

基于 STELLA 的水资源供需系统模拟和预警分析 ——以山东省为例

程静, 龚琼, 杨晓华

(北京师范大学 环境学院 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 科学预测区域水资源供需变化并提出合理的应对方案对区域可持续发展有重要意义,但现有研究多未合理考虑区域的生态需水量。本文以山东省水资源供需系统为研究对象,考虑城市生态建设及河流生态需水,利用系统动力学软件 STELLA 模拟预测了山东省 2015-2030 年水资源供需状况的动态变化,利用支撑度构建水资源短缺预警等级,并进行预警分析;基于敏感性分析结果从重视经济、节水、开源、综合协调 4 个角度提出发展应对方案。结果表明:当前山东省生态缺水严重,至 2030 年水资源供需差额将达 $90 \times 10^8 \text{ m}^3$,并有 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 会影响到当地生产生活,全省将处于 III 级缺水状态;重视经济和节水型方案均不利于山东省可持续发展,而综合协调型方案将建立兼顾社会经济与生态环境的水资源利用模式,为缓解水资源供需矛盾、优化水资源配置提供科学依据,对水生态文明建设也具有重要意义。

关键词: 水资源供需系统;生态需水;预警;STELLA 模型;山东省

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2016)05-0075-07

Simulation and warning analysis of supply and demand system of water resources based on STELLA: A case study of Shandong Province

CHENG Jing, GONG Qiong, YANG Xiaohua

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The scientific prediction of supply and demand change of water resources is very important for the regional sustainable development, but most of researches can't consider the demand of ecological water. The paper took the supply and demand system of water resources in Shandong as object, considered the ecological construction and the demand of ecological water, and used STELLA dynamic software to predict the dynamic change of supply - demand situation of water resources, and utilized support degree to build the warning degree of water resources shortage. Based on the sensitive analysis, the paper proposed countermeasure scheme from four aspects such as economic development, water saving, water project and coordinative development. The results show that the shortage of ecological water in Shandong province is severe. In 2030, the difference of water supply and demand will reach 9 billion m^3 among them one billion will affect local production and human activities. The great attention to economy and water saving scheme go against the sustainable development, while coordinative mode can better balance the use mode of water resources of social economy and ecological environment, and provide scientific base for relaxing the contradiction of water resources supply and demand and optimizing the allocation of water resources, and has important significant for the construction of ecological civilization.

Key words: water supply and demand system; ecological water demand; warning; STELLA model; Shandong Province

收稿日期:2016-05-13; 修回日期:2016-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51379013、41530635)

作者简介:程静(1994-),女,河北深州人,在读本科生,研究方向为水资源规划与管理。

通讯作者:杨晓华(1966-),女,福建漳平人,教授,博导,研究方向为水资源水环境模拟。

1 研究背景

水资源供需平衡是保障生态系统稳定性和人类社会经济可持续发展的关键因素^[1]。作为重度缺水地区,山东省的水资源供需现状严重失衡,水资源短缺已成为当地国民经济和社会发展的主要瓶颈^[2-3]。因此,采用科学方法模拟、预测山东省水资源未来的发展变化状况并提出合理的应对方案,建立相应预警系统,对科学进行水资源规划、实现山东省的可持续发展具有重要意义。由于水资源供需系统包含社会经济、人口、资源、环境、生态等诸多因素^[4],因素间具有极强的制约性和动态性^[5],因此运用主成份分析、模糊综合评价及多目标模型等方法分析时往往存在主观性强、动态性差等缺陷,难以客观全面反映未来水资源供需状况^[6]。系统动力学方法以反馈控制理论为基础,对非线性、多变量、多重反馈和复杂时变等问题的处理有显著优势^[7],广泛应用于工业^[8]、农业^[9]、环境^[10]等诸多领域。但现有的相关研究缺乏对水资源供需状况的定量化预警分析;且基于山东全省具体省情的水资源系统动力学研究不足,鲜见的研究案例^[11]中又对生态需水模块做了极大的简化,降低了结果的科学性和可信度。

基于上述背景,本文拟立足于山东省基本省情,在生态需水情境下分析构建全省的水资源供需框架;通过 STELLA 软件建立山东省水资源供需系统的系统动力学模型,并优化生态需水模块;利用该模型模拟山东省 2015 - 2030 年的水资源供需状况,并对水资源短缺度进行定量化预警分析;结合模型的敏感度分析结果提出不同的发展方案,并模拟不同方案的实施效果,以期缓解山东省水资源短缺情势、促进水资源合理开发、实现水资源科学配置提供理论依据和政策导向;并为相关领域的进一步研究提供参考。

2 研究方法

2.1 研究区概况

山东省位于中国东南沿海、黄河下游,多年平均降雨量 679.55 mm。全省人均淡水资源占有量仅 334 m³,不足全国人均占有量的 1/6,属于严重缺水地区。2014 年末全省地表水供应量 121.26 × 10⁸ m³,地下水供应量 85.99 × 10⁸ m³;总用水量 214.52 × 10⁸ m³,总耗水量 138.96 × 10⁸ m³,综合耗水率高达 64.8%。总体而言,山东省水资源供需形势严

峻,水资源开发及配置有待进一步优化。

2.2 模型结构分析

构建系统动力学模型的关键在于分析系统的内部结构及各要素的因果、反馈关系。基于山东省水资源的供需关系,建立水资源供需平衡分析概念框架^[12]如图 1 所示。定义 R_{sd} 为水资源对社会可持续发展的支撑度,即实际供水量与实际需水量之比。相关表达式见式(1)~(3):

$$R_{sd} = TS/TD \quad (1)$$

$$TS = SS + GS + OS \quad (2)$$

$$TD = AD + ID + DD + ED - RS \quad (3)$$

式中: TS 、 SS 、 GS 、 RS 、 OS 分别为实际供水总量、地表水、地下水、回用水、其他水资源供应量, 10⁸ m³; TD 、 AD 、 ID 、 DD 、 ED 分别为实际需水总量、农业、工业、居民生活、生态需水量, 10⁸ m³。模型中将回用水以负值计入需水模块中,从而更准确地地表征实际供水量和实际需水量。

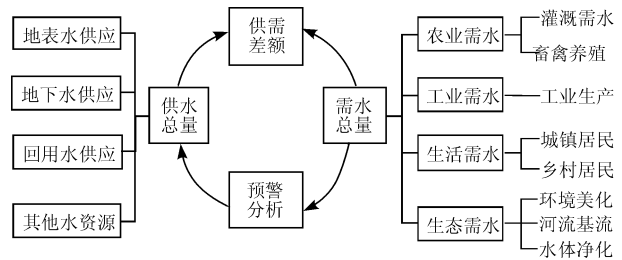


图 1 水资源供需平衡分析框架

2.3 系统动力学模型建立

本研究中,模型的空间边界为山东省行政区,时间边界为 2000 - 2030 年,时间步长为 1a;以 2000 - 2013 年为验证期,验证期所涉参数根据历年《山东省统计年鉴》、《山东省水资源公报》中的历史数据由多元统计回归法、线性插值、表函数等方法得到;以 2014 年为预测期基准年,2015 - 2030 年为预测期,预测期部分参数参考《全国水资源规划》得到。

供水系统考虑实际供水量,由地下水供水、地表水供水和其他水资源 3 部分组成,其他水资源包括引黄工程引水量和海水淡化量,在 STELLA 中构建该子系统流程图如图 2 所示。山东省地下水资源利用量多年平均递减率为 2.78%。

在需水系统中,农业需水子系统由灌溉需水和畜禽养殖需水两部分构成,如图 3 所示。设置节水因子,表示单位灌溉面积用水量年下降率,取值 2%。在工业需水子系统中,由于工业部门种类繁多且用水量差异大,为规避赋权法主观性过强、准确度差的缺陷,采用额定法计算,如图 4 所示。其中限制

因子表示当万元工业产值用水量达到先进国家发达水平 2 m^3 万元时,在此后相当长时间内维持稳定,年降低量为 0。

相关参数设定为:工业总产值增长变化率 - 7%;万元工业产值需水量年降低率 16.38%;工业水重复利用率 20%。生活需水由城镇、农村居民生活

需水两部分构成,如图 5。需水量由人口数和相应人均需水定额之积表示。相关参数设定为:乡村居民用水定额 $90 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ 、年增长率 0.5%;城镇居民用水定额 $160 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ 、年增长率 0.3%;城镇及总人口增长率分别为 3.87%、0.56%;居民生活节水率 30%。

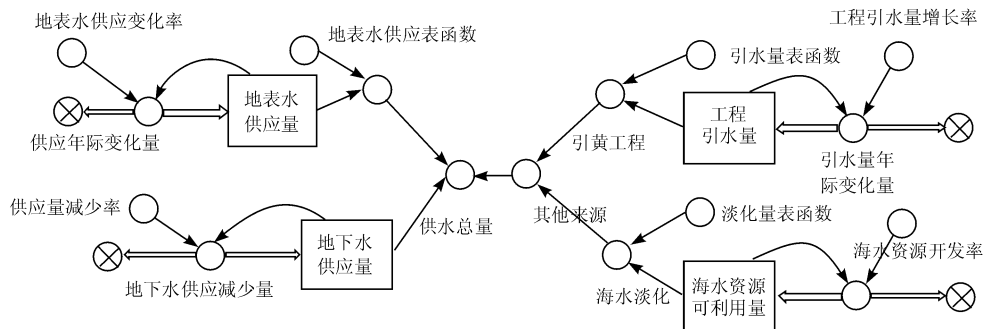


图 2 供水子系统

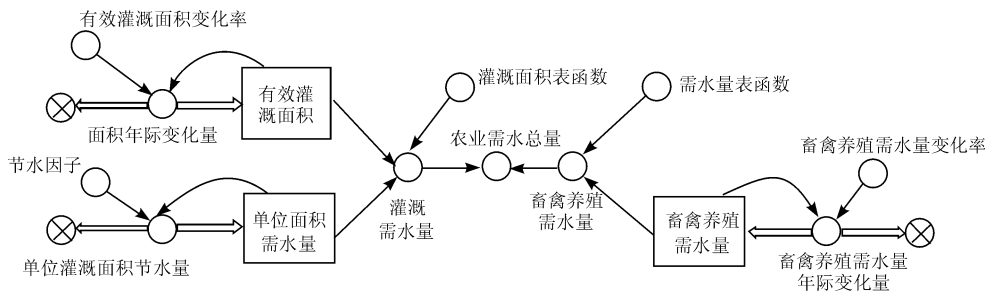


图 3 农业需水子系统

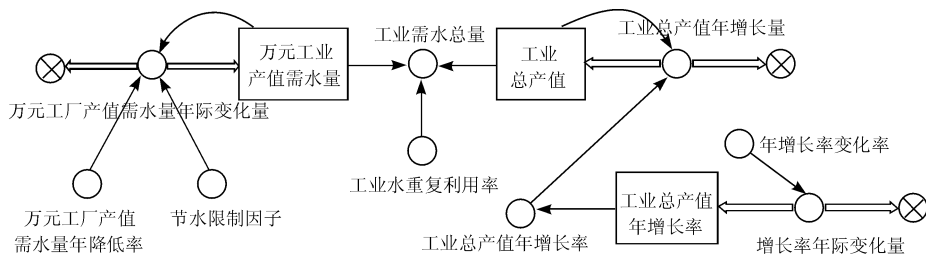


图 4 工业需水子系统

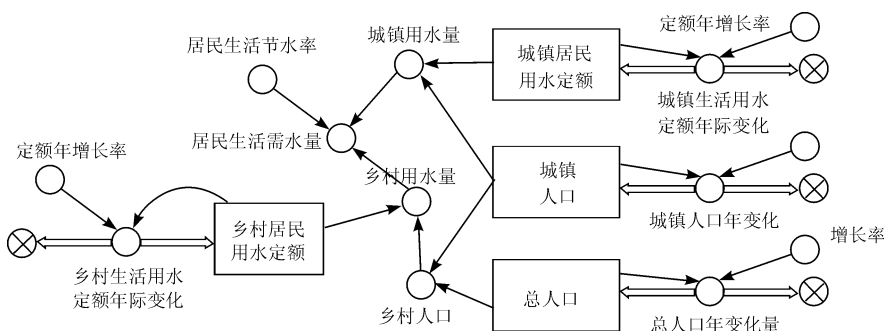


图 5 生活需水子系统

生态流量始终为可持续水资源管理中的一个核心问题^[13],在水资源供需系统中必须加入科学详尽

的生态需水模块以保证模拟仿真和趋势预测的合理性^[14]。根据自然生态系统发展需求,将生态需水分

为环境美化、河流基流、水体净化3部分^[15],如图6。环境美化包括绿化建设和道路抑尘,需水量均通过定额法计算。绿化建设面积包括公共绿地、居住区绿地、单位附属绿地、防护绿地、道路绿地和风景林地等各种绿地面积,验证期该值由表函数确定。维持河流基流的需水量通过 Tennant 法计算,Tennant 系数依据等级“好”的标准确定,取0.4^[16]。在分析水体净化需水时需将水质和水量统一起来,计算公式见式(4)。

$$Q = (Q_c - Q_p) / (C_0 - C_b) \quad (4)$$

式中: Q 为水体净化需水量, 10^8 m^3 ; Q_c 为各源某一污染物排放量总和, 10^8 m^3 ; Q_p 为污染物在水体中自净量, 10^8 m^3 ; C_0 为水质目标, mg/L ; C_b 为水体污染物背景值, mg/L 。本例中选取 COD 和氨氮为污染物指标。维持河道基流与实现水体净化的两部分需水量互为保证,互有重复,因此取二者中较大值,即生态需水量 = 环境美化需水量 + max(河流基流量, 水体净化量)。

子系统中的相关参数设定为:单位绿化面积用水定额 $60 \text{ m}^3/\text{hm}^2$;单位道路面积年均洒水量 0.12 m^3 ;道路面积年增长率 7.6% ;山东省河流中 COD、氨氮的背景值分别为 1.03 、 0.47 mg/L ;COD、氨氮的水质目标(设达到Ⅲ类水体)分别为 20 、 1 mg/L ;自净系数均为 60% 。

2.4 预警方法

$R_{SD} < 1$ 表明水资源短缺状况,通过建立水资源预警等级可以进一步判别水资源短缺对区域发展的影响程度^[17]。本文根据 R_{SD} 值建立水资源短缺预警等级如表1所示。

3 结果与讨论

3.1 模型检验结果

利用2001-2013年的历史数据,选择4个关键变量进行模型的有效性验证。由表2可知所选变量的模拟值与历史数据的相对误差均在10%以内,系统拟合度较好,模型可信度高。

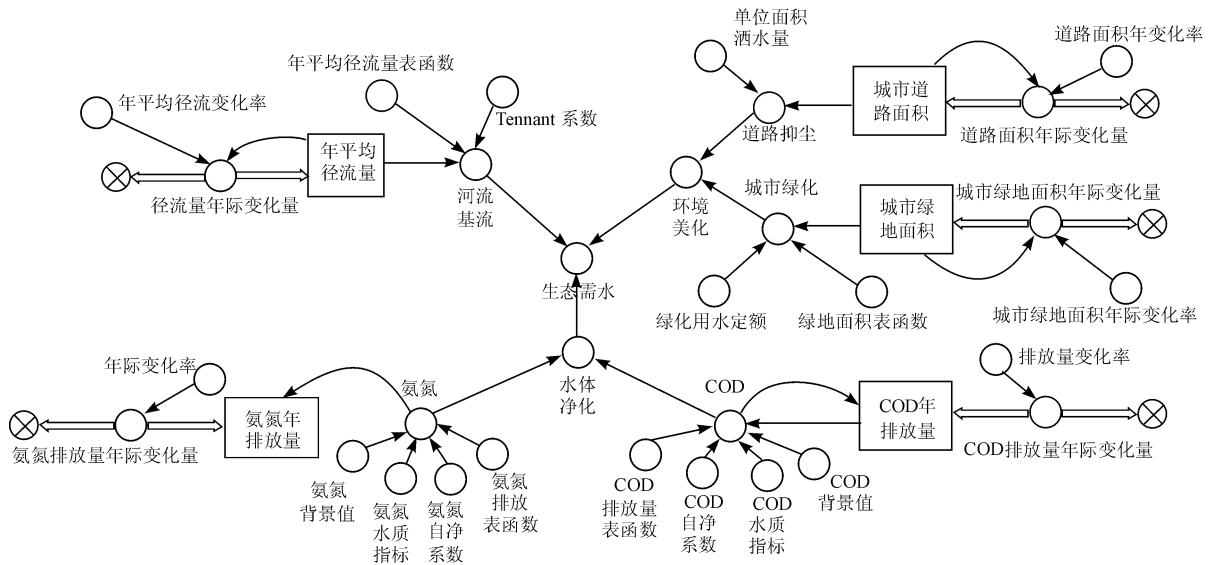


图6 生态需水子系统

表1 水资源短缺预警等级

预警等级	颜色	判断标准	描述
安全	绿	$R_{SD} \geq 1$	供水可满足需水要求。
Ⅳ级	蓝	$(TD - ED)/TD < R_{SD} < 1$	供水不能满足生态需水。
Ⅲ级	黄	$(TD - ED - ID)/TD < R_{SD} < (TD - ED)/TD$	供水不能满足工业、生态需水。
Ⅱ级	橙	$DD/TD < R_{SD} < (TD - ED - ID)/TD$	供水不能满足生态和工农业需水。
Ⅰ级	红	$R_{SD} < DD/TD$	供水不能满足居民生活需水。

以支撑度 R_{SD} 为目标变量,利用软件中敏感性分析模块进行关键参数的敏感性分析,确定对山东

省水资源供需情况影响较大的因子。综合考虑开源和节流,本文选取了9个参变量进行了敏感性分析。

测试时以率定值为中值(A),上(3A)下(1/3A)各浮动300%分为3个等级,输出结果如图7所示。

由图7可知,支撑度 R_{SD} 对农业灌溉节水率、黄河引水量年增长率、生活用水节水率、COD排放降低率和处理水回用率的变化最为敏感,是相关部门制定政策时的主要切入点;而对总人口增长率和工业水重复利用率的变化基本无响应,表明当前状况下在合理范围内抑制总人口增长或提升工业水重复利用率对缓解山东省水资源供需矛盾意义不大。

3.2 当前发展状况下模拟结果分析

在STELLA中对山东省2000-2030年水资源的供需状况进行模拟。由图8可知,在考虑生态需水的情况下,山东省自2003年起便处于水资源短缺状态。

供需差额呈现出明显的上升趋势,在当前发展模式下若维持工农业生产和人民生活,至2030年时供需差额将达近 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$;若要保证良好的生态

环境,该值将达 $90 \times 10^8 \text{ m}^3$,水资源紧缺形势严峻。图9显示了各需水部门的具体变化,可知农业需水量中占最大比重,虽随节水措施普及呈现下降趋势,但仍有较大的节水空间;随地下水超采、水质污染、河流断流、土地沙化等环境问题的出现,生态需水量呈显著上升趋势,生态需水比重2000年由的11.95%发展为2030年的31.90%,山东省的生态缺水问题亟待解决。

在当前发展状况下,对山东省水资源短缺状况进行预警分析如图10所示。

由图10可知,模拟期内山东省的 R_{SD} 值呈下降趋势,位于Ⅳ级和Ⅲ级之间,表明山东省水资源尚能支持当地工农业生产和居民生活,但无法满足生态需水,生态环境会进一步恶化。

至2030年, R_{SD} 值与Ⅲ级标准已非常接近,表明若不采取相关措施,2030年后山东省供水很可能无法满足工业生产需求。

表2 模型主要变量模拟值与历史数据比较

变量	比较	年份													
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
供水	历史值	254	275	237	230	228	282	251	253	275	274	281	283	274	
总量/ 10^8 m^3	模拟值	265	265	243	239	238	273	255	254	263	265	262	260	255	
	误差/%	4.3	3.7	2.5	4.0	4.5	3.1	1.7	0.3	4.2	3.6	6.8	8.1	6.8	
地下水	历史值	134	133	114	107	103	118	102	101	97	91	89	89	87	
供应量/ 10^8 m^3	模拟值	128	125	121	118	114	111	108	105	102	99	97	94	91	
	误差/%	4.2	6.3	6.3	8.6	9.5	5.4	6.1	3.9	5.4	8.9	8.2	5.3	5.2	
工业	历史值	42	44	44	46	43	46	45	44	47	47	44	42	41	
需水量/ 10^8 m^3	模拟值	39	42	43	45	46	46	46	46	45	44	43	41	39	
	误差/%	6.5	4.8	1.3	2.0	6.1	1.2	3.1	4.0	3.5	5.9	2.7	3.0	4.7	
农业	历史值	183	188	178	176	175	198	165	163	162	160	164	154	157	
需水量/ 10^8 m^3	模拟值	192	189	187	185	182	182	176	173	170	167	171	168	164	
	误差/%	4.8	0.4	5.2	5.2	3.9	8.3	6.6	6.1	5.1	4.6	4.2	8.6	4.6	

3.3 方案设计

以科学性、整体性和可行性为原则,选取敏感性较显著的变量为决策变量,从重视经济、节水、开源、综合协调四个角度分别拟定方案,以期寻求未来优化水资源开发与配置的最佳对策。

方案1:重视经济型,即相关政策将经济发展放在优先位置,确保经济高速增长。由于经济发展方面的财政高投入和政策优先性,节水政策制定和水利工程建设将受到一定限制。

方案2:全面节水型,即各用水部门均采取一定的节水措施,严格限制耗水多、污染重的产业活动;

同时加大治污力度。由于在节水、治污方面的财政投入和政策约束,经济发展和水利工程建设可能会受到一定限制。

方案3:水利开源型,即通过加强水利工程建设,提升雨洪资源、黄河资源和海水资源的开发利用率;同时,加强回用水系统的建设,提升污水的回用率。

方案4:协调发展型,即综合考虑上述3种方案的优缺点,以维持社会经济与生态环境协调发展、实现水资源可持续利用为核心目标。相关参数在设置时依照以上各方案进行调整。

基于当前的社会经济发展趋势,各方案决策变

量的调整方式如表3所示。

3.4 模拟结果与比较分析

在STELLA中对4种发展方案分别进行模拟,模拟结果如图11所示。

在重视经济型方案下,工业产值远大于其他方案,至2030年将达 64×10^{12} 元,是当前模式下的3

倍;城镇化率也大幅提升,城镇人口将达当前模式的两倍。但工业、生活需水量大幅提升, R_{SD} 值急速下降,供需差额将高达 $-176 \times 10^8 \text{ m}^3$,巨大的水量亏空将大幅挤占生态用水,势必导致生态环境的进一步恶化。该发展模式下,水资源短缺将成为关键的限制性因素,严重影响山东省社会经济的长远发展。

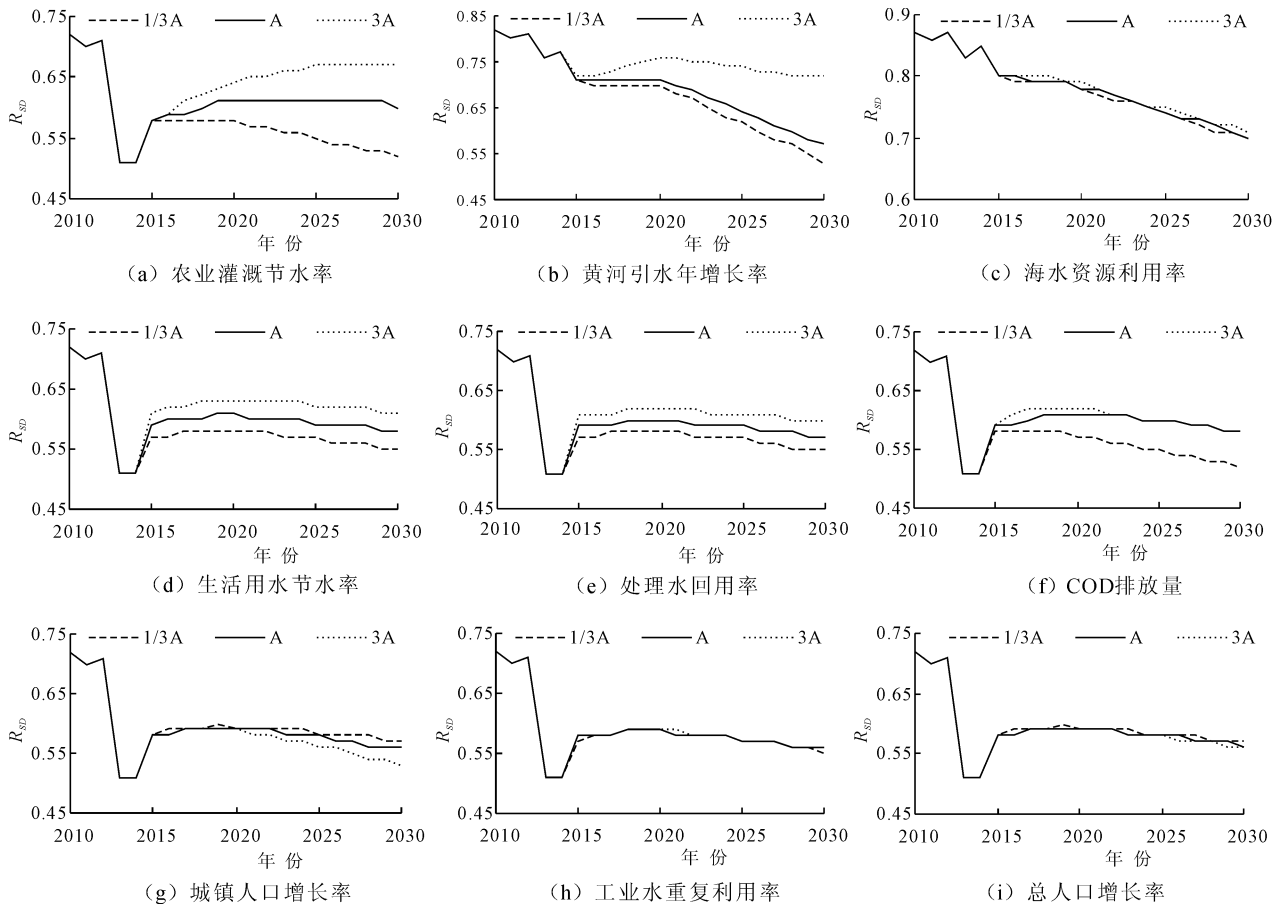


图7 关键变量敏感性分析结果图

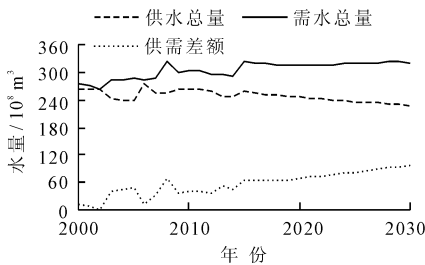


图8 模拟期山东省水资源供需状态变化曲线

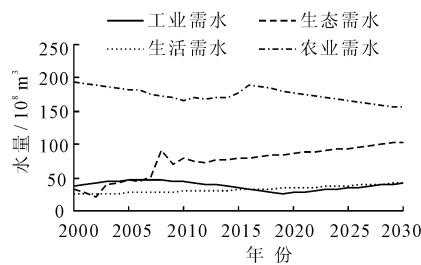


图9 模拟期山东省各类需水量变化曲线

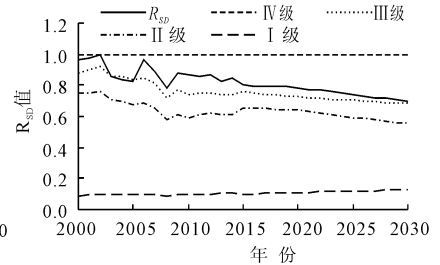


图10 山东省水资源预警分析图

在全面节水型方案下,山东省水资源供需矛盾明显缓和, R_{SD} 值维持在0.9左右,供需差额是当前模式的1/4,节水成效显著。但此方案下2030年的工业产值减少近 5×10^{12} 元,将导致经济发展速度与山东省的发展规划产生较大差距;且在全面节水措施下, R_{SD} 值仍呈下降趋势,表明仅通过节水来解决水资源紧缺有

一定局限性和饱和性。那种因节约水资源而牺牲经济、社会发展的方案同样不可取。

水利开源型的发展模式有效利用了山东省近海的地理优势,海水资源和雨洪资源的开发利用潜力较大。模拟结果也表明该方案下山东省水资源紧缺形势明显好转,至2030年时水资源出现余量,生态环境将有所改

善,同时经济发展与城镇化建设也未受明显影响。相较于全面节水型发展该方案具有更高的参考价值。但黄河水作为山东省最大的客水资源,近年来其下游却几次出现断水情况,可引水量逐年减少,水资源开发重心应逐步向海水淡化、城市雨洪利用等方向偏移。

表3 水资源供需方案决策变量参数设置

调整项目	重视经济型/%	全面节水型/%	水利开源型/%	协调发展型/%
农业灌溉节水率		+2		+1
万元产值需水下降率	-5	+7		+3
工业总产值增长率	+5	-3	+1	+1.5
生活用水节水率		+6		+2
城镇人口增长率	+3		+1	+1.5
COD 排放量	+1.5	-7		-3
引黄工程引水增长量		-3	+8	+3
海水利用率			+7	+3
处理水回用率			+12	+5
污水处理率	-2	+6		+2

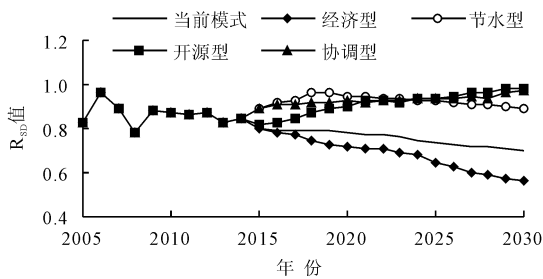


图11 不同方案下 R_{sd} 值的变化曲线

协调发展型方案综合考虑了上述各方案的优势与局限性及山东省的发展规划,其模拟结果表明该方案下山东省水资源得到了合理的开发与配置。至2030年时,工业总产值较当前模式增加了1/2,COD排放量减少近1/4,城镇化率也达到了山东省规划要求;水资源供需差额虽仍为负值,但 R_{sd} 值呈上升趋势,差额极有可能在后续发展中补齐。水资源严重短缺的问题将在该方案下基本得到解决,同时山东省社会经济将得到持续有力的发展,该方案应为最优发展方案。

4 结论

(1)本文利用STELLA模型对山东省2015-2030年水资源供需状况动态变化的模拟结果表明,山东省当前处于Ⅳ级缺水状态,水资源供应尚能满足区域工农业生产和居民生活需求,但生态缺水严重。若以当前模式发展,至2030年时全省将处于Ⅲ级缺水状态,供需差额将达到 $90 \times 10^8 \text{ m}^3$,且有近 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 将影响当

地的工业生产。

(2)当前省情下,水资源短缺程度对农业灌溉节水率、黄河引水量年增长率和生活用水节水率最敏感,而对工业产值增长率、总人口增长率和工业水重复利用率基本无响应。

(3)经济型和节水型方案均不利于山东省的持续有力发展;开源型方案较前两者有较大优势,但会造成一定的生态影响。综合型方案有效协调了区域的社会经济增长和水资源开发利用,是兼顾社会经济与生态环境的最优水资源利用模式。

(4)本文强化了水资源供需系统的生态需水模块,并对山东省的水资源短缺度进行了量化预警分析,弥补了相关研究的不足。但考虑到水资源系统的复杂性和不确定性,对未来情境下区域水资源的深入研究还需进一步考虑气候、地形、经济结构、科技发展、管理政策等因素的影响。

参考文献:

- [1] Yang Junfeng, Lei Kun, Khu S, et al. Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model: a case study of Tielingcity, China [J]. Water Resources Management, 2015, 29(3):885-899.
- [2] 杜剑. 山东省三大流域水资源紧缺程度研究[D]. 济南:山东大学,2010.
- [3] 杨晓华,杨志峰,沈珍瑶,等. 水资源可再生能力综合评价的多目标决策理想区间法[J]. 中国科学E辑:技术科学, 2004,34(S1):34-41.
- [4] Giupponi C, Mysiak J, Fassio A, et al. MULINO - DSS: A computer tool for sustainable use of water resources at the catchment scale[J]. Mathematic Compute Simulation, 2004, 64(1):13-24.
- [5] Feng L H, Huang C F. A risk assessment model of water shortage based on information diffusion technology and its application in analyzing carrying capacity of water resources[J]. Water Resources Management, 2008, 22(5):621-633.
- [6] 朱洁,王烜,李春晖,等. 系统动力学方法在水资源系统中的研究进展评述[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(2):32-39.
- [7] Kaabi B, Ahmed B H. Assessing the effect of zoo prophylaxis on zoonotic cutaneous leishmaniosistransmission: a system dynamics approach[J]. Biosystems, 2013, 114(3):253-260.
- [8] De W M, Crookes D J. Improved decision - making on irrigation farming in arid zones using a system dynamics model[J]. South African Journal of Science, 2013, 109(11):1-8.

(下转第86页)

较差。此外,因为调水导致河道流量增加,流速也相应增加,造成河水在河道内的停留时间变短,水中各氮素之间的转化不能得到充分反映。

调水期,调水水量占果河河道水量的90%以上,因此果河水中氮素含量及组成主要也受调水影响,沙河水体的汇入对其影响不大。

3 结论

(1)引滦调水期河道天然水体中氮素均以可溶态为主要赋存形式,其中 NO_3^- -N占绝对优势,其含量的高低是影响水体中TN含量的决定性因素。

(2)受遵化南二环大量生活污水废水汇入影响,非输水河道沙河水中的氮含量明显高于输水河道黎河和果河。同时,沙河水中氮素的自然降解能力也强于黎河和果河。

(3)引滦调水期,沙河汇入果河的水量仅为调水水量的10%,因此沙河水体的汇入对果河水质影响不大。调水期黎河和果河水质主要受调水水质影响。

(4)引滦调水期,上游来水在黎河、果河中停留时间很短,因此于桥水库水质主要受调水水质影响,调水水体为库区氮素的主要来源。调水水体中DON和 NH_3 -N所占比重偏高,更有利于藻类的吸收,是导致近年来于桥水库藻类逐年增加乃至面临水华爆发风险的主要原因。

参考文献:

- [1] 杨光,刘伟江,孙韧,等.天津市于桥水库饮用水源地保护对策研究[J].水资源与水工程学报,2011,22(6):43-45.
- [2] 陈水蓉,吴光红,苏睿先.天津市于桥水库水质变化特点及影响因素分析[J].水资源保护,2011,27(4):27-30.
- [3] 王立林,杜玉凤,王鸿雁.于桥水库富营养化控制对策研究[J].水科学与工程学报,2007(6):23-26.
- [4] 陈福贵,赵翠霞,王立林,等.于桥水库富营养化成因分析[J].水科学与工程学报,2008(5):56-58.
- [5] 张庆强,周潮晖,王旭丹,等.引滦输水污染物对于桥水库水环境的影响[J].水资源保护,2014,30(6):35-39.
- [6] 杜乔乔,颜坤.基于PCA的于桥水库富营养化因子分析[J].水资源与水工程学报,2013,24(2):212-214.
- [7] 范荣桂,朱东南,邓岚.湖泊富营养化成因及其综合治理技术进展[J].水资源与水工程学报,2010,21(6):48-52.
- [8] 丛海兵,黄廷林,李创宇,等.于桥水库沉积物内源污染特性研究[J].水资源保护,2006,22(4):20-23+61.
- [9] 黄廷林,丛海兵,柴蓓蓓.饮用水水源水质污染控制[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [10] 白军红,欧阳华,邓伟,等.向海沼泽湿地土壤中氮素的空间分布格局[J].地理研究,2004,23(5):614-622.
- [11] 赵海超,王圣瑞,焦立新,等.2010年洱海全湖氮负荷时空分布特征[J].环境科学研究,2013,26(4):389-395.
- [12] 王东红,黄清辉,王春霞,等.长江中下游浅水湖泊中总氮及其形态的时空分布[J].环境科学,2004,25(S1):27-30.
- [13] 陈文焯,王志红.不同形态氮对富营养化水源藻华暴发的潜在影响[J].给水排水,2008,34(9):22-27.

(上接第81页)

- [9] Collins R D, Neufville R D, Claro J, et al. Forest fire management to avoid unintended consequences: a case study of Portugal using system dynamics[J]. Journal of Environmental Management, 2013, 130(30):1-9.
- [10] 杨巧宁.基于SD模型的山东省水土资源可持续利用模式研究[D].济南:山东师范大学,2011.
- [11] 左其亭,胡德胜,窦明,等.基于人水和谐理念的最严格水资源管理制度研究框架及核心体系[J].资源科学,2014,36(5):906-912.
- [12] Kashaigili J J, McCartney M, Mahoo H F. Estimation of environmental flows in the Great Ruaha River Catchment, Tanzania[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2007, 32(15):1007-1014.
- [13] Dai Shanshan, Li Lanhai, Xu Honggang, et al. A system dynamics approach for water resources policy analysis in arid land: a model for Manas River Basin[J]. Journal of Arid Land, 2013, 5(1):118-131.
- [14] 杨志峰,赵彦伟,崔保山,等.面向生态城市的水资源供需平衡分析[J].中国环境科学,2004,24(5):636-640.
- [15] 郑志宏,张泽中,黄强,等.生态需水量计算 Tennant法的改进及应用[J].四川大学学报(工程科学版),2010,42(2):34-39.
- [16] Pedro S A, Tonnang H E Z, Abelman S. Uncertainty and sensitivity analysis of a rift valley fever model[J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, 279(10):170-186.
- [17] 金菊良,费振宇,郦建强,等.基于不同来水频率水量供需平衡分析的区域抗旱能力评价方法[J].水利学报,2013,44(6):687-693.