

# Application of System Dynamics in Hydrology and Water Resources, Review and Prospect

Jiuwei Ji, Hongyuan Fang\*, Jingyi Ji

College of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu  
Email:1250748309@qq.com, \*hyfang@yzu.edu.cn

Received: Aug. 7<sup>th</sup>, 2019; accepted: Aug. 29<sup>th</sup>, 2019; published: Sep. 17<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

The system dynamics is used for analyzing the internal causal feedback relationship of complex systems and simulating the development trend of dynamic behavior, which is more and more popular in the field of hydrology and water resources research. The practical application of carding system dynamics in the field of hydrology and water resources is reviewed in order to outline the method and model application. This paper first briefly introduces the characteristics and developments process of the system dynamics method, and then reviews the research and application progress of the system dynamics method in the field of hydrology and water resources, as well as the application characteristics and wide applicability; finally, from the perspective of expanding the scope and scale of research, focusing on the intersection of methods and disciplines, and integrating the concept of smart water conservancy, the development trend of system dynamics in the field of water science prospects.

## Keywords

System Dynamics, Hydrological Model, Research Progress, Review

# 系统动力学在水文水资源应用研究的进展与展望

吉久伟, 方红远\*, 纪静怡

扬州大学水利与能源动力工程学院, 江苏 扬州  
Email:1250748309@qq.com, \*hyfang@yzu.edu.cn

收稿日期: 2019年8月7日; 录用日期: 2019年8月29日; 发布日期: 2019年9月17日

## 摘要

系统动力学擅于分析复杂系统内部因果反馈关系和仿真模拟系统动态行为发展趋势的特征, 使其在水文水资源研究领域的应用愈加普遍。归纳梳理系统动力学法在水文水资源领域的实际应用状况, 以勾勒出其方法与模型

作者简介: 吉久伟(1995-), 男, 硕士研究生, 主要方向为水资源规划与管理。  
\*通讯作者。

应用的轮廓。首先简要介绍系统动力学方法的特点及发展历程,然后评述了系统动力学方法在水文水资源领域的研究与应用进展,以及应用特征和适用性;最后从扩大研究范围和尺度、注重方法与学科交叉研究以及融合智慧水利理念等角度,展望了系统动力学方法在水科学领域的发展趋势。

## 关键词

系统动力学, 水文模型, 水资源, 研究进展, 评述

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

系统动力学(System Dynamics, 简称 SD)是系统科学理论与计算机仿真紧密结合、研究系统反馈结构与行为的一门科学。SD 方法认为系统的行为模式与特点主要取决于其自身内部的结构,将整个系统作为反馈系统分析处理问题来得出合理的结论[1] [2]。SD 模型实质上是由系统内部变量、反馈回路之间的正负关系建立的因果数学模型,在处理非线性、多变量、动态性、时变性的复杂系统问题方面有优势,模型可用于测试理论,探索它们的影响和矛盾,观察建模系统的行为及其对于干预措施的反应,提高系统理解和支持利益相关者参与和建立共识的能力[3]。通常,系统动力学建模分析问题的思路是:了解分析确认问题、分析系统结构并绘制因果反馈图、建立系统动力学数学模型、模型测试与检验、根据方案和策略调整参数仿真模拟、分析结果得出结论[4]。

水资源短缺与水环境污染阻碍着社会经济的可持续发展,用水危机正在逐步地增大,因而水文水资源领域许多研究问题已成为学者专家普遍关注的焦点。同时,水文水资源系统是一个非线性、动态性、多变量的系统,SD 模型可以根据因果反馈回路图定性定量地分析水文水资源系统内部各影响因素之间复杂的关系,识别水资源问题的关键驱动因素,帮助决策者理解复杂系统各个相互关联子系统的相互作用,从而洞察动态行为的发展趋势[5]。因此,运用 SD 方法剖析水文水资源领域问题,有利于实现水资源持续利用和社会经济环境可持续发展。

## 2. 系统动力学的发展历程

SD 方法始创于 1956 年,是由美国麻省理工学院的教授 Forrester 提出的,该方法的发展历史主要经历了三个阶段:诞生初期、发展成熟期、广泛应用阶段[1]。20 世纪 50~60 年代,方法诞生初期主要应用于工业企业的管理,又被称为“工业动力学”。N. J. Mass [6]、W. W. Schroeder [7]、L. E. Alfeld [8]等学者扩展了城市动力学的研究,随后该方法的应用遍布了各个领域,也被改称为“系统动力学”。20 世纪 70~80 年代是 SD 高速发展成熟的阶段,这一阶段的标志性的成果就是系统动力学世界模型与美国国家模型的研究,从宏观层面分析了世界的能源衰竭问题,揭示国家经济长波的内在机制,同时在项目管理领域的应用取得很大的进展,如 K. G. Cooper [9]构建 SD 模型量化分析了美国军事造船工程成本超额的原因。这些研究成果使系统动力学得到世界广泛的关注。而在 20 世纪 70 年代末,SD 方法被引入中国。王其藩、杨通谊、许庆瑞、陶在朴等专家学者是先驱与积极倡导者,在 80 年代已得到广泛传播,并成立了多个 SD 研究协会推动了该方法在中国的发展,应用领域涉及人类社会与自然科学的众多领域[2]。20 世纪 90 年代至今,SD 方法在宏观、项目管理、学习组织型、物流与供应链、公司战略等众多领域内得到广泛的应用与传播。同时,SD 方法在水文水资源领域应用广泛,当前,SD 方法在水文水资源领域的应用研究在宏观层面可划分为水文和水资源两个方面的研究,但是在具体的研究过程中也互有交叉。在水文学方面,SD 多应用于研究区域的水文水资源特征,模拟其水文水资源过程,分析驱动型因

素对水文循环的响应作用等等；而在水资源方面，SD 应用研究范围更广，可以归纳为水量、水环境、水生态三个方面研究。目前基于这三个方面主要的研究热点有水资源承载力、水资源供需平衡、水资源优化配置、水环境承载力、水污染控制、水生态承载力和生态需水预测等研究[10]。

### 3. 在水文学方面的应用

近年来，受社会经济的发展，水资源开发利用程度进一步地加深以及人类活动的影响，流域的径流量不断呈现出下降的趋势以及降雨 - 径流关系的变化[11]。所以，流域的水文水资源变化特征是水文水资源领域的研究难点之一。目前，SD 方法在流域水文方面的应用主要集中在模拟流域的水文水资源演变过程，系统地分析流域水文水资源系统的驱动机制，揭示影响内陆湖泊水量平衡关键要素间的复杂关系。如朱漫莉[12]等结合了水文模型的物理机制与水文的非线性系统的理论，运用了 SD 方法构建了鄱阳湖流域水文水资源过程，分析了降水、气温、用水量等关键驱动要素对流域水位、流量的影响，在模拟流域的产流过程和河湖水量过程交换取得很好的效果。伊丽努尔阿力甫江[13]等建立了博斯腾湖水量平衡的 SD 模型，分析了湖泊水量失衡的原因，得出了人类社会活动的影响是导致湖泊水位下降的关键因素。

SD 方法在水文循环系统机制的研究中也多有应用。水文循环过程充满各种正负反馈机制，也可以看作一个复杂、动态有序、非线性的充满了各种正负反馈机制的系统，循环过程每一个环节都可以划分为子系统，如蒸发、降雨、径流等，这些子系统之间相互作用，相互联系。循环过程任一个平衡要素发生改变，都会影响区域的水文循环，SD 方法可以识别影响系统稳定的关键要素。如李艳[14]运用 SD 方法模拟了塔里木盆地水文循环过程，重点分析了输入水汽、温度变化、内循环系数、外循环系数这 4 个驱动因素对水资源变化的影响，并通过调整参数多情景模拟，为塔里木盆地的水资源可持续利用提供可能性。SD 方法不仅可以应用于水文循环的内生机制的研究，对于水文循环生态效应的研究也具有优势。比如研究生态系统中植被的根系吸水，蒸腾作用以及植被的配置变化等对流域水文循环的影响。刘挺[15]基于 SD 方法并综合考虑了叶生物量的变化、根生物量的变化、土壤水分对生态水文的影响构建了桉树生长用水模型，合理模拟了桉树用水与生长情况，为桉树的科学种植提供了建议，其对比于传统的生态水文模型，更具有系统化，综合化的优势，模拟效果更佳。从现有研究文献看，未来基于不同时空尺度的区域生态水文过程相互作用机制的 SD 模型是研究的方向[16]；同时，随着城市的水文过程受人类活动的影响越来越大，对于城市水文循环及其效应的研究会更加深入，所以模拟城市降雨、产汇流、蒸发等水文过程的 SD 模型的研究值得进一步的拓展。

### 4. 在水资源方面的应用

#### 4.1. 在水资源承载力研究中的应用

国内对于水资源承载力的研究起始于新疆水资源软件课题组[17]，经过几十年的研究，已经取得一定的成绩。但是就水资源承载力的概念一直没有统一的定义，基于研究的角度不同，水资源承载力的定义也不尽相同。目前主流的水资源承载力概念可以归纳为：水资源可持续开发利用最大能力[18]、水资源支撑发展最大规模[19]，笔者认为水资源承载力是指在一定的历史阶段，及特定的社会经济技术条件下，水资源所能支撑发展的最大规模，包括人口、经济、资源、环境等规模。水资源承载力系统可以划分为社会经济、生态环境、水资源等子系统，各子系统内部动态行为以及各子系统之间的相互作用难以识别，而 SD 方法是一种有助于识别驱动系统动态行为不同，揭示相互关联子系统之间相互作用的方法，可以帮助分析问题的发展趋势，并全面了解根源。同时，SD 方法的自组织性在多目标多方案模拟预测分析水资源承载力方面的优势，也促进了该方法在水资源承载力领域的应用[20] [21]。

梳理分析 SD 方法应用于水资源承载力方面的文献可以看出，该方法主要被应用于区域水资源承载力预测评价。如姜秋香[22]等基于城市供需水平衡和国民经济发展和生态环境平衡的目标构建了佳木斯市水资源承载力

仿真模型, 模型划分了 6 个子系统, 并对变量进行灵敏度分析, 选取了 8 个敏感变量, 通过调节参数, 设计了 4 种提高水资源承载力的方案, 对方案模拟仿真, 得出综合协调发展是最佳方案, 给解决佳木斯市水资源开发利用问题给予了帮助。YANG [23]等基于社会-经济-水资源复合系统的耦合效应和反馈机制构建了 WRCC-SDM 仿真模型, 定量地模拟分析了铁岭在 4 种水资源约束下方案下社会经济发展情形, 给铁岭的可持续发展提供了帮助。随着研究的深入, 研究的范围也从区域上升到流域, 研究的对象也从地表水资源延伸到地下水资源承载力[24]的研究。王洋[25]在传统的社会、经济、人口、生态、环境等子系统中增加了废污水子系统, 考虑废污水的回收利用和社会经济活动和生态环境等之间的反馈联系, 建立细河流域水资源承载力 SD 模型, 分析提高流域水资源开发利用方案。SD 模型不局限人类正常生产生活水资源承载力预测, 对于稀缺能源开采过程的水资源承载力研究也有涉及。姜孟[26]基于美国重要页岩气地的数据建立了区域页岩气开发水资源承载力 SD 仿真模型, 对中国页岩气开发过程中的水资源的合理利用提供启示。以上研究都说明 SD 方法对水资源承载力研究有很高的适用性, 灵活性。但是在水资源承载力研究过程中基于政策的不确定性, 应多结合节水型社会建设、最严格水资源管理制度、河长制、水生态文明建设、智慧水利等现代治水成果, 进一步提高 SD 模型的现实性和可行性。

#### 4.2. 在水资源供需平衡中的应用

水资源供需平衡分析是对于一个区域内水资源的可供应量与需求量对比分析, 揭示该区域供需平衡的矛盾, 分析问题并制定策略以提高水资源开发利用能力, 保障社会经济与生态环境可持续发展。传统的预测方法无法刻画与水资源供需紧密联系的社会经济、生态环境、人口系统之间复杂的反馈关系, SD 方法可以有效地解决这个问题。目前, 系统动力学在水资源供需平衡领域的应用, 主要从供给和需求两个角度建立社会经济-生态环境-水资源 SD 仿真模型, 模拟对比区域在短、中期供需水量的动态变化, 给出缓解区域水资源供需失衡的对策建议。同时, SD 可以适应多种目标及环境、背景来研究水资源供需平衡问题, 如水环境危机[27]、城镇化进展[28]、宏观经济[29]等背景下对水资源供需平衡影响。通常系统动力学与二次供需平衡分析方法结合可以更清楚地了解区域的水资源供需矛盾, 如秦欢欢[30]建立了水资源 SD 仿真模型模拟北京市供需水量, 首先依据现状分析未来水资源供需矛盾, 再基于第一次的结果, 采取节水, 提升水利工程供水能力等措施调节, 最后通过二次供需平衡分析, 以寻求解决供需不平衡的问题。另外, 除了缺水型城市的水资源供需失衡, 干旱半干旱地区的灌区水资源供需矛盾也愈发尖锐。于是杨明杰[31]利用 SD 模型定量分析了玛纳斯河灌区的水资源供需状况, 基于水资源系统的敏感性的分析, 提出了六种方案, 模拟得出节水与治污相结合才有利于解决玛纳斯灌区水资源的可持续性发展。上述研究多是对于地表水的研究, 但是地下水也是一种重要的供水资源, 维持地下水的可持续性也是水资源问题研究的重点。Alireza Ghasemi [32]等利用 SD 方法模拟多种不同情形下、不同气候条件下德黑兰市未来 30 年水资源短缺量和地下水资源变化量, 为水资源供需策略措施的制定给予合理的建议。未来, 随着我国节水型社会的建设开展, SD 方法基于节水的思想, 对再生水的循环使用及水价调节政策背景下水资源供需平衡分析等也将是新的研究切入点。

#### 4.3. 在水资源优化配置中的应用

水资源优化配置是指特定的区域内, 特定的原则下, 综合考虑市场经济规律和资源配置准则下, 通过工程与非工程措施, 对多种可利用水源在区域内和用水部门之间进行的合理的调配[33]。水库等蓄水设施的调控在水资源优化配置中具有关键作用, 基于 SD 方法的水库库容模型可以清楚地分析蒸发渗漏、入库径流、回归水量、供出水量、调入水量、弃水量等因素的变动引起的水库库容的动态变化。通常, SD 方法在水资源优化配置中的应用多是在区域的供需平衡分析的基础上, 将整个供水-需水过程视为一个完整系统, 构建供需平衡的系统反馈回路图, 追踪水资源动态变化情况, 根据不同的水量调度规则, 模拟多种水资源配置方法, 寻求水资源利用

效益最大优化配置方案。如 Maryam Ghashghaie [34]等以水库供水方案对下游水资源量影响最小为目标,运用SD方法分析供水对象优先级顺序对布坎水库下游流量的影响,模拟仿真得出最佳的需水优先级为农业需水、国内需水、工业需水和环境需水。李维乾[35]等引入区域盈余水量回收再配置的概念,也就是把区域内多余的水量回水当作一种新的供水来源再合理分配,建立了闭环反馈水资源优化配置SD模型;模型中以盈余的水量率作为速率变量,由盈余水量,回收比例,回收延迟来决定,调整这些参数合理地模拟了水资源配置过程。此外,我国是一个农业大国,提高灌区的水资源利用率,保证粮食的安全是重中之重,所以灌区的水资源合理配置是研究的另一个重点[36]。贾程程[37]等基于水资源供需平衡原理运用系统动力学软件Vensim分别建立了水田、塘坝、水库的水资源系统模拟模型,很好地描述丘陵地区灌区水资源系统的产用排水的过程,可以对中小型水库灌区的水资源合理配置提供一些借鉴作用。童芳[38]等基于“压力-响应-状态”的概念框架和系统动力学的理论,提出了区域水土资源联合优化配置模型构建的思路,较传统模型多添加了土地资源子系统,这也成为了SD模型在水资源优化配置应用领域的的一个突破点。上述应用多体现了SD模型在水资源优化配置中应用的优势,但由于SD方法的优化功能较弱,在应用过程中宜结合其他优化方法使用,以提高配置方案的准确性和优选性。

#### 4.4. 在水环境方面的应用

随着我国社会经济的快速发展,水污染现象日益严重。国家为此出台了诸如“最严格水资源管理”、“河(湖)长制”、“一河一策”等一系列政策法规和制度来改善水环境的质量。但是基于我国人口众多,产业结构还处于转型阶段的背景下,水环境问题仍是学者专家们研究的热点与难点。SD方法在水环境方面的应用主要可以归纳为两种:水环境承载力的预测评价,水污染控制。

1) 水环境承载力预测评价。水环境承载力是作为人类活动与水环境系统的联系界面,是判断社会经济与水环境系统是否协调的尺度[39]。目前,SD方法在水环境承载力方面的应用研究主要通过建立SD模型,分析水-生态-社会经济复合系统要素之间的反馈机制,从时间尺度上模拟在区域或者流域在不同政策或策略下水环境承载力动态变化,从而制定合理的发展方案,达到可持续发展的目的。王宪恩[40]等基于系统动力学构建了四平市地表水环境承载力模型,模拟仿真分析得出人口数量的变化是地表水环境承载力的主要影响因素。焦露惠[41]等针对对我国西北干旱区资源型缺水地区的特点,优化筛选建立了特定水环境承载力指标体系,运用SD方法模拟了体系中各指标之间关系,并结合层次分析法与隶属度的概念量化流域水环境承载能力,并成功预测了渭河在2010~2020年不同方案下的水环境承载能力,得出开源、节流、治污相结合的综合方案是提高流域水环境承载力的最佳方案。此外,基于SD方法对于复杂系统在时间序列上的动态研究的优势,也应用于水环境承载力的中长期的预警研究[42]。但实际上,水环境承载力系统的影响因子众多,但是在单个研究中基于研究者的主观思维,难以建立一个完整的,协调统一的模型,所以往往模拟的精度会受影响[43]。所以未来SD方法在水环境承载力的应用研究应往系统化,全面化的方向深入研究。

2) 水污染控制。在这一方面系统动力学多应用于水环境污染负荷模拟,污染物排放量的预测,水污染控制规划等;水污染影响范围甚广,其研究对象涉及到城市[44]、流域[45]、库区[46]、湖泊[47]等众多尺度不一的空间范围。其中流域的水污染控制研究成果丰富,于森[45]针对松花江流域水资源与水污染联合调度,着重从流域内水污染排放的源头分析,结合水资源消耗量、水污染排放量的现状与特征,分别构建农业、工业、畜禽养殖、生活子系统SD模型,最终形成松花江流域水资源-水污染联合控制系统模型,通过假设条件、设计方案模拟仿真,得出松花江流域的社会经济、生态环境可持续发展最佳方案。由于流域内每一个断面的水污染的状况不同,而不同水质的水资源供给对象也不同,所以对整片流域采用相同的策略调控,既不现实也不准确。于是高伟[48]等学者提出了流域分质水资源承载力的概念,将水源分为优质与一般两种水源,并基于SD方法构建了分质水资源承载力模型,根据模拟结果并结合当前经济社会发展模式和水资源管理现状,提出了牛栏江流域的不同污染状况下水资源合理开发使用的建议。对于一些突发的水污染事故,在发生时间和空间、污染强度、污染

类型、发生水域的水文条件有很强的不确定性[49]。当前,应用于水污染事故的水质模型结构复杂,且难以满足水污染事故时空动态模拟和预测的需要。SD模型在时间尺度上可以满足,但是空间尺度不足,因此张波[50]等构建了一维水质SD模型,并搭建GIS平台成功模拟污染物时空上动态变化,根据不同水文参数的调节模拟各种污染情况,从而及时给出应急策略,该模型在松花江流域水污染事故中成功模拟了硝基苯浓度在时空上的动态变化。总体来说,在水污染控制领域,SD模型与水环境模型,水质模型耦合的研究越来越多,嵌入式SD模型已成为新的研究热点。

#### 4.5. 在水生态方面的应用

近年来,我国大力推进水生态文明建设,践行“绿水青山就是金山银山”和维持水生态系统稳定是实现社会经济、生态环境可持续发展的基础等理念。目前,在众多相关研究文献中,SD方法在水生态领域研究的热点是水生态承载力的评价。水生态承载力是基于水环境承载力与水资源承载力融合发展形成的,专家学者在水生态承载主客体、不同量化标准等概念界定方面还未有共识。一般而言,水生态承载力可被定义为在一定的社会经济发展阶段下,区域内水生态系统自身结构功能长期稳定的前提下,能够承载人口最大规模和经济发展规模。所以,基于水生态承载力复合性、动态性的特点,SD方法在水生态承载力领域的应用研究具有优势研究[51][52][53],研究范围包括城市[54]、河湖[55]、流域[56]、库区[57]、海洋[58]等,应用的思路主要是基于水生态承载力的现状评价,建立SD模型预测不同情境方案下未来水生态承载力的潜力及水生态承载力的动态变化过程,从而评估区域的可持续发展程度。马涵玉[54]等建立的成都市水生态承载力SD模型,从时间尺度上分别模拟了4种方案下总需水量、COD入河总量、水资源承载限制系数、水环境承载限制系数、水生态承载限制系数的动态变化,为成都市可持续发展提供了技术依据。但是,SD模型只能模拟得出影响水生态的相关指标变量的数值,无法量化水生态的承载能力;所以在应用过程中,SD方法常常也和隶属度法、层次分析法、状态空间法结合使用,以达到评估水生态承载力的目的。靳超[58]等在对海洋承载力的研究过程中,通过spss筛选出合理的评价指标,建立了压力类、支持力类、经济发展类为目标层的指标体系,用层次分析法确定了各目标层的权重,采取了状态空间法来量化海洋水生态承载力,并给出承载力的等级范围,依据系统动力学模拟出的结果得出了惠州市的海洋生态承载力的等级,并给出了协调经济发展与生态环境的关系的相关措施。

此外,SD方法在水生态领域的应用研究还涉及到生态需水预测,如马永亮[59]等在分析上海崇明岛生态需水的现状的基础上,考虑社会经济要素,生态环境自身要素等与生态需水相关的各种要素,利用系统动力学方法构建崇明岛生态需水预测模型,解决了生态需水计算复杂性的难题。同时SD模型也已用于河湖藻类等水生植物、浮生植物的动态模拟[60],水生态安全预警[61],青虾等水产养殖的生态系统服务价值的估算[62]等方向。综合来看,SD方法在水生态方面的应用研究范围很广,但是研究的深度还有待提高。

### 5. 系统动力学在水文水资源领域中的应用特征与适用性

SD方法在水文水资源领域的应用充分发挥了其对复杂系统结构行为以及反馈机制动态模拟的优势。同时SD方法在该领域中应用研究主要侧重于为预测,通过绘制系统因果反馈图,识别复杂系统内部各关键要素的驱动响应机制,而后建立要素之间的数学方程,构建目标SD模型,最后基于当前的一组数据来预测捕捉时间尺度上的系统行为模式和趋势。这种应用思路特别是在资源承载力和水资源供需平衡预测研究中得到体现,研究成果对促进水资源可持续利用和水资源保护起到了决策参考作用。另一方面,水文水资源领域内的问题受社会经济发展,生态环境、水利相关政策影响深远,所以多方案设计、多情景模拟仿真也是SD方法在水文水资源领域重要的应用特征。

SD模型的结构是以反馈环为基础,多重的因果反馈环可以削弱大多数参数对系统行为模式的响应,即使因为部分水文水资源数据的缺失,也会使系统行为模式控制在误差范围之内。同时SD方法可以适时地接纳和融

合新的概念, 所以在水文水资源领域有广阔的应用前景和广泛的适用性; 但是由于水文水资源系统结构的复杂性, 通常需要掌握大量的专业知识以及跨学科知识, 所以对研究人员提出较高的要求。

## 6. 展望

前面阐述表明, SD 方法在水文水资源领域应用非常广泛, 特别是在水资源领域, 如水资源承载力预测、水资源优化配置、水资源供需平衡分析等方向已取得显著进展, 为提高水资源可持续开发利用能力提供了新的方法和思路, 推动了水资源管理的科学研究。SD 方法在水文水资源领域的应用研究还需进一步深入, 笔者认为, 未来的发展方向和趋势应体现在下述几方面。

1) 扩大研究范围和尺度。研究范围的扩展是系统动力学在水文水资源领域的发展趋势。如从小型的水资源系统向大型的水资源系统发展, 大型水资源系统的基础数据更加完善与可靠, 会大大提升模型的模拟准确性; 从单一的 SD 模型研究拓展到多向耦合 SD 模型研究, 如水土资源、水生态环境、人水和谐等综合模型的研究; 在传统的情形模拟之外, 增加低概率、高影响等突发情形设计, 如发生自然灾害, 并给出相应的补偿措施等; 这些拓展使 SD 模型的应用研究发展成多层次、多驱动研究, 综合化研究, 系统化研究。

2) 注重方法和学科交叉研究。SD 方法在水资源领域应用过程中, 许多研究人员都已经尝试将其与其他方法结合使用。如对于水污染时空尺度上的动态模拟, 用 GIS 技术弥补了系统动力学的空间尺度上的不足; 作为一种半定量分析的方法在量化水资源承载力, 水生态承载力的过程中, 可以与多目标规划模型、遗传算法、神经网络等算法结合, 提升该方法的科学性和效率, 提高模型模拟的准确性; 在构建 SD 模型之前, 运用敏感度分析、动态聚类等方法比对筛选指标。同时, 对于系统动力学在其他学科领域取得的成果也可以适度借鉴到水文水资源领域, 如基于 SD 的预警模型在经济领域、资源及能源领域取得的技术方法, 可以引用到水资源可持续利用研究。

3) 融合智慧水利理念。智慧水利具有将现代信息技术与传统水利深度融合的特征, 系统动力学应用研究应与智慧水利的发展结合起来, 将云平台大数据中心水环境监测数据、水库实时动态信息、水资源量等信息实时分享到 SD 模型中, 搭建一维、二维、三维可视化平台, 让决策部门及时应对处理问题, 从而制定合理的应对措施。如水资源承载力预警系统, 水主管部门通过云平台大数据中心, 实时获取水资源承载力预警 SD 模型中预警指标的数值, 并多次进行模拟计算, 一旦发现超过预警指标的阈值, 即刻给相关单位发出不同等级的示警信号, 让其及时采取调控措施。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(51379181), 江苏高校优势学科建设工程三期项目(2018~2021)建设学科基金。

## 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: 1-7.  
ZHONG Yongguang, JIA Xiaojing, QIAN Yin, et al. System dynamics. Beijing: Science Press, 2013: 1-7. (in Chinese)
- [2] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 1-8.  
WANG Qifan. System dynamics. Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 1-8. (in Chinese)
- [3] WINZ, I., BRIERLEY, G. and TROWSDALE, S. The use of system dynamics simulation in water resources management. *Water Resources Management*, 2009, 23(7): 1301-1323. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9328-7>
- [4] 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.  
ZHANG Bo, YU Zhaohui, SUN Qiang, et al. Introduction to system dynamics and related software overview. *Environment and Sustainable Development*, 2010, 35(2): 1-4. (in Chinese)
- [5] MIRCHI, A., MADANI, K., WATKINS, D., et al. Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. *Water Resources Management*, 2012, 26(9): 2421-2442. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0024-2>
- [6] MASS, N. J. Readings in urban dynamics (I). Cambridge: Wright-Allen Press, 1974.

- [7] SCHROEDER, W. W., SWEENEY, R. L. and ALFELD, L. E. Reading In urban dynamics (II). Cambridge: Wright-Allen Press, 1975.
- [8] ALFELD, L. E., GRAHAM, A. K. Introduction to urban dynamics. Cambridge: Wright-Allen Press, 1976.
- [9] COOPER, K G. Naval ship production: A claim settled and a frame-work built. *Interfaces*, 1980, 10(6): 20-36.  
<https://doi.org/10.1287/inte.10.6.20>
- [10] 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述评[J]. 水资源与水工程学报, 2015(2): 32-39.  
ZHU Jie, WANG Xuan, LI Chunhui, et al. Review on method of system dynamics applied in water resources system. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015(2): 32-39. (in Chinese)
- [11] 邱玲花, 彭定志, 林荷娟, 等. 气候变化与人类活动对太湖西苕溪流域水文水资源影响甄别[J]. 水文, 2015, 35(1): 45-50.  
QIU Linghua, PENG Dingzhi, LIN Hejuan, et al. Quantitative discrimination of climate change and human activities impacting on runoff in Xitiaoxi River basin. *Journal of China Hydrology*, 2015, 35(1): 45-50. (in Chinese)
- [12] 朱漫莉, 高海鹰, 徐力刚, 等. 基于系统动力学方法的鄱阳湖流域水量平衡过程模拟与分析[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 46-52.  
ZHU Manli, GAO Haiying, XU Ligang, et al. Simulation and analysis of water balance process in Poyang Lake basin based on system dynamic approach. *Water Resources Protection*, 2015, 31(3): 46-52. (in Chinese)
- [13] 伊丽努尔·阿力甫江, 玉素甫江·如素力. 基于 SD 模型的博斯腾湖水量平衡系统分析与仿真研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 126-133.  
YILINUER, A., YUSUFUJIANG, R. Analysis and simulation of the water balance of Bosten Lake based on system dynamics model. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(6): 126-133. (in Chinese)
- [14] 李艳, 张鹏飞, 唐晓春. 气候变暖背景下塔里木盆地水资源可持续利用[J]. 地理科学, 2011, 31(11): 1403-1408.  
LI Yan, ZHANG Pengfei and TANG Xiaochun. Sustainable utilization analysis of water resources under the background of climate warming in Tarim Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(11): 1403-1408. (in Chinese)
- [15] 刘挺, 苟思, 刘超, 等. 基于系统动力学的桉树生长用水模型构建[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 187-194.  
LIU Ting, GOU Si, Liu Chao, et al. Development of system dynamics model to simulate eucalyptus plant growth and water consumption process. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(6): 187-194. (in Chinese)
- [16] 杨大文, 丛振涛, 尚松浩, 等. 从土壤水动力学到生态水文学的发展与展望[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 390-397.  
YANG Dawen, CONG Zhentao, SHANG Songhao, et al. Research advances from soil water dynamics to ecohydrology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 390-397. (in Chinese)
- [17] 党丽娟, 徐勇. 水资源承载力研究进展及启示[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 341-348.  
DANG Lijuan, XU Yong. Review of research progress in carrying capacity of water resources. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3): 341-348. (in Chinese)
- [18] 惠泱河, 蒋晓辉, 黄强, 等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 30-34.  
HUI Yanghe, JIANG Xiaoqiang, HUANG Qiang, et al. Research on evaluation index system of water resources bearing capacity. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(1): 30-34. (in Chinese)
- [19] 汪党献, 王浩, 马静. 中国区域发展的水资源支撑能力[J]. 水利学报, 2000, 21(11): 21-26.  
WANG Dangxian, WANG Hao and MA Jing. Water resources supporting capacity for regional development in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 21(11): 21-26. (in Chinese)
- [20] 黄莉新. 江苏省水资源承载力评价[J]. 水科学进展, 2007(6): 879-883.  
HUANG Lixin. Assessment of water resource carrying capacity of Jiangsu province. *Advance in Water Science*, 2007(6): 879-883. (in Chinese)
- [21] 朱一中, 夏军, 谈戈. 关于水资源承载力理论与方法的研究[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2): 180-188.  
ZHU Yizhong, XIA Jun and TAN Ge. A primary study on the theories and process of water resources carrying capacity. *Progress in Geography*, 2002, 21(2): 180-188. (in Chinese)
- [22] 姜秋香, 董鹤, 付强, 等. 基于 SD 模型的城市水资源承载力动态仿真——以佳木斯市为例[J]. 南水北调与水利科技, 2015(5): 827-831.  
JIANG Qiuxiang, DONG He, FU Qiang, et al. Dynamic simulation of urban water resources carrying capacity based on system dynamic model—A case study in Jiamusi City. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015(5): 827-831. (in Chinese)
- [23] YANG, J., LEI, K., KHU, S., et al. Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model: A case study of Tieling City, China. *Water Resources Management*, 2015, 29(3): 885-899.  
<https://doi.org/10.1007/s11269-014-0849-y>
- [24] 姜孟, 李华皎. 基于系统动力学的区域页岩气开发水资源承载力评价模型研究[J]. 资源与产业, 2016, 18(6): 33-39.  
JIANG Meng, LI Huajiao. Evaluation model of regional water carrying capacity in shale gas development based on system



- dynamics method. *Resources & Industries*, 2016, 18(6): 33-39. (in Chinese)
- [25] 王洋. 基于SD模型的细河流域水资源承载能力研究[J]. *水力发电*, 2016, 42(6): 22-25.  
WANG Yang. Study on carrying capacity of water resources in Xihe River basin based on SD model. *Water Power*, 2016, 42(6): 22-25. (in Chinese)
- [26] 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.  
WANG Haining, XUE Huifeng. Simulation of groundwater resources reserve capacity based on system dynamics. *Computer Simulation*, 2012, 29(10): 240-244. (in Chinese)
- [27] 秦剑. 水环境危机下北京市水资源供需平衡系统动力学仿真研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(3): 671-676.  
QIN Jian. Dynamics simulation based on Beijing water supply and demand balance system under emergency situations. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2015, 35(3): 671-676. (in Chinese)
- [28] 杨开宇. 运用系统动力学分析我国城镇化对水资源供需平衡的影响[J]. *财政研究*, 2013(6): 10-13.  
YANG Kaiyu. Systematic dynamics analysis of the impact of urbanization on water resources supply and demand balance in China. *Public Finance Research*, 2013(6): 10-13. (in Chinese)
- [29] 秦欢欢. 北京市水资源供需二次平衡的系统动力学模拟与研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 21-27.  
QIN Huanhuan. System dynamics simulation and study on the second time balance of water supply and demand in Beijing. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(3): 21-27. (in Chinese)
- [30] 秦欢欢, 郑春苗. 基于宏观经济模型和系统动力学的张掖盆地水资源供需研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(1): 9-17.  
QING Huanhuan, ZHENG Chunmiao. Study on water resources supply and demand of Zhangye Basin based on macroeconomic model and system dynamics. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(1): 9-17. (in Chinese)
- [31] 杨明杰, 杨广, 何新林, 等. 基于系统动力学的玛纳斯河灌区水资源供需平衡分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(1): 174-180.  
YANG Mingjie, YANG Guang, HE Xinlin, et al. Analysis of water supply and demand balance in Manas River irrigation area based on system dynamics. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(1): 174-180. (in Chinese)
- [32] GHASEMI, A., SAGHAFIAN, B. and GOLIAN, S. System dynamics approach for simulating water resources of an urban water system with emphasis on sustainability of groundwater. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(18): 637.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-017-6887-z>
- [33] 王浩, 汪林. 水资源配置理论与方法探讨[J]. *水利规划与设计*, 2004(S1): 50-56+70.  
WANG Hao, WANG Lin. Discussion on theory and method of water resources allocation. *Water Resources Planning and Design*, 2004(S1): 50-56+70. (in Chinese)
- [34] GHASHGHAIE, M., MAROFI, S. and MAROFI, H. Using system dynamics method to determine the effect of water demand priorities on downstream flow. *Water Resources Management*, 2014, 28(14): 5055-5072.  
<https://doi.org/10.1007/s11269-014-0791-z>
- [35] 李维乾, 解建仓, 李建勋, 等. 基于系统动力学的闭环反馈水资源优化配置研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(11): 209-216.  
LI Weiqian, JIE Jiancang, LI Jianxun, et al. Water resources optimal allocation based on closed-loop feedback in system dynamics. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2013, 41(11): 209-216. (in Chinese)
- [36] 齐学斌, 黄仲冬, 乔冬梅, 等. 灌区水资源合理配置研究进展[J]. *水科学进展*, 2015, 26(2): 287-295.  
QI Xuebin, HUANG Zhongdong, QIAO Dongmei, et al. Research advances on the reasonable water resources allocation in irrigation district. *Advances in Water Science*, 2015, 26(2): 287-295. (in Chinese)
- [37] 贾程程, 张礼兵, 熊珊珊, 等. 基于系统动力学方法的灌区库塘水资源系统模拟模型研究[J]. *中国农村水利水电*, 2016(5): 72-76.  
JIA Chengcheng, ZHANG Libing, XIONG Shanshan, et al. Research on the simulation model for reservoir-pool water resources system in irrigation district based on system dynamics. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(5): 72-76. (in Chinese)
- [38] 童芳, 赵静, 金菊良, 等. 区域水土资源联合优化配置理论框架体系探讨[J]. *人民黄河*, 2017, 39(7): 92-95.  
TONG Fang, ZHANG Jing, JING Juliang, et al. Study on framework of regional integrated water and land resources optimal allocation. *Yellow River*, 2017, 39(7): 92-95. (in Chinese)
- [39] 解海静, 胡艳霞, 王亚芝, 等. 密云水源地水环境承载力系统动力学模拟与预测[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(11): 247-252.  
XIE Haijing, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al. Simulation and prediction of water environmental carrying capacity in watershed of Miyun Reservoir based on system dynamics mode. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(11): 247-252. (in Chinese)
- [40] 王宪恩, 胡若漪, 段思营, 等. 四平市地表水环境承载力影响因素研究[J]. *中国农村水利水电*, 2017(3): 96-102+111.

- WANG Xian'en, HU Ruoyi, DUAN Siying, et al. Research on the influencing factor of surface water environment carrying capacity based on a system dynamic model in Siping China. *Rural Water and Hydropower*, 2017(3): 96-102+111. (in Chinese)
- [41] 焦露慧, 吴巍, 周孝德, 等. 资源性缺水地区流域水环境承载力评价模型及其应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(6): 77-82.  
JIAO Luhui, WU Wei, ZHOU Xiaode, et al. Evaluation model and application of water environmental carrying capacity in basins short of water resources. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(6): 77-82. (in Chinese)
- [42] 崔丹, 陈馨, 曾维华. 水环境承载力中长期预警研究——以昆明市为例[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(3): 1174-1184.  
CUI Dan, CHEN Xin and ZENG Weihua. Investigations on the medium-to-long term early warning of water environmental carrying capacity—A case study of Kunming City. *China Environmental Science*, 38(3): 1174-1184. (in Chinese)
- [43] 赵卫, 刘景双, 孔凡娥. 水环境承载力研究述评[J]. *水土保持研究*, 2007(1): 47-50.  
ZHAO Wei, LIU Jingshuang and KONG Fan'e. Review on water environmental carrying capacity. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007(1): 47-50. (in Chinese)
- [44] 张勇, 赵挺生, 周爱姣, 等. 基于系统动力学的城市污水动态模拟[J]. *给水排水*, 2016(12): 131-137.  
ZHANG Yong, ZHAO Tingsheng, ZHOU Aijiao, et al. Dynamic simulation of urban sewage based on system dynamics. *Water & Wastewater Engineering*, 2016(12): 131-137. (in Chinese)
- [45] 于森, 蒋洪强, 常杪, 等. 松花江流域水资源-水污染联合调控方案动态模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(6): 1866-1874.  
YU Sen, JIANG Hongqiang, CHANG Miao, et al. Dynamic simulation scheme on integrated control of water resources and water pollution in the Songhua River basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(6): 1866-1874. (in Chinese)
- [46] 秦翠红, 郭秀锐, 程水源, 等. 基于系统动力学的三峡库区流域水污染控制模拟[J]. *安全与环境学报*, 2012, 12(5): 29-33.  
QING Cuihong, GUO Xiurui, CHENG Shuiyuan, et al. Water pollution control simulation of the three-gorge reservoir based on the system dynamics. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(5): 29-33. (in Chinese)
- [47] 王志芸. 基于系统动力学的高原湖泊流域污染负荷入湖总量预测的应用研究[J]. *生态经济*, 2016, 32(6): 179-182.  
WANG Zhiyun. System dynamic approach-based forecasting of watershed load into lakes. *Ecological Economy*, 2016, 32(6): 179-182. (in Chinese)
- [48] 高伟, 刘永, 和树庄. 基于 SD 模型的流域分质水资源承载力预警研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(3): 673-679.  
GAO Wei, LIU Yong and HE Shuzhuang. A system dynamic forewarning model of watershed dual water resources carrying capacity. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2018, 54(3): 673-679. (in Chinese)
- [49] 李阳, 张兆同. 基于系统动力学的水污染问题研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(34): 19491-19495.  
LI Yang, ZHANG Zhaotong. Research on water pollution problems based on system dynamics. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(34): 19491-19495. (in Chinese)
- [50] 张波, 秦宇, 郝千婷, 等. 水污染事故水质时空模拟和动态调控仿真系统研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2013, 38(9): 1108-1112.  
ZHANG Bo, QIN Yu, HAO Qianting, et al. The research of temporal-spatial simulation and dynamic regulation system of water quality on sudden water pollution accidents. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(9): 1108-1112. (in Chinese)
- [51] 谭红武, 杜强, 彭文启, 等. 流域水生态承载力及其概念模型[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2011, 9(1): 1-8.  
TAN Hongwu, DU Qiang, PENG Wenqi, et al. Watershed aquatic ecological carrying capacity and it's conceptual model. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydrology Research*, 2011, 9(1): 1-8. (in Chinese)
- [52] 张万顺, 齐迪, 幸娅, 等. 区域水生态承载力的量化研究与应用[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2011, 44(5): 560-564.  
ZHANG Wanshun, QI Di, XING Ya, et al. Quantitative study and application of regional water ecological carrying capacity. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2011, 44(5): 560-564. (in Chinese)
- [53] 王西琴, 高伟, 何芬, 等. 水生态承载力概念与内涵探讨[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2011, 9(1): 41-46.  
WANG Xiqing, GAO Wei, HE Fen, et al. Discussion on the conception and connotation of water ecological carrying capacity. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2011, 9(1): 41-46. (in Chinese)
- [54] 马涵玉, 黄川友, 殷彤, 等. 系统动力学模型在成都市水生态承载力评估方面的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(4): 101-110.  
MA Hanyu, HAUNG Chuanyou, YIN Tong, et al. Evaluating the water ecological carrying capacity of Chengdu City with SD mode. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(4): 101-110. (in Chinese)
- [55] 王卫军, 周孝德, 周彬翀, 等. 河流水生态承载力系统动力学模型软件开发[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2011, 9(2): 151-154+160.  
WANG Weijun, ZHOU Xiaode, ZHOU Binchong, et al. The development of river water ecological carrying capacity system dynamics model software. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2011, 9(2): 151-154+160.

---

(in Chinese)

- [56] 宋策, 李靖, 周孝德. 基于水生态分区的太子河流域水生态承载力研究[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(1): 7-12.  
SONG Ce, LI Jin and ZHOU Xiaode. Research on water ecological carrying capacity in Taizi River Basin based on water ecological district. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(1): 7-12. (in Chinese)
- [57] 蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望[J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 169-177.  
CAI Qinghua, SUN Zhiyu. Water environment and aquatic ecosystem of Three Gorges Reservoir, China. Progress and Prospects Journal of Lake Sciences, 2012, 24(2): 169-177. (in Chinese)
- [58] 靳超, 周劲风, 李耀初, 等. 基于系统动力学的海洋生态承载力研究——以惠州市为例[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(4): 537-543.  
JIN Chao, ZHOU Jingfeng, LI Yaochu, et al. Research on marine ecological carrying capacity based on system dynamics: A case study of Huizhou city. Marine Environmental Science, 2017, 36(4): 537-543. (in Chinese)
- [59] 马永亮, 邹春静, 孙卿, 等. 基于系统动力学的崇明岛生态需水量预测[J]. 生态学杂志, 2008(1): 140-144.  
MA Yongliang, ZHOU Chunjing, SUN Qin, et al. Prediction on ecological water demand in Chongming Island based on system dynamics. Chinese Journal of Ecology, 2008(1): 140-144. (in Chinese)
- [60] 李大勇, 王济干, 董增川. 基于生态系统动力学模型的太湖藻类动态模拟[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 124-131.  
LI Dayong, WANG Jigan and DONG Zengchuan. Dynamic simulation study of algal growth in Taihu Lake based on an ecosystem dynamics model. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(3): 124-131. (in Chinese)
- [61] 张梦婕, 官冬杰, 苏维词. 基于系统动力学的重庆三峡库区生态安全情景模拟及指标阈值确定[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4880-4890.  
ZHANG Mengjie, GUAN Dongjie, SU Weici, et al. Scenarios simulation and indices thresholds determination of ecological security in three gorges reservoir based on system dynamics. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4880-4890. (in Chinese)
- [62] 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.  
YANG Huanyu, YANG Zhengyong. System dynamic modeling on the valuation of ecosystem services in oriental river prawn (*Macrobrachium nipponense*) aquaculture ponds. Journal of Natural Resources, 2012, 27(7): 1176-1185. (in Chinese)