

系统动力学在国内水资源研究领域的应用综述

舒栋才 ,黄法苏 ,曹振宇

(贵州省水文水资源局 ,贵州 贵阳 550002)

摘要 :在简要介绍系统动力学概念和特点的基础上 ,综述了系统动力学在国内水资源承载力、水资源规划、水资源配置、水资源管理、水资源安全模拟、城市需水预测以及水环境评价方面的应用研究现状 ,展望了系统动力学在水资源方面的未来研究趋势和发展方向。

关键词 :系统动力学 ;水资源 ;综述

中图分类号 :O313.7 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2009)S1-0159-05

1 系统动力学简介

系统动力学(system dynamic ,SD)是一种以反馈控制理论为基础 ,以计算机仿真技术为手段的研究复杂社会经济系统的定量方法 ,由美国麻省理工学院 Forrester 于 20 世纪 50 年代中期创立。该方法是在总结运筹学的基础上 ,综合系统理论、控制论、信息反馈理论、决策理论、系统力学、仿真与计算科学等基础上形成的学科^[1-2]。

系统动力学模型从本质上看是带时间延迟的一阶微分方程组 ,它包含一阶、二阶(正、负反馈)系统和振荡系统。系统动力学的模拟模型是一种结构-功能的模拟 ,它擅长处理周期性、长期性、高阶、非线性、时变问题 ,而且在数据缺少的条件下仍可进行研究。因此 ,系统动力学已成为许多决策模拟的主要工具之一 ,并被企业系统管理、环境保护、城市发展与规划、国际和地方经济社会系统发展规划、国土开发与整治等许多领域所采用^[3-4]。

水资源系统是一个涉及社会、经济、环境、生态等多个领域的系统 ,各系统要素之间通常存在着多重影响和联系 ,同时这些要素又是随时间的变量 ,所以水资源系统是一个具有反馈动态性和复杂时变的系统^[5]。因此 ,系统动力学方法可以适应于水资源系统的研究。将系统动力学理论和方法引入水资源科学研究中 ,不但拓宽了应用范围 ,而且推动了系统动力学理论的发展。

2 系统动力学在国内水资源研究中的应用

随着系统动力学的形成和发展 ,其优势逐步引起许多水科学工作者的重视并引入水资源科学研究中 ,这些成果主要体现在水资源承载力、水资源可持续利用、水资源配置与规划、水环境与水生态、水资源调度、城市需水预测、水(资源)安全模拟以及节水等方面。

2.1 水资源承载力研究

1995 年 ,陈亮雄等^[6]首先在国内利用系统动力学方法建立了京津唐地区水资源系统动力学模型 ,模型包含水源开发、城市生活用水、工业用水、农业用水、污水处理等 5 个子系统 ,利用该模型模拟了 1990~2020 年现状延续型、目标规划型 2 种方案的结果 ,并与多目标决策模型进行了比较。

1996 年 ,高彦春等^[7]建立了汉中盆地平坝区水资源系统仿真预测分析模型 ,并利用模糊优化评价方法来评价方案的可行性。王建华等^[8]以干旱区城市乌鲁木齐市为例 ,建立了以投资、水资源分配、农业节水、灌溉、生活用水、人口、工业节水和循环用水 8 个子系统组成的系统动力学模型 ,对乌鲁木齐市 1993~2020 年间水资源承载力进行预测分析 ,模拟结果表明乌鲁木齐市人口增长以城市人口为主 ,农业人口下降 ,农业用水量下降 ,工业用水量通过增加水利工程投资和降低单位产值来满足。

2001 年 ,惠泱河等^[9]以关中地区为例 ,建立了基于自然-人工二元模型下的水资源承载力动态仿

基金项目 :贵州省优秀科技教育人才省长专项资金(黔省专合字(2007)110 号) ;贵州省高层次人才科研条件特助经费项目(TZJF-2007 年 14 号)
作者简介 :舒栋才(1968—) ,男 ,贵州安顺人 ,高级工程师 ,博士 ,从事分布式水文模型、水资源优化配置研究。E-mail :sdc57@sina.com

真研究。

2005年,杨书娟^[10]以贵州省为例,构建了基于系统动力学的喀斯特地区水资源承载力模拟模型,并以发展经济型、节水型和协调型(开源节流)等3种方案模拟了贵州省2004~2020年的水资源承载力情况,通过模拟,到2020年,只有在协调型方案中将水资源利用率提高到26%才能满足供需平衡的需要。

2006年,冯海燕等^[11]利用系统动力学方法建立了北京市水资源承载力模型,选取工业、农业总产值和可承载的城镇人口数量作为北京市水资源承载力的衡量指标,在现状延续、节水兼污水再生回用、节水兼境外调水和综合型4种方案下模拟了2003~2020年北京市水资源承载力的动态变化,模拟结果显示,在建设节水型社会前提下,实施污水回用和境外调水的综合型方案是提高北京水资源承载力的满意方案。

2008年,徐毅等^[12]基于大连市水资源现状,建立了大连市水资源承载力系统动力学模型,将水资源承载力系统划分为人口、工业、农业、水污染处理及回用、城市环境及水资源6个子系统,在现状延续型、节水型、经济发展型和协调发展型4种方案下,模拟了2001~2020年大连市水资源承载力的动态变化,并提出了可行的方案。黄林显等^[13]针对山东省水资源短缺的现状和水资源系统所具有的复杂系统特征,建立了包含人口、工业、农业、水污染、生态、水资源6个相互联系、相互影响子系统的山东省水资源承载力SD模型,在现状趋势延续型、经济发展为主型、节约水资源为主型以及可持续发展型4种模式下,模拟了山东省2001~2020年水资源承载力的变化,结果显示,只有在可持续发展型的模型下,控制经济发展速度,开源与节流并重,提高污水处理率和污水回用率,才能使山东省在2020年的水资源承载力满足经济平稳、可持续地增长。张振伟等^[14]针对河北省水资源承载力分析的需要,建立了包含人口、农业、工业、水资源、生态环境以及水污染及治理6个子系统的SD模型,模拟了现状水平、提高节水并且加大水利设施投资2种方案下的2000年、2005年、2010年、2015年和2020年的水资源承载力,模拟结果显示,在水资源总量基本不变的情况下,用水结构发生了明显的变化,农业用水在水资源总量中的比重由2000年的74%逐步减少到2020年的66%,同时灌溉面积增加了36%,而工业用水由2000年的15%逐步增加到2020年的21%。朱峰等^[15]以甘肃省酒泉市肃州区为研究对象,以可承载人口数量及经济发展规模为主要体现,采用系统动

力学方法建立水资源承载力模型。根据研究区现状,模拟出各种产业结构及用水水平下水资源可承载的人口数量及经济、生态规模。

2009年,牛志强等^[16]建立了包含工业、农业、生活、污染和第三产业等5个子系统的系统动力学模型,结合河南省区域经济发展状况,设计了传统发展模式、工业发展模式(通过政策调控达到经济高速增长发展模式)和谐发展模式(通过人为干预达到经济发展并兼顾其他行业及保护环境发展模式)3种水资源利用方案并进行分析和计算。模拟结果表明,以传统的和以经济为中心的水资源发展模式很不合理,在政策调控下既发展经济又保护环境的方案最佳。该文针对河南省水资源状况提出了控制人口增长、增加水利建设投资比例、提高水资源开发利用率、提高工业用水重复利用率、提高污水处理率以及增加科技投资促进农业技术进步等政策性建议。

2.2 水资源可持续利用

1999年,杨建强等^[17]以吉林西部地区乾安县为例,应用系统动力学原理和方法开展了该区水资源可持续利用系统仿真研究。在模拟过程中,采取递推模拟的方法,每调试一个方案,对其结果进行多方面的判定和分析,从中把握方案的优劣,通过方案比较,逐步寻求理想方案。

2000年,陈成鲜等^[18]建立了我国水资源可持续发展的系统动力学模型,引入可持续发展因子,将水资源与社会、经济、人口、环境放在一个大系统中,对1987~1997年这一时段内的水资源利用情况进行了模拟,并预测了2010年的水资源情况,提出保证我国水资源可持续发展的策略。

2007年,成洪山^[19]在分析广州市水资源供需状况的基础上,建立了广州市水资源可持续利用的系统动力学模型,模型中假设了维持现状策略、中水回用策略、社会节约策略、水资源保护策略以及综合协调策略5种情景,模拟预测了2006~2025年广州市水资源供需情况,并用层次分析法对广州市水资源可持续利用能力进行评价。模拟结果表明,在预测时段内,广州市水资源在综合协调策略下的可持续能力最高,其综合指数在2025年达到0.727,是规划水平年的1.4倍。

2.3 水资源配置与规划

2002年,张雪花等^[20]应用系统动力学-多目标规划整合模型对秦皇岛市城市水资源利用结构进行优化。该模型首先建立包含人口、工业、服务业、农业、资源和环境6个子系统的动态仿真模型,以现状水平按惯性发展预测城市发展趋势,结果表明秦皇岛市处于缺水状态,通过分析找出对秦皇岛水资源

供需平衡影响较大的关键因素(工业用水),建立以工业行业产业结构调整的多目标规划模型,再将求得的最优值代入系统动力学模型进行模拟,所得到的结果满足城市总体规划要求。

2008年,张相忠等^[21]以青岛市为研究区,构建系统动力学仿真模型,采用层次分析法和多分量水资源承载力指数法定量分析青岛市水资源承载力,并通过对拟定的4种水资源配置方案的对比分析,确定青岛市水资源配置的最佳方案,在此基础上,预测不同水平年可承载的GDP和总人口。

2.4 水环境和水生态

2005年,杨秀杰^[22]以重庆市云阳县为例,建立了区域生态安全承载力的系统动力学模型,该模型包括人口、耕地、种植业、畜牧业、林业、环境、消费以及国民经济等8个子系统。

2007年,莫淑红^[23]、孙新新等^[24]以宝鸡市为例,将水环境承载力系统分解为水资源、水污染、工业、农业和人口5个子系统,运用系统动力学方法与向量模法相结合,建立了区域水环境承载力的系统动力学模型。通过10个方案的模拟情况表明,只有采取节流、治污、开源和外调水相结合,才能使宝鸡市水环境承载力有大幅度的提高。

2.5 水资源调度

2008年,王武科等^[25]以渭河流域关中地区(5市1区)为例,运用系统动力学构建渭河流域关中地区水资源调度系统模型,建立了规划调度、经济优先发展、生态保护调度、需水量调度和缺水量动态调度等5种方案,并用灰色系统进行综合评价。

2.6 城市需水预测

2005年,刘俊良等^[26]建立了城市需水量的SD模型,并利用该模型对河北省11个省辖市的城市需水量进行仿真预测,以1991年为初始年拟合了2001年的城市需水量,并预测了2010年、2020年、2030年的值,其仿真结果显示,2001~2020年间用水量快速增长,但当人民生活水平和经济发展到一定阶段后,受当地各种资源和自然环境承载力的约束,其发展速度会逐渐变缓,故其需水量也呈缓慢增长的态势。

2008年,李俊玲等^[27]以南水北调东线工程江苏受水区为例,运用系统动力学方法建立了SD模型,运用SD模型对受水区近期的需水量进行了预测,使受水区水资源得到合理配置。

2.7 水资源安全及预警

2001年,王慧敏等^[28]提出了流域可持续发展的系统动力学预警方法,建立了淮河流域人口-工业经济-水资源水环境预警模型,以可持续发展能力指数调整流域发展策略。

2002年,张巧显等^[29]运用系统动力学的理论与方法,分析了中国水生态系统的特征及各组分间的相互作用,建立了中国水安全动态模型。模型从生命安全、经济安全、粮食安全、生态系统安全、环境安全和社会安全等出发,在按常规发展的模拟、技术革新模拟,体制改革和行为诱导模拟以及水资源可持续利用模拟4种不同情景下进行系统模拟。结果表明:只有加速技术创新,增强水生态和节水意识,加强水管理,中国水安全才能得到保证。

2006年,邱德华^[30]利用系统动力学理论和方法,建立了完整的区域水安全战略的系统动力学方法,并且提出了基于实数编码加速遗传算法的改进投影寻踪方法,建立了基于实数编码加速遗传算法的改进投影寻踪方法的区域水安全等级评价模型,以广东省为例,设计了8个水安全战略方案,并进行水安全战略的系统动力学仿真模拟运行和水安全等级评价模型计算分析,得出各方案未来50年水安全与社会经济环境耦合系统的发展趋势,以及不同时间的水安全综合评价等级,并提出了保障该地区水安全的战略建议。

2.8 其他水资源应用

1996年,姚崇仁等^[31]用系统动力学方法描述了节水灌溉对区域水资源系统的影响问题,分析了系统中各因素间的因果关系,明确了其中的主导反馈结果,并确定了主要流率的结构,为建立定量分析预测奠定了基础。

2000年,张兴芳^[32]针对城市中单纯以用水效率来评价节水水平方法存在的不足,从系统动力学理论出发,在城市节水(用水)系统回路中增加了“城市水资源允许开采量”作为控制变量,保证了城市水资源可开采量与取水量之间的平衡、供水量与城市社会经济发展需水量之间的平衡,在此基础上建立了新的节水水平评价模型,并用该模型对山西省太原市、大同市和长治市3个城市1990年的节水水平进行了评价。

2008年,徐建新等^[33]将南水北调中线工程河南受水区水资源系统分为大气降水、地表水、浅层地下水、深层地下水4个子系统,给出了各子系统的动力学特征指标(Hurst指数、Kolmogorov熵和Lyapunov指数)和水循环之间的定性关系,揭示了各子系统的分形特征、复杂程度和演化规律。

3 应用研究展望

从上面的论述可以看出,系统动力学在水资源承载力、水资源规划、水资源安全及预警方面得到了广泛的应用。从这些应用可以看出,系统动力学方

法把对发展模式的预测建立在对系统结构分析的基础上,为区域可持续发展研究提供了一种既有理论基础,又有较强可操作性的有效方法。同时,建立在系统结构上的系统动力学模型可以更为深刻地反映出复杂系统的内在发展机制,据此而做出的预测能比较全面地反映系统宏观、长远的发展趋势。另外,该方法可以通过模拟来检验不同方案实施后的效果,从而为区域可持续发展模式的选择奠定科学的基础^[34]。正是基于以上特性,使系统动力学成为水资源可持续利用研究的有效工具。

但是,系统动力学也存在一定的不足^[2]:参数量大,且参数选择的随意性大;虽然是多方案模拟,但是决策方案并非最优,模型结构基本上是机械性的,不能由低级结构自组织成高级结构,即不具有自进化功能。因此,系统动力学一方面需要自身的发展和完善,另一方面需要借助其他方法和模型的优势克服系统动力学本身的局限性,使之得到更加广泛的应用。

在目前的研究中,以系统动力学理论、方法和模型为主框架,综合运用多种理论与方法,建立起耦合的模型体系是当前的研究发展方向。

3.1 系统动力学与多目标规划模型的耦合

系统动力学虽然是多方案的模拟,但是其决策方案不一定是最优的,将多目标规划运用于系统动力学中,寻找出系统中影响较大的关键参变量,并实现对这些关键参变量进行准确求解,以便得出最优方案的决策^[2]。

3.2 系统动力学与模糊方法的耦合

在复杂的水资源系统中,各子系统之间、子系统内各要素之间存在着大量的不确定性,能否解决好水资源系统中的不确定性成为水资源系统模拟和规划的关键因素之一。将处理这种不确定性信息的模糊方法和系统动力学进行耦合并运用于水资源系统中,可以得出符合实际的决策方案。

3.3 系统动力学与神经网络和优化算法耦合

系统动力学模型结构基本上是机械性的,不具有由低级结构进化到高级结构的功能,况且系统动力学方法在模拟过程中对于参变量通常使用“试凑法”,很难达到数学意义上的最优化解^[35]。而神经网络和遗传算法、粒子群算法、免疫进化算法等这类具有自适应、自进化能力的特点恰好能弥补系统动力学模型的这类缺陷。

3.4 系统动力学与综合评价方法的结合

系统动力学的模型中,由于状态变量过多,不同方案的模拟结果中,只能通过比较单一的状态变量来确定模型参数的优劣,无法得出一个总体的决策

方案,将综合评价方法(如层次分析法、投影寻踪方法、集对分析方法等)运用于系统动力学模型的评价中,会得出一个总体的评价方案。

3.5 系统动力学与 GIS 的结合

在水资源系统模拟中,有很多状态变量涉及时间和空间的二维分布,将系统动力学的多方案模拟结果,借助于 GIS 强大的空间与属性信息一体化的管理及空间分析能力,能帮助决策者在二维空间上考虑动态的水资源分布,从而可以更全面地描述、解析和模拟一个复杂的水资源系统。

参考文献:

- [1] 王其藩.系统动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [2] 蔡林.系统动力学在可持续发展研究中的应用[M].北京:中国环境科学出版社,2008.
- [3] 孟凯中,王斌.系统动力学在我国可持续发展战略中的研究进展[J].资源开发与市场,2007,23(1):78-80.
- [4] 王薇,雷学东,余新晓,等.基于 SD 模型的水资源承载力计算理论研究[J].水资源与水工程学报,2005,16(3):11-15.
- [5] 徐玉升,祁凯,丁小明,等.水资源利用的系统动力学问题[J].江南大学学报:自然科学版,2008,7(5):615-618.
- [6] 陈亮雄,翁文斌.水资源系统动力学模型研究[J].广东水电科技,1995(4):29-36.
- [7] 高彦春,刘昌明.区域水资源系统仿真预测及优化决策研究[J].自然资源学报,1996,11(1):23-32.
- [8] 王建华,江东,顾定法,等.基于 SD 模型的干旱城市水资源承载力预测研究[J].地理学与国土研究,1999,15(2):18-22.
- [9] 惠泱河,蒋晓辉,黄强,等.二元模型下水资源承载力系统动态仿真模型研究[J].地理研究,2001,20(2):191-198.
- [10] 杨书娟.基于系统动力学的水资源承载力模拟研究——以贵州省为例[D].贵阳:贵州师范大学,2005.
- [11] 冯海燕,张昕,李光永,等.北京市水资源承载力系统动力学模拟[J].中国农业大学学报,2006,11(6):106-110.
- [12] 徐毅,孙才志.基于系统动力学模型的大连市水资源承载力研究[J].安全与环境学报,2008,8(6):71-74.
- [13] 黄林显,曹永强,赵娜,等.基于系统动力学的山东省水资源可持续发展模拟[J].水力发电,2008,34(6):1-4.
- [14] 张振伟,杨路华,高慧嫣,等.基于 SD 模型的河北省水资源承载力研究[J].中国农村水利水电,2008,3:20-23.
- [15] 朱峰,魏国孝,王德军,等.基于 SD 模型的肃州区水资源承载力[J].兰州大学学报:自然科学版,2008,44(3):1-5.
- [16] 牛志强,王延辉,刘明珠.河南省水资源承载能力系统动力学模型及其应用[J].水电能源科学,2009,27(1):48-50.
- [17] 杨建强,罗先香.水资源可持续利用的系统动力学仿真

研究[J].城市环境与城市生态,1999,12(4):26-29.

[18]陈成鲜,严广乐.我国水资源可持续发展系统动力学模型研究[J].上海理工大学学报,2000,22(2):154-159.

[19]成洪山.广州市水资源可持续利用的系统动力学研究[D].广州:华南师范大学,2007.

[20]张雪花,郭怀成,张定安.系统动力学——多目标规划整合模型在秦皇岛市水资源规划中的应用[J].水科学进展,2002,13(3):351-357.

[21]张相忠,毛子龙,张延青.基于承载力模拟的水资源优化配置研究[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2008,40(3):418-423.

[22]杨秀杰.区域生态安全承载力的系统动力学研究——以重庆市云阳县为例[D].成都:四川大学,2005.

[23]莫淑红,孙新新,沈冰,等.基于系统动力学的区域水环境动态承载力研究[J].西安理工大学学报,2007,23(3):251-256.

[24]孙新新,沈冰,于俊丽,等.宝鸡市水资源承载力系统动力学仿真模型研究[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2007,39(1):72-77.

[25]王武科,李同升,徐冬平,等.基于SD模型的渭河流域关中地区水资源调度系统优化[J].资料科学,2008,30(7):983-989.

[26]刘俊良,景红,何延表.系统动力学模型用于城市需水

量预测[J].中国给水排水,2005,20(6):31-34.

[27]李俊玲,袁连冲,钱自立.系统动力学在需水量预测中的应用[J].人民长江,2008,39(2):20-22.

[28]王慧敏,刘新仁,徐立中.流域可持续发展的系统动力学预警方法研究[J].系统工程,2001,19(3):61-68.

[29]张巧显,欧阳志云,王如松,等.中国水安全系统模拟及对策比较研究[J].水科学进展,2002,13(5):569-577.

[30]邱德华.区域水安全战略的仿真评价研究[D].南京:淮海大学,2006.

[31]姚崇仁,高军省,雷天朝,等.节水灌溉对区域水资源系统影响的系统动力学述[J].中国农村水利水电,1996,3:16-19,48.

[32]张兴芳.运用系统动力学和可持续发展的观点探讨城市节水水平评判方法[J].系统辩证学学报,2000,8(2):72-76.

[33]徐建新,郝志斌,将晓辉,等.区域水资源系统动力学特征分析[J].水科学进展,2008,19(4):519-524.

[34]张爱胜,李锋峰,康玲芬.系统动力学及其在区域可持续发展研究中的应用[J].干旱气象,2005,23(2):70-74.

[35]许光清,邹骥.系统动力学方法:原理、特点与最新进展[J].哈尔滨工业大学学报:社会科学版,2006,8(4):72-77.

(收稿日期:2009-03-31 编辑:方宇彤)

(上接第152页)

c. 政府加大宣传力度和技能培训力度,通过政府部门积极引导,在社区增派科技人员,建立移民培训中心,传授移民新型生产方式和耕作技术,提高移民自身文化素质,使移民明确看到未来的生活将优于现在,克服和消除移民“等、靠、要”思想,同时鼓励其利用各种途径勤劳致富,自力更生求发展,有针对性地培训移民的生产和就业技能^[9],加强其市场经济意识,提高移民中自谋职业群体的市场竞争力,使其心态随着搬迁后生产生活的稳定而较快的重新稳定。

d. 广泛开展各种精神文化活动,大力倡导科学文明的生活方式,提高移民的文化素质和修养,引导移民树立道德观念、纪律观念、民主法制观念,培养社区文化意识,使移民真正对社区产生认同感和归属感,进而更快地融入当地的社会文化生活。

e. 完善移民管理系统和申诉渠道,建立完善的移民社会保障管理实施机构,提高非自愿移民社会保障工作的专业人员素质,进一步完善“开发性移民政策”,从而保障移民的合法权益。根据国家有关的政策法规,尽快研究、制定和出台相应的工程非自愿移民后期扶持规范^[10],建立完善的资金补偿制度,将前期补偿后期扶持改为等额补偿等,以维护移民安置区社会和谐、稳定为核心,以后期扶持资金、项

目管理为重点,全面启动实施移民后期扶持规划。

参考文献:

[1]缙元有,王君华.论水库移民的社会适应性调整[J].华北水利水电学院学报,2000,16(3):77-78.

[2]黎昕.社会学视野下的工程移民研究[J].福建论坛:经济社会版,2001(9):74-76.

[3]李华,蒋华林.论三峡工程移民的社会融合与社会稳定[J].重庆大学学报:社会科学版,2002,8(2):39-40.

[4]张鹏,刘晶.三峡库区外迁移民的心理问题分析及对策[J].人民长江,2007,38(12):109-110.

[5]刘成斌,雷洪.三峡移民的角色行为障碍[J].社会实证,2001(8):14-16.

[6]廖蔚.当前我国水库移民的文化冲突与保护[J].农村经济,2005(2):86-87.

[7]陈阿江,施国庆,吴宗法.非自愿移民的社会整合研究[J].江苏社会科学,2000(1):83-85.

[8]段跃芳.开发性移民政策:概念框架、应用及发展[J].汉江论坛,2007(7):133-134.

[9]金明良,侯晓.水库移民社会适应性调整措施初探[J].人民长江,2005,36(8):55-56.

[10]王斌.改进移民安置规划设计适应新的移民法规政策环境[J].水力发电,2007,33(12):1-4.

(收稿日期:2008-11-11 编辑:方宇彤)