

系统动力学模型在健康管理领域中的应用现状

吴琦炜^{1,2}, 周慧洁³, 赵彬雨^{1,2}, 邵 静^{1,2}

- 浙江大学医学院附属第四医院护理部 浙江大学“一带一路”国际医学院 浙江大学国际健康医学研究院, 浙江 义乌 322000
- 浙江大学医学院护理学研究所, 浙江 杭州 310058
- 温州市人民医院护理部, 浙江 温州 325000

[摘 要] 健康管理因涉及多层面、多因素的交互影响而具有高度复杂性。系统动力学模型为理解这一复杂系统提供了整体性视角和动态分析框架。目前,系统动力学模型已应用于心理干预、慢性病管理、疾病康复、医疗服务优化、健康政策制订等多个健康管理领域,通过识别健康行为关键影响因素与路径、识别并确定健康管理干预方案的关键靶点、开展成本效益分析和流程优化,以及模拟健康管理相关政策的长期效果,为从个体干预到宏观决策提供量化支持。本文综述了系统动力学模型在健康管理领域上述四个方面的应用成果,以及应用优势和局限性,可为该领域相关从业人员利用系统动力学模型开展研究提供参考,旨在促进健康管理向个性化和精准化方向发展,为健康干预和政策制订提供更有力的支撑。



[关键词] 系统动力学模型;健康管理;模型研究;应用研究;综述

[中图分类号] R195.1 [文献标志码] A

Progress on the application of system dynamics model in the field of health management

WU Qiwei^{1,2}, ZHOU Huijie³, ZHAO Binyu^{1,2}, SHAO Jing^{1,2} (1. Department of Nursing, the Fourth Affiliated Hospital of School of Medicine, International School of Medicine, International Institutes of Medicine, Zhejiang University, Yiwu 322000, Zhejiang Province, China; 2. Institute of Nursing Research, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310058, China; 3. Department of Nursing, Wenzhou People's Hospital, Wenzhou, Zhejiang Province, 325000, China)

Corresponding author: SHAO Jing, E-mail: shaoj@zju.edu.cn, ORCID: 0000-0002-6744-

收稿日期(Received): 2025-06-16 修改返回日期(Revised): 2025-08-07 接受日期(Accepted): 2025-09-08 网络预发表日期(Online): 2025-09-15

基金项目(Funding): 浙江省自然科学基金(LY23G030008); 国家重点研发计划(2022YFF0902000)

第一作者(First author): 吴琦炜, 博士研究生, 主要从事老年健康与慢性病研究; E-mail: qiweiwu@zju.edu.cn; ORCID: 0000-0001-5656-2262

通信作者(Corresponding author): 邵 静, 研究员, 博士生导师, 主要从事老年健康与慢性病管理研究; E-mail: shaoj@zju.edu.cn; ORCID: 0000-0002-6744-5771

5771

[**Abstract**] Health management is highly complex due to interactions across multiple levels and factors. System dynamics modeling (SDM) offers a holistic perspective and a dynamic analytical framework for understanding such complex systems. It has been applied across various domains of health management, including psychological interventions, chronic disease management, rehabilitation, optimization of medical services, and health policy development. By identifying key factors and pathways influencing health behaviors, determining critical targets for interventions, conducting cost-benefit analyses and process optimization, and simulating the long-term effects of health policies, SDM provides quantitative support for decision-making from individual-level interventions to macro-level policies. This article reviews the application of SDM in these four major areas within health management, discusses its advantages and limitations, and serves as a reference for researchers and practitioners aiming to utilize SDM in future studies. The goal is to advance health management toward greater personalization and precision, thereby offering stronger support for health interventions and policy development.

[**Key words**] System dynamics model; Health management; Modelling study; Applied research; Review

[J Zhejiang Univ (Med Sci), XXXX, XX(X): 1-9.]

[**缩略语**] 系统动力学模型(system dynamics model, SDM); 人类免疫缺陷病毒(human immunodeficiency virus, HIV); 获得性免疫缺陷综合征(acquired immunodeficiency syndrome, AIDS)

近年来,人口老龄化进程加速、慢性疾病负担加重以及医疗资源配置失衡等问题日益凸显,现代健康治理体系面临前所未有的复杂性^[1]。这对疾病预防控制效能提升、医疗管理机制优化和健康政策科学决策提出了更高的要求,因此亟需构建能够系统解析疾病演化规律、精准预测健康风险趋势、支持管理决策的综合性研究框架,以实现医疗资源的动态优化配置,为健康政策的制订提供科学依据。

SDM作为解析复杂系统的创新范式,通过整合数学建模和计算机仿真,揭示多变量反馈回路的累积效应、解构非线性作用机制并模拟干预的长期效果^[2-3]。自20世纪50年代,Forrester教授为研究工业系统复杂性提出SDM后^[4],经Sterman教授的系统思维框架^[5]和Meadows教授的系统杠杆点理论^[6]等不断发展,应用逐步拓展至公共卫生领域^[7-9]。西方医学界不断开发各种公共卫生模型(如HIV/AIDS传播模型、糖尿病管理模型等),极

大推动了SDM在健康管理领域中的应用^[10]。我国在SDM应用方面的研究起步较晚、发展相对缓慢,SDM早期多应用于肿瘤筛查策略制订,直至2019冠状病毒病流行期间SDM显示出在复杂情境下的决策支持能力,才引起了研究者的关注^[11-12]。经过不断融合发展,SDM已成为揭示健康领域复杂系统行为和动态变化的重要工具。

Forrester教授提出识别到存量、流量和反馈循环这三个关键组件对于揭示系统运作、改进决策和系统设计至关重要^[13]。随着研究领域的拓展与演化,这三个组件在各领域内被类比和归纳,成为构建SDM的基础和关键概念(表1)^[5, 13-16]。

SDM建模一般采用的步骤如图1。首先确定研究目的及系统边界(如目标人群、干预措施、时间跨度等);其次通过文献回顾、专家咨询、群体模型构建等方法,整合专家知识、利益相关者观点或实证数据,识别关键变量并构建动态逻辑关系(表2)^[12, 17-49];随后输入收集的数据(如历史数

表1 系统动力学模型中的关键概念

Table 1 Key concepts in system dynamics model

概 念	描 述	用 途
存量	在给定时限内,系统运行过程中的能被测量、具有积累效应的系统状态量 ^[13] ,如糖尿病高风险人群数量、罹患糖尿病患者数量等 ^[14] 。数学表达式为: $Stock(t)=\int_{t_0}^t [Inflow(s)-Outflow(s)]ds+Stock(t_0)$	通过存量与流量的相互作用,构建具有因果关系的库存图,用于揭示复杂系统中的反馈与控制过程 ^[5]
流量	描述随时间变化进入或离开存量的变量,即存量的变化率 ^[13] ,如疾病发生率、疾病进展率等 ^[14] 。数学表达式为: $d(Stock)/dt=Inflow(t)-Outflow(t)$	
正反馈	又称增强反馈回路,会引起系统中的某个过程或效应持续增强 ^[5, 15] ,如增加健康饮食与生活行为、提高筛查效率等 ^[14, 16]	利用正、负反馈建立的反馈循环用于明确变量间因果关系和反馈机制,从而理解和预测系统的状态及行为 ^[5]
负反馈	又称平衡反馈回路,起到平衡或稳定系统的作用 ^[5, 15] ,如早期风险因素干预等 ^[14, 16]	

Stock:存量;Inflow:流入量;Outflow:流出量。

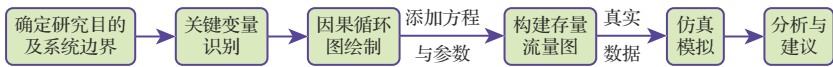


图1 系统动力学模型建模步骤示意图

Figure 1 Modeling steps of system dynamics model

据、文献数据等),对模型进行校验(如真实性检验、敏感性分析、鲁棒性分析等),最后输出最终模型。

健康管理涉及个人、组织和系统层面,受到行为、社会、经济和环境等因素的影响。秉持“同一健康”理念,通过患者、医护人员、决策者等多方主体共同制定干预策略与管理的模式,推动从预防到治疗的全周期健康服务,实现最佳健康结果^[50]。目前,SDM用于健康管理领域主要包括健康行为的关键影响因素识别、干预方案的关键靶点识别、成本效益分析及流程优化、健康管理相

关政策模拟方面。本文综述SDM在健康管理领域的应用成果,以期为健康管理领域相关从业人

员利用SDM开展研究提供参考。

1 健康行为的关键影响因素与路径识别

健康行为作为影响个体健康状况的关键因素,其形成与改变涉及复杂的多因素交互或协同作用。SDM能够将健康行为变化过程中的关键因素及其相互关系进行系统化建模,以此动态模拟健康行为的长期趋势。例如,Meisel等^[38]调取哥伦比亚国家营养调查(ENSIN)2010—2015年的数据,构建了包含身体活动、久坐活动和超加工食品消费在内的三种健康相关行为共流结构

表2 系统动力学结构构建方法及应用举例

Table 2 Methods for constructing system dynamics structures and application examples

构建方法	适用场景	优 势	局 限	应用举例
专家咨询(如函询法、会议法)	专家分散,须确定权重进行定量判断	结构化反馈机制、匿名制减少偏见、能够获得专家共识	耗时长、依赖于专家主观判断	[17-22]
群体模型构建	多方利益者参与,协同建模	整合多元视角,动态解决冲突,从而提高模型可信度	组织协调成本高	[23-31]
访谈	单独获取受试者对系统的认知、经验等信息,收集潜在变量	了解受试者行为动机和影响因素	主观性强、文本编码复杂、存在难以量化的可能性	[28, 31-32]
文献回顾	设定系统边界,确定前人验证的关键变量	获取先验变量,无需重复研究	文献间因方法学不同可能存在结论冲突	[17-20, 23-24, 26-28, 32-37]
逻辑推理	通过收集调查问卷或分析数据库识别变量间的潜在关系	可量化变量间关系;若采用现有数据库可节省研究时间和成本,并且数据具有时序性	需要大量高质量数据驱动	[12, 17, 21, 33, 38-43]
理论框架	一般与其他方法联用,用于基本模型结构的构建	确保研究的学术严谨性,能够提供解释逻辑	须与实际情况结合,或多个理解框架相结合来解释科学问题	[22-24, 26-27, 41, 44-49]

的SDM,通过模拟2010—2050年肥胖的动态变化以预测国家及区域层面体重指数等级间的转移率,为制订不同年龄和社会经济群体的控制肥胖政策提供支持。然而,在共流结构中对人口进行过于细致的分层可能导致数据稀疏而影响模型的精确度,提示优化分层策略的必要性。Oo等^[34]将既往文献中的关键参数置入群体模型构建确定模型结构,用于比较儿童龋齿的不同预防措施长期效果,发现监督刷牙和牙科密封剂联合使用能使儿童期啮齿发生率降低36.2%,进而支持龋齿强化预防计划。在系统动力学分析中,杠杆点是指能以最小调整实现系统最大改善的关键位置,尽管它处于制订和实施干预方案的上游阶段,但其最终转化为有效的行动方案仍需依托系统化的理论框架指导,以确保干预措施的科学性和可操作性^[6]。如荷兰开展的青少年肥胖生活方式项目,应用干预层级框架、参与式系统映射等方法识别青少年肥胖相关行为的9个杠杆点和8种机制,并通过行动变革理论制订行动策略^[23-24, 51]。该项目以这些不同层级的杠杆点作为起点,通过持续6年的监测、评估来制定并完善不同层级的行动方案^[51]。同样是通过层级关联来了解系统,Heemskerk等^[45-46]则基于行动尺度模型,通过多方利益相关者以协同创新方式来确定影响青少年睡眠的42个杠杆点,从而完成促进睡眠的行动设计。

2 健康管理干预方案的关键靶点识别

疾病治疗和康复过程中存在的高度复杂性和个体差异性给标准化干预方案的制订带来了挑战。SDM因其能够有效整合多元异构数据进行多尺度建模,在推动健康状态维持和延缓疾病发展方面显示出重要潜力^[17, 52]。Uleman等^[17]通过合并处理阿尔茨海默病神经影像学计划(ADNI)和澳大利亚影像、生物标志物与生活方式老龄化重大研究(AIBL)中的数据,利用纵向数据的差异,对阿尔茨海默病的可改变风险因素在干预和非干预状态下的临床发展轨迹进行了为期12年的前瞻性模拟,结果发现,相较于“一刀切”式干预,多因素和精准干预可能提升预防效果。Wittenborn等^[33]通过对正念认知疗法在青少年抑郁患者中的长期效果进行了分析,反向推导出不同应激源所致抑郁的异质性个体的治疗效果,提示SDM不

仅能够通过建模寻找关键干预靶点,而且能够验证和模拟不同特征人群的治疗效果,从而为个性化治疗和康复方案的制订提供依据。此外,作为“仿真平台”,SDM可突破传统试验的静态约束,模拟患者在复杂情境下的健康轨迹并识别最优干预靶点,如Hasgul等^[19]和Beaulieu等^[20]均建立SDM用于探究如何改善肿瘤患者的治疗体验,以期提高治疗进程中的健康相关生活质量。SDM还能实现从微观到宏观的多尺度反馈回路识别,揭示疾病康复过程中的动态机制,如Kenzie等^[18]以识别脑震荡患者内源性和外源性的关键康复要素为目的,构建了包含细胞、神经网络、神经认知改变和社会支持在内的多层次脑震荡康复动力学模型,为开展多学科合作提供框架。另一项关于系统动力学在脑外伤应用方面的综述指出,使用大规模数据构建的SDM,能够有效表征生物力学、神经化学及社会支持系统间的非线性相互作用,有望推动脑外伤护理共享范式的发展,为改善个体化治疗和康复护理提供可能性^[53]。

3 健康管理成本效益分析及流程优化

SDM能够模拟不同健康管理策略的成本效益和流程效率,通过评估其对资源分配和临床产出的非线性影响,为决策者在平衡临床效果与经济效益、优化资源配置路径等方面提供重要的量化决策工具^[54]。在成本效益分析上,Kang等^[26-27]建立SDM以明确多学科团队在慢性肾病患者疾病管理中的最佳组合,并利用多目标优化模型进行二次分析,以实现更复杂的资源管理规划(如治疗效果、绩效指标、人员配备等)。Natsky等^[29]召集当地不同利益相关者共同构建了青少年心理健康SDM,研究结果显示,综合实施反欺凌计划、社区康复服务和在线心理健康服务的组合策略,能强化跨部门的协同效应,可在10年内实现最优成本效益,其获得的质量调整生命年增益比单一策略简单叠加的效果提升了8.7%。在流程优化上,England等^[25]为寻求经济高效的老年紧急护理服务流程,构建了从需求发出到急诊就诊、入院或死亡的老年紧急护理全过程模型,评估了居家医疗服务、设立急性衰弱单元等措施在特定时间内对住院率和再入院率等影响,其中,设立急性衰弱单元可以降低3.5%的入院率、1.6%的住院率及22%的再入院率,为决策者制订

高效护理流程提供了决策依据。

4 健康管理相关政策模拟

SDM作为复杂系统的分析工具,有助于预测政策实施后的系统表现,从而为新政策制订和实施提供有力的支持和指导。Soler等^[44]采用预防影响模拟模型(PRISM)分析显示,干预社区肥胖和烟草控制的多政策联动可有效降低美国医疗开支、寿命损失和生产力损失。Shi等^[35]基于中国现有医养结合模式构建SDM,该研究发现政策支持对提升医养结合机构的绩效最为关键,且综合干预措施能产生“涌现效应”,即其对机构绩效的提升率超过各单一因素作用之和。由此表明,通过财政补贴、服务监管、人才培育等政府支持或将提高医养结合机构的绩效。在方案优选上,决策者可以利用SDM评估政策对关键结局指标的长期影响,如Selya等^[55]选取美国北达科他州青少年吸烟率22年的历史数据构建SDM,评估提高香烟税、增加控烟资金和加强售烟年龄限制的三项政策在降低青少年吸烟率方面的效果,结果显示,模型较好地再现了历史趋势,并预测到2032年这三项政策将分别使青少年吸烟率降低32.6%、7.0%和3.2%,且政策之间有叠加效果,为制订更有效的控烟政策提供了科学依据。在构建模型过程中,质性队列能够为SDM提供与政策变化相关的现实情境和行为机制信息,从而帮助模型更准确地模拟政策干预的实际效果,并提升其对系统响应机制的解释力,如Ahmad等^[28]整合文献综述和质性队列数据构建因果循环图,发现优化不同地区和社会经济背景的孕期保健服务时间安排,能够在资源有限的条件下明显降低新生儿死亡率。SDM也被用于肿瘤早期筛查服务体系的建模^[12, 21-22, 30, 40-42, 47-49],通过仿真模拟不同政策对癌症筛查覆盖率、经济及健康效益等影响,得出符合当下环境最优的组合政策措施。胡等^[43]为寻求我国老龄化背景下医疗保险基金的可持续发展对策,构建SDM模拟政策干预与自然发展情境下的医疗保险基金运行趋势,量化比较不同情境下的基金结余变化,进而为政策谏言提供科学论证。因此,SDM作为可视化工具能够直观呈现政策模拟结果,帮助决策者理解系统运行机制并优化改革政策,目前已在医疗人员配置^[36]、基本药物制度^[37]、分级诊疗制度^[31]等领域得到应

用,以支持相关政策的制订。

5 应用系统动力学模型的应用优势和局限性

5.1 系统动力学模型的应用优势

系统动力学模型在健康管理中的核心优势在于其能够深刻揭示并量化复杂系统中驱动行为随时间演变的反馈机制、时间延迟及累积效应,从而有效地模拟和评估不同干预策略的长期动态影响。

在个体管理层面,个体健康状态与其健康行为、外部环境等密切相关,具有复杂健康管理需求的特性。而SDM不仅能够探索和评估不同健康干预策略的潜在效果,有效降低试错成本,提高决策效率,而且其基于时间序列数据进行建模的特质,能够有效处理时间跨度较长的数据,因此在慢性病的个体管理中得到广泛应用^[7, 32, 56-57]。

在宏观管理层面,理解众多子系统(如医疗服务供给、社会保障、政策刺激等)及其复杂交互构成的健康系统,是实现有效管理的关键。SDM能够帮助决策者超越静态和局部的分析模式,识别影响系统行为的关键杠杆点和核心驱动因素。此外,由于宏观层面的干预措施往往因现实世界的限制性因素难以被大规模验证,通过SDM建模对不同干预手段进行量化比对分析,为健康管理的科学决策提供数据支持。Luke等^[10]认为,将SDM作为“虚拟实验室”应用于开发和测试复杂理论或机制以探究管理实施的动态过程,不仅能规避疾病爆发或经济损失等现实风险,还可作为与决策者进行可视化沟通的有效工具。

5.2 系统动力学模型的应用局限性

虽然SDM能够基于非精准或不完整的数据进行构建并且提供一定的洞察和预测价值,但其结果的准确性和信度需要谨慎对待。特别是医疗公共政策相关研究,其对高质量数据的依赖性强,须对数据质量仔细斟酌。另外,基于大型数据库的研究可能会因为数据更新缓慢而存在模型校准困难,导致策略及建议具有现实偏差风险。目前,我国的医疗健康数据往往分散在不同的数据库和记录系统中,格式多样且访问限制,使得高质量数据的整合和利用成为SDM研究的一个重大挑战。其次,SDM专注于从系统层面解构复杂事件,而诸如个体行为模式、人口学特征差异等微观层面会在建构中被不恰当处理甚至

忽略,存在局限性^[34]。因此,越来越多学者指出单一的仿真建模仍不能满足现代医疗领域的需求,须结合多个模型的优势,从视角、战略、技术等多层面协同解决精细化问题。早期的混合模型多为三角验证,即利用单个模型对输出结果分别验证^[58],而今,如系统动力学-代理人基模型(SDM-ABM)、系统动力学-离散事件仿真模型(SDM-DES)成为较常见的组合方式,应用于健康服务、流行病学、卫生政策制订等研究。尽管如此,目前混合模型缺乏有效框架指导和实证依据,尚存在理论与实践差距。因此,推动混合模型的发展过程中,仍需进一步加强理论研究和方法探索,以提高混合模型的应用效果和科学价值。

6 结 语

与传统方法相比,SDM在解决健康管理领域中复杂问题的能力已逐渐被认可。通过模拟健康系统中的交互作用和反馈循环,有利于帮助研究者从系统层面上理解和模拟其中的动态过程,揭示关键问题的潜在机制,为制订有效的干预策略和健康政策提供科学依据。目前,我国在健康管理领域开展的SDM研究仍较为有限,且多数研究聚焦宏观层面,如预测患病率、死亡率及政策实施发展趋势等,缺乏对个体异质性的深入探讨^[38, 57]。在识别和利用杠杆点以实现成本效益最优方面,现有研究缺乏干预措施与政策实施前后的量化数据对比,这可能限制了相关策略的制定与落实。此外,在使用历史数据进行模拟验证时,应充分考虑不同时期政策(如我国的“五年规划”等)实施产生的影响,以确保分析结论的严谨性。

随着大语言模型、智能体等新兴技术的兴起,SDM有望与这些技术深度融合,实现实时动态、非线性的预测和更智能的决策支持。这种跨学科融合不仅能拓展SDM的应用范围,还能促进健康管理向个性化和精准化方向发展,为健康干预和政策制订提供更有力的支撑。这一前瞻性的发展趋势将引导SDM在健康管理领域持续创新。

本文附加文件见电子版。

志谢 本研究得到浙江省自然科学基金(LY23G030008)和国家重点研发计划(2022YFF0902000)支持

Acknowledgements This work was supported by National Nature Science Foundation of Zhejiang Province (LY23G030008) and National Key Research and Development Program of China (2022YFF0902000)

作者贡献 吴琦炜、周慧洁、赵彬雨和邵静参与论文选题和设计或参与资料获取、分析或解释,起草研究论文或修改重要智力性内容。所有作者均已阅读并认可最终稿件,并对数据的完整性和安全性负责。具体见电子版

Author Contributions WU Qiwei, ZHOU Huijie, ZHAO Binyu and SHAO Jing participated in brewing and designing experiments, or acquisition, analysis, or interpretation of data for the work; drafting the work, or revising it critically for important intellectual content. All authors have read and approved the final manuscript, and take responsibility for the integrity and security of the data. See the electronic version for details

数据可用性 本研究未生成任何新数据集,所有分析数据均已公开,并已在文中明确标引

Data Availability This study did not generate any new datasets, all data analyzed are publicly available, and have been properly cited

医学伦理 本研究不涉及人体或动物实验

Ethical Approval This study does not contain any studies with human participants or animals performed by any of the authors

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests The authors declare that there is no conflict of interests

©The author(s) XXXX. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献(References)

- [1] WAGNER C, CARMELI C, JACKISCH J, et al. Life course epidemiology and public health[J/OL]. **Lancet Public Health**, 2024, 9(4): e261-e269.
- [2] PFENNING-BUTTERWORTH A, BUCKLEY L B, DRAKE J M, et al. Interconnecting global threats: climate change, biodiversity loss, and infectious diseases [J/OL]. **Lancet Planet Health**, 2024, 8(4): e270-e283.
- [3] XUE H, SLIVKA L, IGUSA T, et al. Applications of systems modelling in obesity research[J]. **Obes Rev**, 2018, 19(9): 1293-1308.
- [4] FORRESTER J W. Lessons from system dynamics

- modeling[J]. *Syst Dyn Rev*, 1987, 3(2): 136-149.
- [5] STERMAN J. **System dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**[M]. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000: 17.
 - [6] MEADOWS D H. Leverage points: places to intervene in a system[R/OL]. (1999)[2025-09-07]. <https://donella.meadows.org/archives/leverage-points-places-to-intervene-in-a-system/>.
 - [7] 王 现, 张成钢, 崔子祯, 等. 上海市徐汇区2型糖尿病健康管理的系统动力学模型仿真研究[J]. *中国慢性病预防与控制*, 2019, 27(3): 189-192.
WANG Xian, ZHANG Chenggang, CUI Ziyi, et al. Study on system dynamics model simulation for the health management of type 2 diabetes mellitus in Xuhui district[J]. *Chinese Journal of Prevention and Control of Chronic Diseases*, 2019, 27(3): 189-192. (in Chinese)
 - [8] 严 阅, 陈 瑜, 刘可伋, 等. 基于一类时滞动力学系统对新型冠状病毒肺炎疫情的建模和预测[J]. *中国科学: 数学*, 2020, 50(3): 385-392.
YAN Yue, CHEN Yu, LIU Keji, et al. Modeling and prediction for the trend of outbreak of NCP based on a time-delay dynamic system[J]. *Scientia Sinica (Mathematica)*, 2020, 50(3): 385-392. (in Chinese)
 - [9] 王盈. 基于系统动力学的老年慢性病患者生活质量影响因素仿真模拟研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2022.
WANG Ying. Simulation study on influencing factors of quality of life in elderly patients with chronic diseases based on system dynamics[D]. Qingdao: Qingdao University, 2022. (in Chinese)
 - [10] LUKE D A, STAMATAKIS K A. Systems science methods in public health: dynamics, networks, and agents [J]. *Annu Rev Public Health*, 2012, 33: 357-376.
 - [11] 董 是, 崔秋玮, 潘潇雄, 等. 基于系统动力学模型的2019冠状病毒病早期防控机制研究[J]. *浙江大学学报(医学版)*, 2021, 50(1): 41-51.
DONG Shi, CUI Zhiwei, PAN Xiaoxiong, et al. Exploring early prevention and control of COVID-19 outbreak based on system dynamics model analysis[J]. *Journal of Zhejiang University (Medical Sciences)*, 2021, 50(1): 41-51. (in Chinese)
 - [12] 王彦博, 周江涛, 王冰怡, 等. 基于系统动力学乳腺癌筛查覆盖率促进策略仿真分析[J]. *中国全科医学*, 2024, 27(19): 2421-2428.
WANG Yanbo, ZHOU Jiangtao, WANG Bingyi, et al. Simulation analysis of breast cancer screening coverage rate promotion strategies based on system dynamics[J]. *Chinese General Practice*, 2024, 27(19): 2421-2428. (in Chinese)
 - [13] AUGISEAU V, BARLES S. Studying construction materials flows and stock: A review[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 123: 153-164.
 - [14] JONES A P, HOMER J B, MURPHY D L, et al. Understanding diabetes population dynamics through simulation modeling and experimentation[J]. *Am J Public Health*, 2006, 96(3): 488-494.
 - [15] WILLIAMS B, HUMMELBRUNNER R. **Systems concepts in action: A practitioner's toolkit**[M]. Redwood City: Stanford University Press, 2010: 32-33
 - [16] BRENNAN L K, SABOUNCHI N S, KEMNER A L, et al. Systems thinking in 49 communities related to healthy eating, active living, and childhood obesity[J]. *J Public Health Manag Pract*, 2015, 21(Suppl 3): S55-S69.
 - [17] ULEMAN J F, MELIS R J F, HOEKSTRA A G, et al. Exploring the potential impact of multi-factor precision interventions in Alzheimer's disease with system dynamics[J]. *J Biomed Inform*, 2023, 145: 104462.
 - [18] KENZIE E S, PARKS E L, BIGLER E D, et al. The dynamics of concussion: mapping pathophysiology, persistence, and recovery with causal-loop diagramming[J]. *Front Neurol*, 2018, 9: 203.
 - [19] HASGUL Z, SPANJAART A, JAVED S, et al. Health-related quality of life dynamics: modeling insights from immunotherapy[J]. *Qual Life Res*, 2025, 34(1): 273-286.
 - [20] BEAULIEU E, SPANJAART A, ROES A, et al. Health-related quality of life in cancer immunotherapy: a systematic perspective, using causal loop diagrams[J]. *Qual Life Res*, 2022, 31(8): 2357-2366.
 - [21] 马学东, 王扣柱, 密一恺, 等. 基于系统思考的社区大肠癌筛查标准化模型构建[J]. *中国全科医学*, 2016, 19(23): 2810-2813.
MA Xuedong, WANG Kouzhu, MI Yikai, et al. Construction of standardized model for screening colorectal cancer in community based on systems thinking[J]. *Chinese General Practice*, 2016, 19(23): 2810-2813. (in Chinese)
 - [22] 杨薇娜, 王扣柱, 马学东, 等. 社区卫生服务企业标准系统评价应用研究: 以大肠癌筛查为例[J]. *中国全科医学*, 2020, 23(16): 2012-2019.
YANG Weina, WANG Kouzhu, MA Xuedong, et al. Application research on systematic evaluation of enterprise standards for community health services: taking the colorectal cancer screening as an example[J]. *Chinese General Practice*, 2020, 23(16): 2012-2019. (in Chinese)
 - [23] LUNA PINZON A, WATERLANDER W, DE POOTER N, et al. Development of an action programme tackling obesity-related behaviours in adolescents: a participatory system dynamics approach[J]. *Health Res Policy Syst*, 2024, 22(1): 30.
 - [24] WATERLANDER W E, PINZON A L, VERHOEFF A, et al. A system dynamics and participatory action research approach to promote healthy living and a healthy weight among 10-14-year-old adolescents in Amsterdam: the LIKE programme[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, 17(14): 4928.
 - [25] ENGLAND T, BRAILSFORD S, EVENDEN D, et al. Examining the effect of interventions in emergency care for older people using a system dynamics decision

- support tool[J]. **Age Ageing**, 2023, 52(1): afac336.
- [26] KANG H, NEMBARD H B, GHARAMANI N, et al. A system dynamics approach to planning and evaluating interventions for chronic disease management[J]. **J Oper Res Soc**, 2017: 987-1005.
- [27] KANG H, NEMBARD H B, CURRY W, et al. A systems thinking approach to prospective planning of interventions for chronic kidney disease care[J]. **Health Syst**, 2017, 6(2): 130-147.
- [28] AHMAD R, ZHU N J, LEBICIR R M, et al. How the health-seeking behaviour of pregnant women affects neonatal outcomes: findings of system dynamics modelling in Pakistan[J/OL]. **BMJ Glob Health**, 2019, 4(2): e001242.
- [29] NATSKY A N, SKINNER A, OSPINA-PINILLOS L, et al. Economic evaluation of 9 intersectoral strategies to improve youth mental health and alleviate financial burden in Colombia using system dynamics modeling[J]. **Value Health**, 2025, 28(3): 389-398.
- [30] MARJANOVIC S, PAGE A, STONE E, et al. Systems mapping: a novel approach to national lung cancer screening implementation in Australia[J]. **Transl Lung Cancer Res**, 2024, 13(10): 2466-2478.
- [31] 袁莎莎, 勇志鹏, 邓贵芳, 等. 纵向整合措施对基层医疗机构服务质量影响路径分析[J]. **中国初级卫生保健**, 2018, 32(11): 1-3, 7.
YUAN Shasha, YONG Zhipeng, DENG Guifang, et al. The influencing path of vertical integration on the quality of primary health institution based on the systematic dynamics approach[J]. **Chinese Primary Health Care**, 2018, 32(11): 1-3, 7. (in Chinese)
- [32] 徐莉苹, 陈婕, 郭菲娜, 等. 基于系统动力学的社区高血压单病种管理路径的复杂动态分析[J]. **中国全科医学**, 2019, 22(14): 1655-1662.
XU Liping, CHEN Jie, GUO Feina, et al. Complex dynamic analysis of community-based hypertension management pattern based on system dynamics[J]. **Chinese General Practice**, 2019, 22(14): 1655-1662. (in Chinese)
- [33] WITTENBORN A K, HOSSEINICHIMEH N. Exploring personalized psychotherapy for depression: a system dynamics approach[J/OL]. **PLoS One**, 2022, 17(10): e0276441.
- [34] OO T H, TIANVIWAT S, THITASOMAKUL S, et al. A system dynamics model of caries preventive interventions in Thailand's school-aged population[J]. **Oral Health Prev Dent**, 2023, 21: 397-406.
- [35] SHI Y, FAN F, ZHANG Z. Simulation of performance evaluation model for medical-elderly care integrated institutions based on system dynamics[J]. **BMC Health Serv Res**, 2022, 22(1): 1451.
- [36] CEPOIU-MARTIN M, BISCHAK D P. Policy choices in dementia care-An exploratory analysis of the Alberta continuing care system (ACCS) using system dynamics[J]. **J Eval Clin Pract**, 2018, 24(1): 278-284.
- [37] 范海平, 尹文强, 于倩倩, 等. 基于系统动力学分析基本药物制度实施对社区卫生机构服务功能的影响[J]. **中国卫生统计**, 2016, 33(5): 785-788.
FAN Haiping, YIN Wenqiang, YU Qianqian, et al. Analysis on the service function of community healthy service centers influenced by implementation of essential medicine system: based on system dynamics[J]. **Chinese Journal of Health Statistics**, 2016, 33(5): 785-788. (in Chinese)
- [38] MEISEL J D, ESGUERRA V, GIRALDO J K, et al. Understanding the dynamics of the obesity transition associated with physical activity, sedentary lifestyle, and consumption of ultra-processed foods in Colombia[J]. **Prev Med**, 2023, 177: 107720.
- [39] TOBIAS M I, CAVANA R Y, BLOOMFIELD A. Application of a system dynamics model to inform investment in smoking cessation services in New Zealand[J]. **Am J Public Health**, 2010, 100(7): 1274-1281.
- [40] 王扣柱, 马学东, 蔡雨阳, 等. 基于系统动力学的社区结直肠癌筛查项目动态复杂性研究[J]. **中国全科医学**, 2017, 20(31): 3860-3865.
WANG Kouzhu, MA Xuedong, CAI Yuyang, et al. Dynamic complexity analysis of the community-based colorectal cancer screening program based on system dynamics[J]. **Chinese General Practice**, 2017, 20(31): 3860-3865. (in Chinese)
- [41] WONGSEREE P, HASGUL Z, LEERAPAN B, et al. Dynamics of colorectal cancer screening in low and middle-income countries: a modeling analysis from Thailand[J]. **Prev Med**, 2023, 175: 107694.
- [42] PALMA A, LOUNSBURY D W, SCHLECHT N F, et al. A system dynamics model of serum prostate-specific antigen screening for prostate cancer[J]. **Am J Epidemiol**, 2016, 183(3): 227-236.
- [43] 胡芳, 王磊鑫, 覃钰雯. 人口老龄化对我国基本医疗保险基金结余可持续发展的影响研究[J]. **中国卫生经济**, 2024, 43(7): 36-41.
HU Fang, WANG Leixin, QIN Yuwen. The impact of population ageing on the sustainable development of China's basic medical insurance fund balance[J]. **Chinese Health Economics**, 2024, 43(7): 36-41. (in Chinese)
- [44] SOLER R, ORENSTEIN D, HONEYCUTT A, et al. Community-based interventions to decrease obesity and tobacco exposure and reduce health care costs: outcome estimates from communities putting prevention to work for 2010-2020[J/OL]. **Prev Chronic Dis**, 2016, 13: E47.
- [45] HEEMSKERK D M, BUSCH V, PIOTROWSKI J T, et al. A system dynamics approach to understand Dutch adolescents' sleep health using a causal loop diagram[J]. **Int J Behav Nutr Phys Act**, 2024, 21(1): 34.
- [46] HEEMSKERK D M, VAN STRALEN M M, PIOTROWSKI J T, et al. Developing a whole systems action plan promoting Dutch adolescents' sleep health[J]. **Int J Behav Nutr Phys Act**, 2025, 22(1): 33.

- [47] BALQIS-ALI N Z, ANIS-SYAKIRA J, FUN W H, et al. Achieving cervical cancer elimination: the simulated impacts of HPV vaccination and transitioning from liquid-based cytology to HPV-based screening test [J/OL]. **PLoS One**, 2024, 19(7): e0307880.
- [48] FAGERY M, KHORSHIDI H A, WONG S Q, et al. Integrating multi-cancer early detection (MCED) tests with standard cancer screening: system dynamics model development and feasibility testing[J]. **Pharmacoecon Open**, 2025, 9(1): 147-160.
- [49] WONGSEREE P, HASGUL Z, JALALI M S. Cost-effectiveness of increasing access to colorectal cancer diagnosis: analysis from Thailand[J]. **Value Health Reg Issues**, 2024, 43: 101010.
- [50] VALIOTIS G, BUTTIGIEG S C, CICHETTI A, et al. Defining health management: a conceptual foundation for excellence through efficiency, sustainability and equity[J]. **Int J Health Plann Manage**, 2025, 40(3): 788-793.
- [51] DE POOTER N, LUNA PINZON A, DEN HERTOOG K, et al. Monitoring and adaptation of a system dynamics approach to prevent childhood overweight and obesity: findings from the LIKE programme[J]. **Health Res Policy Syst**, 2025, 23(1): 30.
- [52] KHORSHIDI H A, MARSHALL D, GORANITIS I, et al. System dynamics simulation for evaluating implementation strategies of genomic sequencing: tutorial and conceptual model[J]. **Expert Rev Pharmacoecon Outcomes Res**, 2024, 24(1): 37-47.
- [53] KENZIE E S, PARKS E L, CARNEY N, et al. System dynamics modeling for traumatic brain injury: mini-review of applications[J]. **Front Bioeng Biotechnol**, 2022, 10: 854358.
- [54] INOUE S, XU H, MASWANA J C, et al. Forecasting of future medical care expenditure in Japan using a system dynamics model[J]. **Inquiry**, 2022, 59: 469580221091397.
- [55] SELYA A S, IVANOV O, BACHMAN A, et al. Youth smoking and anti-smoking policies in north Dakota: a system dynamics simulation study[J]. **Subst Abuse Treat Prev Policy**, 2019, 14(1): 34.
- [56] 张成钢, 王 现, 朱博城, 等. 基于系统动力学的2型糖尿病管理模型构建与初步仿真[J]. **实用预防医学**, 2019, 26(8): 1016-1019, 1025.
ZHANG Chenggang, WANG Xian, ZHU Bocheng, et al. Establishment and initial simulation of type 2 diabetes management model based on system dynamics[J]. **Practical Preventive Medicine**, 2019, 26(8): 1016-1019, 1025. (in Chinese)
- [57] 刘迪. 基于机器学习的临床疾病并发阿尔兹海默症早期预测与防治模型研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.
LIU D. Research on early prediction and prevention model of clinical disease complicated by Alzheimer's Disease based on machine learning[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [58] NGUYEN L K N, HOWICK S, MEGIDDO I. A framework for conceptualising hybrid system dynamics and agent-based simulation models[J]. **Eur J Oper Res**, 2024, 315(3): 1153-1166.

[本文编辑 沈 敏 余 方]