

系统动力学方法在水资源系统中的研究进展述评

朱洁^{a,b}, 王烜^{a,b}, 李春晖^{a,b}, 蔡宴朋^a

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

摘要: 系统动力学方法具有反馈控制理论在水资源系统的动态变化及系统运行的因果机制分析中优势显著。本文简要介绍了系统动力学方法的特点及发展历程, 随后从水量、水质和水生态 3 方面系统地分析评述了系统动力学方法在水资源系统研究中的应用及其进展状况, 指出系统动力学方法能很好地适应水资源系统自身特点和发展趋势, 并提出了系统动力学方法在未来水资源系统研究中的发展趋势主要包括扩展研究尺度, 关注水资源系统的复杂性, 聚焦自然—人工复合系统和注重方法耦合互补等方面。

关键词: 系统动力学; 水资源系统; 水量—水质—生态耦合系统; 述评

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)02-0032-08

Review on method of system dynamics applied in water resources system

ZHU Jie^{a,b}, WANG Xuan^{a,b}, LI Chunhui^{a,b}, CAI Yanpeng^a

(a. State Key Laboratory of Water Environment Simulation; b. Key Laboratory for Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: System dynamics method has a significant advantage in analysis of dynamic changes and causal mechanism of water resources system with its feedback control theory. First, this paper described the characteristics and development processes of system dynamics approach, then it systematically reviewed the progress in the applications of system dynamics method to water resources system from aspects water quantity, water quality and water ecosystems. The result showed that system dynamics method can well adapted to itself characteristics and evolution trends of water resources system. On the basis of progress review, the paper put forward the development trend of system dynamics method which mainly contain expanding research scale, paying attention to the complexity of water resources system, focusing natural—artificial composite system and coupling various methods to complement each other with their respective superiority.

Key words: system dynamics(SD); water resources system; water quantity—water quality—water ecology couple system; review

系统动力学(System Dynamics, 简称 SD)是始于 1956 年的一种研究复杂系统结构、功能与动态反馈行为机制的系统科学方法。SD 主要考虑系统的因果机制, 分析系统的结构与动态行为, 强调系统行为主要由系统内部的运行机制决定^[1]。SD 模型本质上是带时滞的微分方程组, 善于处理非线性、高阶次、多变量、多重反馈和复杂时变等现象, 擅长长期、动态和战略性的仿真分析与研究。同时在分析反馈环的基础上, 研究工作对数据和参数的广度和精度

要求相对较低。由于 SD 在复杂的非线性系统研究中具有不可替代的优势, 目前已经广泛应用于工业、农业、生态、环境等诸多领域^[2-5]。

近年来, 经济的快速发展与水源的严重污染和相对匮乏双重威胁之间的冲突日益激烈, 成为世界各国政府和学者所关注的焦点问题。水资源系统是社会—经济—自然可持续发展的信息反馈系统之一, 具有相对的独立性, 系统内部各影响因素间的因果关系较为复杂, 用 SD 因果反馈回路可以简单明

收稿日期: 2014-11-05; 修回日期: 2014-11-14

基金项目: 创新研究群体科学基金项目(51421065); 国家科技支撑计划课题(2011BAC12B02)

作者简介: 朱洁(1990-), 女, 湖南湘乡人, 博士研究生, 主要从事水环境过程模拟和水资源管理的研究。

通讯作者: 王烜(1973-), 女, 云南昆明人, 博士, 教授, 博士生导师, 长期从事流域水环境过程模拟及水资源管理研究。

确地反映各因素间的本质联系,真实有效地组织和揭示非线性复合系统内部各因素之间及因素内部的相互作用和反馈机制。因此,采用 SD 方法来研究亟待解决的水资源问题,可为水资源科学决策提供可靠依据,有利于实现我国环境和经济的可持续发展。

1 系统动力学方法的发展历程

SD 方法在从其产生到不断发展过程中,其独立的理论体系和科学方法已得到不断完善。SD 方法在国内外的发展历程可以归纳为 3 个阶段:①20 世纪 50-60 年代——初步创立阶段。SD 创立之初被称为工业动力学,首先应用于工业管理系统分析。随后以城市系统为例说明 SD 方法在系统分析、决策和预测中具有适用性。后来的研究扩展了城市动力学模型,并将模拟编译系统发展成为 SD 专用编程语言 DYNAMO。②20 世纪 70-80 年代——发展成熟阶段。这一阶段的标志性成果主要是 SD 世界模型和美国国家模型的研究,并揭示了一系列西方国家经济发展的内在机制问题。这些研究为 SD 方法在全世界得到传播和发展提供了基础。20 世纪 70 年代末 80 年代初,SD 方法引入中国。随后国内 SD 学会筹委会等机构的成立进一步推动了 SD 方法在中国的研究。③20 世纪 90 年代——广泛应用阶段。期间,SD 方法在全世界范围内得到了广泛的应用和传播,并有了新的发展。其领域涉及宏观政策、物流供应链等方面,涵盖的问题从病毒免疫到福利改革,从工业发展到环境保护等^[6]。随着经济的快速发展,水资源的利用程度不断提高,系统结构愈加复杂,传统的分析方法难以解决如此庞大而复杂的问题,因而 SD 作为研究复杂的非线性系统的有效手段,在水资源系统中的应用日益广泛。

2 系统动力学方法在水量-水质-水生态耦合系统中的应用

水资源系统指包括水量、水质和水生态在内的耦合系统^[7]。水资源系统错综复杂,其经济效益、社会效益和环境效益等目标函数众多,具有动态性、多层次、开放性和非线性等特点,且水资源系统内部各个主体的行为复杂,以个人行为为核心展开。同时,水资源系统作为一个整体,各部分之间具有关联性 & 反馈效应,互相影响,彼此制约。而 SD 方法的系统性思想和动态反馈机制能很好的表达水资源系统的复杂性问题。目前,SD 方法在整个水资源系统

研究中的最主要的研究热点依次为:水资源承载力,水资源供需平衡,水资源优化配置,水污染控制模拟和生态需水预测。SD 方法在水资源系统水质、水量和水生态 3 个方面的具体研究内容可以归纳为图 1 所示。需要指出,由于水资源兼具量、质特性,水资源可利用量是满足一定水质目标的水量,同时水质、水量的变化直接影响着生态系统的状态,因此各部分相互影响,很难孤立地存在。例如,在建模过程中,流速、流量等水量因素是影响水质的重要因素,也是制定 SD 水质优化方案的重要调控因子。在水资源可持续管理等研究中,需综合考虑水质、水量、水生态各部分的因素。

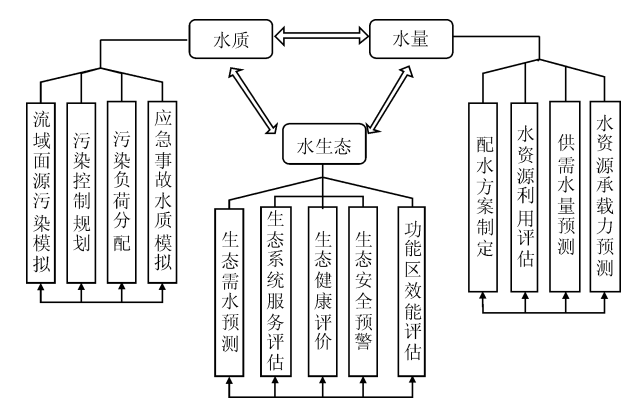


图 1 系统动力学方法在水资源系统研究中的主要应用

2.1 在水量方面的应用

相较于在水资源系统水质和水生态方面的研究,SD 方法在水量方面的应用研究最为广泛,主要集中在水资源承载力、供需水量预测等方面,以及其他如水资源循环利用、配水方案的制定和水资源稀缺性评价等方面。

2.1.1 水资源承载力 水资源承载力这一概念的提出始于 1991 年代尔夫特学术研讨会。后来,随着水资源系统复杂性逐渐得到广泛认可,水资源承载力逐渐成为研究热点,也为日后 SD 方法在水资源承载力和水资源系统中的应用奠定了基础。随着 SD 方法在水资源承载力中研究的深入,逐步形成了构建 SD 水资源承载力模型的一般步骤:确定系统建模的目的、确定系统边界、系统子块划分、建立因果关系流图、建立系统结构流图、水资源承载力量化方程的构建、模型运行与验证、情景模拟与政策分析。这一步骤在其他应用研究中也大体相似。其中最核心的两个环节为:①确定水资源承载力目标。基于不同需求和情境下,如现状趋势延续、经济发展、水资源节约和综合协调发展等发展模式下水资源承载力的变化是近几年水资源承载力研究的重

点。文献[8]中 SD 模型灵活地融合各目标和发展模式,高效地预测进而助力于分析水资源承载力,一定程度上也说明多目标多情景的快捷有效模拟是 SD 方法得以在水资源承载力领域中广泛应用的的优势之一。②构建水资源承载力指标体系。指标体系多综合考虑当地水资源供需、非常规水源利用、缺水程度、城市化率等因素,建立了如工业、农业、生活、生态需水和水资源、水污染等子系统。后来,随着研究的进步,还将建筑业、旅游业等兼顾区域特性的子系统纳入相应指标体系^[9]。另外,相比以往多采用可承载的城镇人口数量等常规正向指标的局限而言,如农业万元用水量等反向指标的出现是一个突破,丰富和完善了水资源承载力指标系统,也使以此构建的 SD 模型反馈机制更为合理。由此也充分体现 SD 方法的系统学观点的优势所在。对于同时受自然和人工叠加影响的复合系统,SD 方法能系统性地考虑其各个方面,并可根据不同子系统的实际情况而有所调整,有利于实现更切实可行的预测和制定调控政策。

纵观 SD 方法在水资源承载力中应用的文献不难看出,研究主要集中在与人类活动密切相关的大中城市的人工水资源系统,这在一定程度上与水资源承载力概念本身有关。目前,较传统的承载力研究主要考虑包括污水回收子系统、城市环境子系统以及水资源开发子系统等在内的相关子系统,建立相应水资源承载力 SD 模型,按不同水资源规划方案来模拟预测水资源承载力变化趋势^[10]。而预测的供需缺口,对提出经济和水资源和谐发展的建议方案具有重要意义。近年来,面向流域水资源承载力^[11],重点讨论水资源、工业、农业和人口等系统之间的关系,并详细解释系统内不同变量间反馈关系,旨在合理开发流域水资源的 SD 方法研究渐多。可见,考虑自然水资源系统中的人为影响已成为 SD 方法在水资源系统研究中的另一突破点。另外,地下水领域资源承载力的仿真研究^[12]也开始有所涉及。这些成功应用表明 SD 方法在水资源承载力研究中有较高的适用性。

2.1.2 供需水量预测 水资源供需平衡在 SD 方法的应用中极为重要,几乎在水资源系统中建立的 SD 模型均基于水资源供需平衡原理展开研究。因此,水资源供需平衡理论是 SD 方法在水资源系统中应用的核心。依据水资源供需平衡原理建立的不同目标决定了 SD 方法在水资源系统中应用的多样化。目前,SD 方法在水资源需水预测中的应用主要

涉及工农业需水、市政需水、流域需水和区域用水结构等方面^[13]。这些研究共同之处在于多通过在区域和城市、湖泊、平原和山峰等的实例应用,建立了主要行业的较全面的社会经济-水资源-生态环境 SD 模型^[14],为目标区域水资源综合规划及长期供水规划的制定提供依据。这也是近年来供需水量预测领域较为主流的应用研究。这些在经济跨越式发展区域和自然风景区等的应用,说明了 SD 方法的广泛适用性,而应用中多个指标的科学验证证明了 SD 模型的合理性。同时,研究也表明 SD 方法可用于科学预测短、中期的供需水情况,这对合理制定水资源利用战略意义重大。此外,当前立足于水资源供需平衡,从再生水和节水的角度探索水资源循环利用等过程的动态模拟是 SD 方法在供需水量预测领域应用的进一步延伸^[15]。近年来,由于水利工程的兴起,水价机制、水保系统^[16]等水资源管理系统对供需水影响在 SD 模型中也渐有引入,这也是水资源供需预测领域的一个较新的研究点,将为调水、供水政策提供一定的科学指导和借鉴。

2.1.3 水资源优化配置 水资源优化配置是用 SD 方法模拟水资源系统的重要目标之一。就水资源最终配置手段而言,城市水分配和流域水资源配置最终都依靠水库调水来完成。因此,从水库调水的角度来说,SD 方法在水资源优化配置的应用研究中多以水库库容动态变化子系统为核心,以水库调度规则为建模规则来建立水资源优化配置 SD 模型。在众多水资源优化配置 SD 模型中,入库径流、蒸发渗漏、回归水量、供出水量、弃水量和调入水量等因素之间的基本因果关系是研究的一个重点^[17]。同时,通过设置水库蓄水状态变量及径流量、蒸渗量等流率变量,运行不同的调水规则得到不同的水资源优化配置方案,从而为科学合理调水提供依据。相比机理模型,SD 方法虽然需要的参数数量较少,但计算精确度相对较低,因而在对某参数建立系统动力学方程时,若通过对部分重要参数数据做可能的统计分析等前期处理来提高参数的模拟精度,从而进一步提高所建 SD 模型可靠性具有可行性和实际意义。

另一方面,SD 方法在水资源优化配置中的应用研究主要从水资源系统调控出发,立足于水资源供需平衡,主要考虑不同因素下流域或区域的水资源配置方案优化。初期的研究多为按照标准规划、经济优先、生态优先、水资源基本需求和缺水量等多种原则来制定相应的水资源分配方案。但一般此类水资源分配方案由于具体环节考虑较粗略,科学说服

力尚有待提高,一般多作为趋势和分配方向上的指导和借鉴。在此基础上,部分改进的研究将评价方法引入制定的水资源分配方案中,在制定方案后,选取一系列具体的分级指标来综合评选最佳分配方案,使水资源得到充分利用^[18]。同时,由于环境流量概念的兴起,最小环境流量、基础环境流量、污染净化环境流量在水资源分配方案中的体现也有逐渐明显的趋势^[19]。另外,水资源回收利用的机制也正成为利用SD方法解决水资源优化配置问题的一个新的突破点^[20]。Schlüter等^[21]比较了基于多目标遗传算法和SD方法的水资源配置方案,表明利用SD方法的闭环反馈水资源优化配置模型更能显著地减少区域缺水量,更为合理可靠。此外,马军霞等^[22]首先提出了人水系统(即人文系统与水资源耦合的复杂系统)这一概念,并基于SD原理,提出了更具实用意义的嵌入式SD模型,并将水库调度模块、水文模型模块等嵌入到SD模型中,并已运用于实例研究,表明该嵌入式SD模型更适用于人水系统演变模拟。这些应用案例表明,SD方法是一个具有包容性的方法,能适时地接纳和融合新的概念,具有广阔的发展应用前景。同时,嵌入式SD模型的提出一种SD方法新的应用方式,其成功的实例应用表明这将是SD方法可行的发展方向之一。

2.2 在水质方面的应用

在人口众多,产业结构和布局不尽合理的历史背景下,水污染过重等水质问题是国内和国际水环境领域的焦点和难点问题之一。因此,目前SD方法在水资源系统水质方面的应用研究基本围绕水污染控制这一核心问题。总体来说,SD方法在水污染控制中的应用主要集中在常规水污染模拟控制方面,如流域面源污染模拟、污染控制规划和污染负荷分配等问题。这些应用使得SD方法在水污染控制系统研究中得到推广。同时,由于研究的进一步拓展,再加上近年屡发的溢油、洪旱等灾害的推动,促进了SD方法在应急事故水质模拟问题等方面研究。以下对这两方面的研究进展进行简要的阐述。

(1)在常规水污染模拟控制中的应用。SD方法在常规水污染模拟中的研究基本在近20年才密集地开展,之前研究较少。由于水污染覆盖范围较广,研究涉及城市、河流及库区等诸多区域和流域^[23]。比如,在此领域应用早期,备受瞩目的三峡库区的水污染状况模拟、污染因子的影响研究和污染控制方案曾是其中一个重要的应用。通过选取代表性指标,建立反馈机制,揭示了库区流域主要污染

因子的动态行为对库区水污染的影响^[24]。近年来由于对人工湿地的关注,考虑人工湿地的污染物浓度变化,致力于人工湿地的管理和设计的相关研究成为一个较新的研究角度^[25]。在内容上,污染源研究一直是水污染模拟研究的重点。近来的突破在于倾向从反馈回路的角度深入分析,并针对其负反馈系统提出相应控制对策。另外,水污染负荷分配是研究的难点,研究多基于地表水区域功能规范和下游断面的最大污染负荷分配量,选取指示指标,按照不同时期不同河段断面污染负荷分配的区间范围,实现污染总量控制和负荷分配^[26]。

近年来,SD方法与传统的水环境模型的耦合日益成为SD方法在水污染模拟控制中较新的应用研究领域。由于数学模型计算快速、准确,但目前水质模型大多结构复杂,参数多而难率定,可调控性小,因而以袁绪英等^[27]为代表的研究者试图将相关的有限差分方程引入相应SD模型中,利用SD擅长研究长期动态复杂系统的特点,构建SD-水质耦合模型。研究表明,耦合后可实现水质指标长时间序列的快速连续模拟和不同发展模式下水质管理的情景分析,在此基础上,分析调整如三产比例、提高城镇化率与集中处理污水等因素对流域纳污能力及水质改善的影响,从而制定出协调经济发展、水环境保护及其他方面之间矛盾的合理方案,为类似地区的可持续发展提供一定借鉴作用。

(2)在突发水污染事故水质模拟中的应用。目前国内外关于突发水污染事故的水质模拟系统研究还不够成熟,SD方法作为其中一种尝试,在众多突发事故水质模拟中表现出了一定的优势,其中以松花江水污染事故为典型代表^[28-30]。同时,由于系统动力学软件STELLA具有数组功能,将河流分段模拟,并能表现突发污染物在时间及空间上的动态变化。若引入相应数学模型,模拟的速度和精度也将进一步提高。这些都对控制突发性污染物意义重大。可以看出,相比大多数水质模型而言,系统动力学方法所建模型除了能模拟污染物浓度的变化,更可以灵活调整模型,预测各水文状况下水污染控制系统的相应行为变化,从而制定相应的应急策略,这是SD方法在突发性水污染事故水质模拟领域的一个重要特色及优势所在。随着突发水污染事故的发生频率和风险不断增加,SD方法的相关应用研究可望进一步深入。

2.3 在水生态方面的应用

近年来,随着各国政府、学者和社会各界对流域

社会经济与自然生态协调发展的日益重视,河流等水生态环境建设步伐被进一步推进,同时,随着 SD 方法在解决社会-生态这一复杂问题上优势的日益凸显^[31],SD 方法在水生态系统领域的应用逐步得到拓展。在众多研究中,落脚点主要集中在各内陆水域、河口和海洋生态环境等,主要涉及藻类、浮游植物等水生生物群落的动态模拟^[32]。同时研究覆盖广泛,主要集中在生态需水量预测、生态系统服务价值核算、水生态承载力预测几个方面,其他方面涉及如水生态健康评价、水生态安全预警、水生态补偿,以及流域灌溉系统、水产养殖等对水生态系统的影响等^[33-36]。

(1)生态需水量预测。生态需水是自 20 世纪中后期开始在我国引发激烈讨论的一个较新的概念。在国际上,生态需水源于美国解决渔业生态学问题,我国则源于在西北地区水资源的综合开发利用。生态需水研究虽起步较晚,但进步较快。至今,中国大多数生态需水研究以河道内生态需水和河流等各类自然生态系统生态需水为主,SD 方法在生态需水量预测的研究中,主要侧重在后者。其研究多与水文结合,以整个水循环系统及过程为核心,着重考虑制约该类需水量的关键因素,比如大气降水及蒸散作用,建立相应 SD 模型,预测生态需水量的动态变化趋势。在部分 SD 模型中,建立了汇流模型,参数的物理意义明确,汇流过程描述得较为清晰精确,考虑因素较为全面^[37]。在水资源短缺安全预警系统领域,刘振乾等^[38]利用生态需水动态变化趋势中最小生态需水量的临界值为依据,研究其安全阈值,并设计出了独立的生态流计算模块,这是生态需水量计算的一个进步,可用于水资源安全预警等较多领域。同时,对城市及常规区域生态需水研究,在灌区等特殊区域生态环境需水量研究等方面成果也较为丰富,对城市水资源管理具有显著的实践指导意义。研究多以生态需水理论和多目标规划理论为基础,根据各区域发展需要和特点建立多目标 SD 模型,从而预测不同目标下生态需水量^[39]。相比 SD 方法,常规的绿地生态需水核算的面积定额法局限性较大,这也在一定程度上体现了 SD 方法的适用性和优势。

(2)水生态系统服务价值核算。生态系统服务价值研究自 20 世纪 90 年代以来已成为国际生态学研究热点问题。但关于水生态系统服务价值核算的研究在近年来才逐步受到关注,其中用 SD 方法来进行动态分析的尚不多,目前总体上处于探索阶

段。比如 SD 方法在池塘等养殖生态系统服务价值评估中的应用^[40],研究所建的 SD 模型能综合考虑养殖生态系统最重要的正服务和负服务功能,通过饲料、水生植物、浮游植物等辅助因素的联接,按照食物供给生态系统服务、释放氧气生态系统服务、固氮生态系统服务和富营养化成本(负服务)等的核算,可以比较不同生产决策下其服务价值大小,对养殖生态系统颇具实践指导意义。

(3)水生态承载力评价。水生态承载力是从水生态角度来衡量自然生态系统对人类社会经济的承载能力。目前,水生态承载力研究在近几年得到逐步发展。研究多在于通过建立 SD 模型,模拟分析不同时空尺度下流域水生态承载力时空差异性变化特征,从区域和流域尺度上预测其生态承载力,进而评估其可持续发展程度,制定发展方案。Zhang 等^[41]运用 SD 方法,将流域水生态功能区分为不同单元,通过单元之间、单元内部及不同时间的耦合,建立“分区、分期”的流域水生态承载力模拟评价 SD 模型,从而实现流域水生态承载力的分区耦合优化调控。同时,SD 方法与其他方法的结合,由于便于考虑水生态承载力评价因子选定及评价过程中的不确定性成为研究重点。如 Xu 等^[42]将 SD 方法与层次分析法相结合,建立评价指标体系和区域水生态承载力 SD 模型,提出拟规划方法来解决某地区水生态环境问题,经过 SD 模型验证,最终得到一种协调节水、治污、水资源开发利用的综合规划方案。或联合采用 SD 方法、神经网络方法和马尔科夫链方法,评价分别基于不同政策方案下的城市水生态承载力,同时探讨不同方案造成水生态承载力差异的原因等。

总体上,与在水质、水量方面研究重点突出、内容相对集中不同,SD 方法在水生态系统方面的研究内容较分散,涉足面较广,但还不够深入。综观 SD 方法在水量-水质-水生态耦合系统中的应用,该方法能很好地适应水资源系统自身特点和发展趋势,具有广泛的适用性和良好的应用前景。

3 研究展望

以上研究表明,SD 方法以其对复杂系统结构行为及反馈机制动态模拟的优势在水资源系统领域中得到了十分广泛的应用,尤其在水资源承载力和水资源需水预测中成果颇丰,并在指导水资源优化配置及水污染模拟控制等水资源管理中发挥了不可估量的作用,推动了水资源系统的科学研究。尽管 SD

方法有很多优势,但在水资源系统中的应用研究尚待深入,未来SD方法在水资源系统中的应用将与水资源系统研究自身的发展相适应,并进一步挖掘SD方法在分析复杂系统动态性和各组分互馈机制之间的优势,研究的发展方向和趋势主要体现在:

(1)扩展研究尺度。近年来,为便于流域综合管理,水资源系统研究已从单个水体层面逐步扩展到流域层面。未来,大尺度是水资源系统模型研究的趋势之一。对于大型水资源系统,一般而言具有更丰富的基础数据,使得SD建模时参数估计有了更可靠的依据,因而模拟、验证和预测精度将提高。另一方面,相对于小型水资源系统,其系统的完整性更高,SD方法本身对其有更高的适用性。同时,在大型水资源系统下,某些原不便模拟的因素对系统产生的干扰影响将更小甚至可以忽略,必将提高SD模型模拟的准确性和说服力。因此,SD方法的应用向大尺度拓展这一发展趋势将进一步促进其在水资源系统研究中的应用。

(2)关注水资源系统的复杂性。水资源系统本身具有复杂性,随着研究的深入,水资源系统内部的复杂问题逐步成为进一步探索的重要问题。且随着研究尺度的加大,系统的复杂程度进一步加深。这种系统本身的复杂性和不确定性,使得水资源系统研究难度加大。由于SD方法可以动态地模拟复杂系统内部各环节时空上的行为变化和响应机制,同时可以通过人为调整模型来灵活全面地模拟复杂问题,这使得SD方法能适应今后更复杂的水资源系统研究,从而进一步推动其在水资源系统研究中的发展。

(3)聚焦自然—人工水资源复合系统。随着人类利用自然的领域逐渐扩大,对水资源系统的研究已由单纯的自然系统逐步扩展为自然—人工复合系统。但不论是自然还是自然—人工复合的水资源系统,综合化研究是其模拟研究的趋势,多层次的驱动变量和转化路径等将逐步被纳入到研究中,而系统、动态地研究水资源系统中的行为机制正成为研究的一个热点及难点问题。对于自然—人工水资源系统,人为调控仍是其显著特点。随着人为干扰的逐步加剧,其反馈机制及动态过程将更加复杂多变。SD方法由于擅长处理长期动态行为和有多重反馈、复杂时变等特征的系统,使得其未来将比常规机理模型优势更加明显,从而推动SD方法在自然—人工水资源系统中的进一步应用。同时,随着水资源的社会经济价值日益得到重视,SD方法在经济社会

子系统中的适用性将进一步突显,未来SD方法在城市水资源系统中的应用将着重于从人口、经济、生态、能源等角度,如水资源的供给消费等立足点来探索水资源系统的行为机制及调控手段。

(4)注重方法耦合互补。目前SD方法在水资源系统中的应用多为对SD方法及模型的单一应用,虽然已有研究者尝试将SD方法与其他方法结合,实现方法间的优势互补,但多种方法的联合运用尚需进一步加强。SD方法作为一种半定量分析的方法,要求研究者对模型整体的逻辑结构有较高的了解,因此,在对复杂系统进行定量分析时,可将SD方法与多目标线性规划模型和遗传算法、神经网络等算法结合,取长补短,使研究过程更加合理、系统和科学。其次,对于自然规律的研究,机理模型有准确可信的特点。因此,在动态反映系统反馈机制的SD模型结构下,结合相应机理模型中的数学方程来计算也是未来需要继续深化的有益探索,如SD方法与水质模型的结合可实现多情境长时间序列的水质快速连续模拟,有利于提高模拟预测的精度和模型的应用效率,促进SD方法在水资源管理中的进一步发展。

参考文献:

- [1] 张波,虞朝晖,孙强,等. 系统动力学简介及其相关软件综述[J]. 环境与可持续发展,2010,35(2):1-4.
- [2] Kaabi B,Ahmed S B. Assessing the effect of zooprophylaxis on zoonotic cutaneous leishmaniasis transmission:a system dynamics approach[J]. Biosystems,2013,114(3):253-260.
- [3] Mavrommati G,Bithas K,Panayiotidis P. Operationalizing sustainability in urban coastal systems:a system dynamics analysis[J]. Water Research,2013,47(20):7235-7250.
- [4] 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,2013,130:1-9.
- [5] 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(11-12):1-8.
- [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] 朱党生,张建永,史晓新,等. 现代水资源保护规划技术

- 体系 [J]. 水资源保护, 2011, 27(5): 28 - 31 + 38.
- [8] Wang Yanbo, Wang Songfeng, Zhou Peijiang. Estimating water environmental carrying capacity in Shijiazhuang city using system dynamics [J]. Environmental Science and Technology, 2006, 29(3): 26 - 27.
- [9] Lu L, Zhang X J, Li X P. Application of system dynamics approach on water demand prediction in Yingtan city [M] Wallingford: Int Assoc Hydrological Sciences, 2011.
- [10] Xue Bing, Song Xinshan, Yan Denghua. Simulation and prediction of water resources carrying capacity based on a system dynamic model in Tianjin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 43 - 47.
- [11] Wang Wei, Lei Xuedong, Yu Xinxiao, et al. Study on the region carrying capacity of water resources based on system dynamics (SD) model [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2005, 3(16): 11 - 15.
- [12] 王海宁, 薛惠锋. 基于系统动力学的地下水资源承载力仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2012, 29(10): 240 - 244.
- [13] Qi Cheng, Chang Nibin. System dynamics modeling for municipal water demand estimation in an urban region under uncertain economic impacts [J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(6): 1628 - 1641.
- [14] Wang Qun, Zhang Jinhe, Yang Xingzhu. Study on tourism water supply and demand system safety and dynamic control in Huangshan Mountain [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(6): 896 - 906.
- [15] Rehan R, Knight M A, Unger A J A, et al. Development of a system dynamics model for financially sustainable management of municipal water main networks [J]. Water Research, 2013, 47(20): 7184 - 7205.
- [16] 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.
- [17] Zhang Xuehua, Zhang Hongwei, Chen Bin, et al. Water resources planning based on complex system dynamics; a case study of Tianjin city [J]. Communications In Non-linear Science And Numerical Simulation, 2008, 13(10): 2328 - 2336.
- [18] Wang Wuke, Li Tongsheng, Xu Dongping, et al. A system dynamics study of optimal decision-making for water resource distribution in the Weihe River Basin [J]. Resources Science, 2008, 30(7): 983 - 989.
- [19] Wei Shouke, Yang Hong, Song Jinxi, et al. System dynamics simulation model for assessing socio-economic impacts of different levels of environmental flow allocation in the Weihe River Basin, China [J]. European Journal of Operational Research, 2012, 221(1): 248 - 262.
- [20] Sušnik J, Vamvakierodou-Lyroutdia L S, Savić D A, et al. Integrated system dynamics modeling for water scarcity assessment; case study of the Kairouan region [J]. Science of The Total Environment, 2012, 440: 290 - 306.
- [21] Schlüter M, Savitsky A G, McKinney D C, et al. Optimizing long-term water allocation in the Amudarya River delta; a water management model for ecological impact assessment [J]. Environmental Modeling & Software, 2005, 20(5): 529 - 545.
- [22] 马军霞, 左其亭. 基于嵌入式系统动力学的人水系统模拟及应用 [J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6): 6 - 9.
- [23] 荣绍辉, 王莉, 刘春晓. 系统动力学在水污染控制系统中的应用研究 [J]. 生态经济, 2012(4): 30 - 34.
- [24] Qin Cuihong, Guo Xiurui, Cheng Shuiyuan, et al. Water pollution control simulation of the Three-Gorge Reservoir based on the system dynamics [J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(5): 29 - 33.
- [25] Wang Yungchieh, Lin Yupin, Huang Chunwei, et al. A system dynamic model and sensitivity analysis for simulating domestic pollution removal in a free-water surface constructed wetland [J]. Water Air and Soil Pollution, 2012, 223(5): 2719 - 2742.
- [26] Fu Chun, Luo Zhenzhen, Tao Lin. Controlling policies of rural non-point source pollution surrounding Poyang Lake region; a system dynamics model [C]//. Proceedings of 2009 Conference on Systems Science, Management Science and System Dynamics, 2009.
- [27] 袁绪英, 吴宜进, 李星明. 流域系统动力学模型的全耦合问题研究进展 [J]. 环境科学与管理, 2012, 37(4): 68 - 72.
- [28] Marimon Z A, Xuan Zhemin, Chang Nibin. System dynamics modeling with sensitivity analysis for floating treatment wetlands in a stormwater wet pond [J]. Ecological Modeling, 2013, 267: 66 - 79.
- [29] Zhang Bo, Wang Qiao, Li Shun, et al. The system dynamics based research of water quality simulation in the Songhua River water pollution accident [C]//. Proceedings of The Conference on Systems Science, Management Science and System Dynamics; Sustainable Development and Complex Systems, 2007.
- [30] Zhang Bo, Wang Qiao, Li Shun, et al. Simulation of water quality for Songhua river water pollution accident using a one-dimensional water quality simulation model based system dynamics [J]. China Environmental Science, 2007, 27(6): 811 - 815.
- [31] Zhao Q J, Wen Z M. Integrative networks of the complex social-ecological systems [J]. Procedia Environmental

- Sciences,2012,13:1383 – 1394.
- [32] Garnier J, Nemery J, Billen G, et al. Nutrient dynamics and control of eutrophication in the Marne River system: modeling the role of exchangeable phosphorus [J]. Journal of Hydrology,2005,304(1 – 4):397 – 412.
- [33] Wang Shuo, Xu Ling, Yang Fenglin, et al. Assessment of water ecological carrying capacity under the two policies in Tieling City on the basis of the integrated system dynamics model [J]. Science of The Total Environment, 2014,472:1070 – 1081.
- [34] Garrido L, Sánchez O, Ferrera I, et al. Dynamics of microbial diversity profiles in waters of different qualities. Approximation to an ecological quality indicator [J]. Science of The Total Environment, 2014,468/469:1154 – 1161.
- [35] Gu Kangkang, Liu Jingshuang, Wang Yang. Analysis and prediction of ecological carrying capacity in mining cities of central Liaoning by system dynamics approach [J]. Progress in Geography,2009,28(6):870 – 876.
- [36] Davis A M, Thorburn P J, Lewis S E, et al. Environmental impacts of irrigated sugarcane production: Herbicide runoff dynamics from farms and associated drainage systems [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013,180:123 – 135.
- [37] 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.
- [38] 刘振乾, 王建武, 骆世明, 等. 基于水生态因子的沼泽安全阈值研究——以三江平原沼泽为例 [J]. 应用生态学报, 2002,13(12):1610 – 1614.
- [39] Du Jing, Li Binghua, Xu Ling, et al. A multi-objective system dynamic model for urban ecological water demand simulation: a case study of Dalian city, China [C]//. International Conference on Energy and Environmental Science, 2011.
- [40] 杨怀宇, 杨正勇. 池塘养殖(青虾)生态系统服务价值的系统动力学模型 [J]. 自然资源学报, 2012,27(7):1176 – 1185.
- [41] Zhang Z, Lu W X, Zhao Y, et al. Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Siping area of Jilin Province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process [J]. Ecological Modelling, 2014,275:9 – 21.
- [42] Xu Yi, Sun Caizhi. Simulation of water resources carrying capacity based on a system dynamic model in Dalian [J]. Journal of Safety and Environment, 2008,8(6):71 – 74.
- ~~~~~
- (上接第31页)
- [15] Guo Jun, Zhou Jianzhong, Qin Hui, et al. Monthly stream-flow forecasting based on improved support vector machine model [J]. Expert Systems with Applications, 2011,38(10):13073 – 13081.
- [16] 胡昌军. 基于改进相空间重构原理的支持向量机月径流模拟 [J]. 水资源与水工程学报, 2013,24(4):210 – 216.
- [17] 徐中民, 蓝永超, 程国栋. 人工神经网络方法在径流预报中的应用 [J]. 冰川冻土, 2000,22(4):372 – 375.
- [18] He Zhibin, Wen Xiaohu, Liu Hu, et al. A comparative study of artificial neural network, adaptive neuro – fuzzy inference system and support vector machine for forecasting river flow in the semiarid mountain region [J]. Journal of Hydrology, 2014,509:379 – 386.
- [19] Vapnik V N. The nature of statistical learning theory [M]. New York: Springer, 1999.
- [20] Chang Chihchung, Lin Chihjen. LIBSVM: a Library for support vector machines [J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2011,2(3):1 – 27.
- [21] Bowden G J, Dandy G C, Maier H R. Input determination for neural network models in water resource applications. Part 1 – Background and methodology [J]. Journal of Hydrology, 2005,301(1 – 4):75 – 92.
- [22] 张立杰, 赵文智, 何志斌, 等. 祁连山典型小流域降水特征及其对径流的影响 [J]. 冰川冻土, 2008,30(5):776 – 782.
- [23] Lin Gwofong, Chen Guorong, Wu Mingchang, et al. Effective forecasting of hourly typhoon rainfall using support vector machines [J]. Water Resources Research, 2009,45:1 – 11.
- [24] 中华人民共和国水利部. SL250 – 2000 水文情报预报规范 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- [25] Shu C, Ouarda T B M J. Regional flood frequency analysis at ungauged sites using the adaptive neural – fuzzy inference system [J]. Journal of Hydrology, 2008,349(1 – 2):31 – 43.