, vegetableplot area2 分别表示水浇地、水田、菜田面积;paddy water demand, irrigated water demand, vegetableplot water demand, other agri water demand 分别表示水浇地、水田、菜田、其他农业需水量; other agri water demand1;其他农业需水量表函数;irrigated efficiency 表示灌溉效率;agri regulation:农业需水调节函数。

图5 农业需水



图中各英文名称含义依次如下:(a)中 pub w percent increase: 公共用水占总用水比例增长率;pub w percent in total demand:公共用水占总用水比例; (b)中 total supply previous year:上一年度总供水量;eco rate 2030 aim:新增供水中生态用水比例 2030 年目标值;eco envir water: 生态环境需水量。

图6 生态环境需水和公共需水

作用于亩均用水定额上的强制函数,即若灌溉水利用效率增加 1%,则亩均水量相应的减少 1%。

(4) 生态环境和公共需水。虽然 2012 年前的生态环境用水量 (EW) 占总用水量的比重不大,但是随着国家对生态环境领域的重视,生态环境需水将是总需水量的重要部分。2011 年制定的《全国水资源综合规划》^[14] 提出到 2030 年新增供水中的 40% 将用于生态环境领域,而 2012 年安徽省这一比例仅为 8%。如图 6 所示,以新增供水中生态环境用水比例 (eco rate 2030 aim) 作为 2030 年目标,通过新增供水量的计算实现生态环境需水量的模拟。图 6(a) 中总供水 TS 与上一年度总供水 (total supply previous year) 之差表示新增供水。

公共需水 (PW) 部门涉及行政事业单位和各种服务业,部门庞杂,数据获取困难,本文据《安徽省水资源公报》的计算,以公共用水占总供水比例计算公共需水量 (图 6(b))。

2.3 模型验证

本文以安徽省行政区边界为模型空间边界,模拟时段为 2005 - 2030 年,时间步长为 1 a。以 2005 - 2012 年的《安徽统计年鉴》、《安徽省水资源公报》为验证期主要经济社会发展数据、水资源供用数据;以 2012 年后安徽省“十二五”规划、全国水资源规划等为预测期主要数据。

利用 2005 - 2012 年数据,对安徽省总供水量、用水量,及居民、工业、农业、生态环境、公共等用水部门的用水量进行验证。安徽省 2005 - 2012 年水资源总供给量、总需水量的实际值和模拟值和相对误差对比如下 (表 1)。

表 1 安徽省 2005 - 2012 年水资源总供需求

实际值和模拟值的误差

年份	实际供用	供水模拟	供水相	用水模拟	用水相
	水量/ 10^8 m^3	值/ 10^8 m^3	对误差/%	值/ 10^8 m^3	对误差/%
2005	208.30	207.96	0.16	197.39	5.24
2006	241.87	243.63	0.73	234.92	2.87
2007	232.05	234.35	0.99	224.08	3.43
2008	266.36	266.88	0.20	260.84	2.07
2009	291.86	291.77	0.03	288.32	1.21
2010	292.50	287.79	1.61	294.84	0.80
2011	294.63	291.54	1.05	292.30	0.79
2012	288.56	289.63	0.37	276.80	4.08

由表 1 可以看出,模型供水、用水模拟的相对误差都小于 6%,模拟效果较好。安徽省 2005 - 2012 年各用水部门的实际值和模拟值对比如表 2 所示。

表 2 安徽省 2005 - 2012 年各部门用水

实际值和模拟值的误差 $10^8 \text{ m}^3, \%$

年份		居民	工业	农业	生态环	公共
		需水	需水	需水	境需水	需水
2005	实际值	19.89	57.72	116.21	1.37	2.84
	模拟值	19.60	57.72	115.86	1.37	2.84
	误差	1.46	0	0.30	0	0
2006	实际值	19.11	79.64	138.27	1.44	2.99
	模拟值	20.21	71.81	138.33	1.37	3.2
	误差	5.76	9.83	0.04	4.86	7.02
2007	实际值	20.35	83.91	122.84	1.60	3.45
	模拟值	20.86	74.85	123.32	1.47	3.58
	误差	2.51	10.80	0.39	8.13	3.77
2008	实际值	21.52	85.4	154.15	1.63	3.66
	模拟值	21.54	79.24	154.38	1.68	3.99
	误差	0.09	7.21	0.15	3.07	9.02
2009	实际值	22.65	93.66	170.43	1.95	4.17
	模拟值	22.25	90.05	169.57	2.01	4.43
	误差	1.77	3.85	0.50	3.08	6.24
2010	实际值	23.40	94.32	167.54	2.3	4.91
	模拟值	22.99	96.4	168.08	2.47	4.91
	误差	1.75	2.21	0.32	7.39	0
2011	实际值	23.86	90.62	169.24	3.96	5.27
	模拟值	23.77	89.52	170.53	3.07	5.41
	误差	0.38	1.21	0.76	22.47	2.66
2012	实际值	23.96	97.02	154.88	3.78	7.13
	模拟值	24.60	87.93	154.53	3.80	5.94
	误差	2.67	9.37	0.23	0.53	16.69

由表 2 可以看出,只有 2011 年生态环境用水和 2012 年城镇公共用水的相对误差较大。这是因为生态环境用水、城镇公共用水在模型中通过占年新增供水、总供水的比例计算,而 2011 年的生态环境用水和城镇公共用水明显高于往年值,导致误差偏大。除此之外,居民用水、工业用水、农业用水、生态环境用水、公共用水的相对误差一般都小于 10%,模拟效果较好,该模型可以用于安徽省水资源供需的预测。

2.4 灵敏度分析

为确定对 2012 - 2030 年安徽省水资源供需量影响较大的影响因子,有必要进行模型灵敏度分析。参考文献[15]选择农田有效灌溉系数、万元工业增加值用水量、居民生活用水定额增速、污水回用率等 10 个状态变量作为灵敏度分析的参数,以水资源短缺率作为灵敏度的响应目标,采用公式(4)分析。

$$S_{\theta}^2 = \frac{\Delta x}{x^*} \bigg/ \frac{\Delta \theta}{\theta_0} \quad (4)$$

式中:灵敏度 S_{θ}^2 表示在 $\theta = \theta_0$ 附近,状态变量 x 相对于原值 x^* 的变化率和参数 θ 相对于 θ_0 的变化率的比值。若某参数的灵敏度大于 1,表示水资源供需情况对该参数较为敏感,绝对值越大越敏感;反之灵敏度小于 1,表示较不敏感,绝对值越小越不敏感,表 3 是灵敏度分析的结果。

表 3 模型主要参数灵敏度

参 数	灵敏度
农田有效灌溉系数	-1.31
万元工业增加值用水量	6.74
万元工业增加值增速	4.62
城镇居民生活用水定额增速	0.12
乡村居民生活用水定额增速	0.04
生态用水占新增供水比例	0.19
公共需水增长率	0.08
工业废水处理率	-0.01
城市生活废水处理率	-0.04
污水回用率	-0.05

由表 3 可知,水资源短缺率对万元工业增加值用水量的灵敏度最大,万元工业增加值增速次之,农田有效灌溉系数再次,其他的参数灵敏度绝对值都小于 1,说明万元工业增加值用水量、万元工业增加值增速,农田有效灌溉系数的变动对安徽省水资源供需形势影响较大。另一方面,生态用水占新增供水比例的敏感性较低,说明如果增加一定数量的生

态用水并不会显著加剧安徽省的水资源供需矛盾。

3 模拟方案与结果

基于敏感性分析结果,重点考虑工业增加值增长率、万元工业增加值用水量、农田有效灌溉系数,兼顾城镇和乡村的人均需水定额增长率、新增供水中生态环境用水所占比例等,基于2005-2012年的情况,设置预测期2013-2030年3种水资源供需方案进行对比分析(表4),寻求符合未来经济社会发展趋势条件下的解决安徽省水资源短缺问题的最佳对策。

方案I:经济保持较快增长,兼顾生态环境效益。经济继续保持较快速度增长(13%),但已明显

低于2005-2012年26.8%的平均增速,城乡居民需水定额增速不变;按规划要求,万元工业增加值需水量分别降至2020、2030年的65、40 m³;提高灌溉效率系数,污染治理、生态环境保护基本达到相关规划的目标。

方案II:经济平稳增长,生态环境改善。经济增速较方案I减缓一个百分点,工业耗能与方案I相同,居民节水能力、农业有效灌溉率进一步提高,污染治理、生态环境保护超过目标,但是超过不多。

方案III:经济平稳增长,生态环境友好。经济增速与方案II相同,单位工业产值的耗水量进一步降低,农业有效灌溉率较高,注重污染治理、生态环境保护目标的实现。

表4 水资源供需方案主要参数设置

参数	2012年	预测期(2013-2030年)			
		方案I	方案II	方案III	
万元工业增加值需水量/m ³	2020年	65	65	60	
	2030年	40	40	35	
工业增加值增速/%	2012-2020	12	11	11	
	2020-2030	11	10	10	
灌溉效率系数	0.45	0.60	0.63	0.65	
城镇居民需水定额	量/(L·d ⁻¹)	138.3	192	186	179
	增长率/%	1.85	1.85	1.65	1.45
乡村居民需水定额	量/(L·d ⁻¹)	84.5	167	156	145
	增长率/%	3.85	3.85	3.45	3.05
生态环境用水占新增用水比例/%	8	40	45	50	

注:预测期中,城镇居民需水定额、乡村居民需水定额、生态环境用水占新增用水比例数值为2030年目标值。

若不采取任何变化措施,如果按照2005-2012年的发展模式发展,模型模拟结果显示安徽省在2017年即出现水资源短缺。用STELLA分别对3个方案进行模拟,各方案水资源短缺率的变化结果如图7所示。

方案III在整个预测期都不会出现水资源短缺,按该方案发展,到2030年安徽省总需水量为406亿m³,总供水量为413亿m³,农业需水呈下降趋势,其余部门需水量呈上升趋势,生态环境需水量增长较快(图8)。

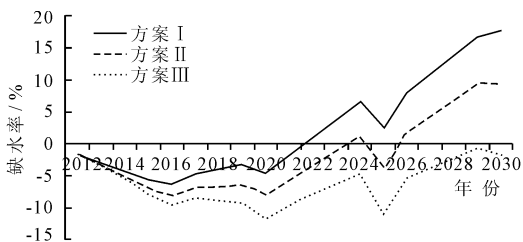


图7 3种方案水资源短缺程度

方案I的多数调控参数是按照相关规划确定的,是最低要求;方案II和方案III在此基础上对工业、农业等相关发展提出了更高的要求。图7中方案I、II分别于2022、2026年开始出现水资源短缺。

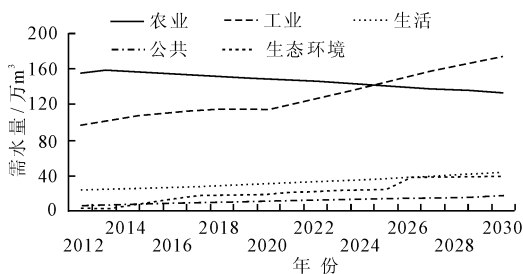


图8 方案III各需水部门需水量的变化

4 结语

本文利用STELLA软件建立安徽省水资源供需

模型,分析了影响安徽省水资源供需状况的敏感因素,对2012-2030年的安徽省水资源供需情况设置了3种发展方案,对各发展方案进行了模拟,结果显示未来安徽省经济社会面临较为严峻的水资源短缺问题。为有效应对安徽省未来近20年的水资源危机,可从以下几方面考虑:

(1)在影响水资源供需的诸多因素中,工业增加值增长率、万元工业增加值用水量、农田有效灌溉系数对水资源短缺程度最为敏感,今后应以此为着眼点解决安徽省的水资源短缺问题。新增供水中生态环境用水占40%的目标是全国水资源规划的要求,通过灵敏度分析可以知道,增加这一比例不会对水资源的供需产生较大压力。

(2)要保证至2030年安徽省有充足的水资源支撑经济发展,应适当降低经济发展速度,更加重视资源的节约和生态环境的保护,综合调控水资源系统。按照方案Ⅲ进行安徽省水资源系统的调控,统筹安排生产、生活和生态环境需水,可防止2030年前安徽省出现水资源短缺局面,实现经济发展和环境保护的双赢。

(3)安徽作为传统农业大省,近些年工业迅速发展,今后随着中部崛起、长江经济带等战略的实施,届时安徽省第一用水大户将是工业。按照方案Ⅲ的模拟,工业、农业需水占总需水的比例将分别由2012年的33%,42%转变为2030年的54%,34%。因此,控制水资源消耗总量应重点从控制工业需水,加大节水技术的应用、发展低耗水工业企业,提高工业废水处理率、增加工业废水回用力度,减缓水资源总量对整个经济社会发展的制约。

(4)水资源系统具有复杂性和不确定性,要想进一步揭示未来情景下地区水资源变化,需要充分考虑气候、人口、科技、政策、经济结构等因素的变化对安徽省水资源的数量和质量产生的影响。

参考文献:

- [1] 钟永光,贾晓菁,钱颖,等. 系统动力学(第二版)[M]. 北京:科学出版社,2013.
- [2] 赵军凯,张爱社. 水资源承载力的研究进展与趋势展望[J]. 水文,2006,26(6):47-50+54.
- [3] Simonovic S P. World water dynamics: global modeling of

water resources[J]. Journal of Environmental Management, 2002,66(3):249-267.

- [4] Zarghami M, Akbariyeh S. System dynamics modeling for complex urban water systems: Application to the city of Tabriz, Iran[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2012,60:99-106.
- [5] TAN Yayi, WANG Xuan. An early warning system of water shortage in basins based on SD Model[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010,2:399-406.
- [6] Rehan R, Knight M A, Haas C T, et al. Application of system dynamics for developing financially self-sustaining management policies for water and wastewater systems[J]. Water research, 2011,45(16):4737-4750.
- [7] Sušnik J, Vamvakieridou - Lyroudia L S, Savič D A, et al. Integrated system dynamics modelling for water scarcity assessment: case study of the Kairouan region[J]. Science of The Total Environment, 2012,440:290-306.
- [8] Costanza R, Gottlieb S. Modelling ecological and economic systems with STELLA: PartII[J]. Ecological Modelling, 1998,112(2):81-84.
- [9] Simonovic S P, Fahmy H, EL - Shorbagy A. The use of object-oriented modeling for water resources planning in Egypt[J]. Water Resources Management, 1997,11(4):243-261.
- [10] Sánchez - Román R M, Folegatti M V, Guadalupe A M. Water resources assessment at piracicaba, Capivari and Jundiá River Basins: A dynamic systems approach[J]. Water Resources Management, 2010,24(4):761-773.
- [11] Assaf H. A hydro-economic model for managing groundwater resources in semi-arid regions. [C]//. 5th International Conference on Sustainable Water Resources Management. Southampton: Wit Press, 2009.
- [12] Dawadi S, Ahmad S. Evaluating the impact of demand-side management on water resources under changing climatic conditions and increasing population[J]. Journal of Environmental Management, 2013,114:261-275.
- [13] LEBANON N H. isee Systems [2006] [2014-01-12]. STELLA. <http://www.iseesystems.com>; isee Systems, 2006.
- [14] 国家发改委,水利部.《全国水资源综合规划》概要[J]. 中国水利. 2011(23):33-35.
- [15] 王友贞. 区域水资源承载力评价研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.