

城市干旱风险管理系统协同演化研究

牛文娟¹,刘明慧¹,何 力²

(1. 河海大学商学院,江苏 南京 211100; 2. 江西省抚州市抚河水文水资源监测中心,江西 抚州 344106)

摘要:基于对城市干旱风险管理系统分析,借鉴 B-Z 反应模型,建立了城市干旱风险管理系统三维 Logistic 协同演化模型,分“危机-应对”和“风险常态化”两种管理模式设计仿真情景,揭示在防备、响应与恢复 3 个子系统相互作用和政府跨组织协同度支撑下城市干旱风险管理系统动态演进机制,并对鄂尔多斯市进行了案例模拟分析。研究表明:在“危机-应对”管理模式,由于忽视城市干旱风险防备能力的建设,城市干旱风险防备能力处于较低水平,即使是增强子系统之间的协同水平,也很难提高城市干旱风险响应能力水平。无论是组织弱协同还是组织强协同条件下,干旱恢复能力都会有所增长,协同水平越强,干旱恢复水平越高。但是在干旱防备能力和响应能力均较低的情况下,干旱灾害造成的城市损失均较大,干旱恢复水平越高,意味着付出的干旱恢复成本越高,这正是“危机-应对”管理模式被动性、滞后性所造成的后果。在“风险常态化”管理模式,在城市干旱风险防备能力水平都很强的情况下,组织强协同比组织弱协同会更加有力地推进城市干旱防备能力、响应能力和恢复能力的同时快速增长;组织强协同比组织弱协同会更加促进 3 个子系统之间的互动,从而促进 3 个子系统之间的平衡发展,对于城市应对干旱更加有效率。在城市有限资源约束下,3 个子系统之间存在相互制约作用,组织强协同比组织弱协同在更加平衡子系统之间的发展的同时,会限制具有发展最优势的防备能力达到弱协同下的水平。

关键词:城市干旱;风险管理系统;序参量;协同演化方程;跨组织协同度

中图分类号:N949 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-9511(2022)04-0006-11

在全球气候变化的背景下,干旱灾害有愈加频繁且剧烈的趋势。全球气候的系统性变迁和频繁的人类活动引起自然-人工水文循环的深刻演变,导致全球干旱灾害发生频率增加,干旱持续时间和强度加重,干旱灾害防御重心从农业领域逐渐扩大到生态环境、社会经济以及城市生活的各个方面。全球城市化进程使得城市日益成为令人瞩目的自然灾害防御重点。联合国 1997 年在日内瓦战略中就明确提出 21 世纪全球减灾的重点在城市。人口的高度集中、经济的迅速发展、城市范围的不断扩大,大大增加了城市灾害损失的风险,提高了对城市减灾防灾能力的要求。因此,如何建立城市干旱灾害风险防范、及时响应及弹性恢复系统,最大可能减轻灾害损失是城市干旱灾害风险管理的目标。

干旱灾害管理,就是从风险管理的视角预防和减缓干旱灾害对自然物理和社会经济的破坏和影

响。Ituarte 等^[14]从干旱灾害管理理念革新、决策支持系统构建、应急方案制定等方面,介绍了国外干旱灾害管理经验。Wilhite 等^[5-7]对干旱灾害进行了深入研究,指出干旱灾害不仅是自然物理事件,还是社会事件,不可持续的经济结构、人口的快速增长等因素导致干旱灾害的社会经济影响具有高度可变性。干旱灾害存在着“无法消除的客观风险”,然而由此造成的灾难性影响,通常是由于人类不积极行为的“累积性影响”^[8],而消除这种不利影响,需要全社会协调一致的积极应对。

我国对于干旱灾害管理,比较多地集中于以机械系统论为基础的研究,比如农业干旱、干旱指标^[9]、干旱灾害风险评估等。冯平^[10]研究了干旱期供水系统的风险、可靠性、恢复性和易损性指标,针对不同的干旱现象提出了潘家口水库干旱期管理措施。屈艳萍等^[11]从干旱灾害致灾因子、

承灾体和孕灾环境 3 个方面分析我国干旱灾害风险的潜在根源,构建了风险评估、风险控制、风险处置、风险回避、风险适应的干旱灾害风险管理战略框架。刘兆胜^[12]以朝阳市大凌河流域为例,研究了日常情况和各等级干旱发生时应采取的行动和措施。

为应对干旱灾害管理日益增长的复杂性,以复杂系统科学范式为基础的研究日益受到关注。我国干旱灾害管理也已经从以工程技术措施为主,以“被动应对式”为主的管理模式转向以基于应急预案的多主体合作、跨部门协调、全社会联动的管理模式^[13]。张乐等^[14]以云南特大干旱为例,提出政府、企业、公益组织等多主体合作的极端旱灾应急管理模式,保障多情景长历时水资源应急供给,有效应对供水破坏风险。陶鹏等^[15-16]分别以“风险-危机”演化范式、多层次网络结构为基础,构建了多元治理模式和区域应急联动模式。张景平等^[17]通过对我国历史上不同时期河西走廊水资源管理中的政府角色进行长时段研究发现,政府而非其他社会组织,始终是干旱区水资源博弈的主体,政府行为方式对于干旱区水资源管理的方式和效果均有深远影响。事实上,自从 2003 年“非典”以来,国家成立应急管理部,更加强化了政府在公共危机管理中的责任与权力。但是,陶鹏等^[15]通过对 2010 年中国西南五省(自治区、直辖市)特大旱灾应急管理过程中存在的失灵现象的研究,提出应急管理体系运行中存在“重应急处置,轻风险管理”弊端,指出旱灾的社会科学视角的研究还需要进一步加强。唐明等^[18]提出了旱灾管理系统是一种典型的耗散结构和自组织系统,存在着涨落和突变现象,遵守协同学的一般规律。

城市作为一个巨大的承灾体,专门针对城市干旱风险管理的研究却较少。风险管理作为一种制度设计,主要用于应对环境的不确定性,因此风险管理体系本身就是自适应的:随着外部环境的变化而自动调整,风险管理需要“系统思维”^[19]。城市干旱风险管理系统是一个复杂系统,需要运用系统思维对其规律进行深入研究。本文基于对城市干旱风险管理的分析,借鉴 B-Z 反应模型,建立城市干旱风险管理系统三维 Logistic 协同演化模型,揭示在多要素协同作用下城市干旱风险管理体系的防备、响应与恢复 3 个子系统之间的相互作用和政府跨组织协同度支撑下系统的动态演进机制,并以鄂尔多斯市为例进行实例模拟分析,以期为提高城市干旱灾害风险下的弹性提供决策参考,保障城市的可持续发展。

1 城市干旱风险管理系统分析

1.1 文献综述及系统概念

1.1.1 城市干旱

干旱从不同研究领域进行划分,分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱,包含降水、气温、蒸发、径流、植被、经济、社会等影响因素。2008 年水利部发布的 SL424—2008《旱情等级标准》中,将城市干旱定义为因干旱导致城市居民和工商企业缺水的情况,包括缺水历时及程度等。一些水利专家对城市干旱的定义又进行了扩展,认为城市干旱是指城市供水水源地区因遇枯水年或突发性事件,造成城市供水水源不足,城市实际供水能力低于正常供水能力,造成城市正常的生活、生产和生态环境受到影响的现 象^[20]。相对于气象干旱和水文干旱更加关注干旱的成因及指标监测,城市干旱更加关注在对干旱监测预警的基础上,如何通过增加城市供水系统弹性、城市多部门协同和多主体参与,提高城市对旱灾的响应恢复能力,尽可能维持城市功能的正常运转。在气象干旱和水文干旱的条件下,往往导致农业干旱和城市干旱,造成社会经济的损失,但是农业干旱和城市干旱发生的时空尺度、评价指标、要素投入、承灾能力、干旱场景、涉及主体等都有很大不同,用于应对农业干旱和城市干旱的策略因而也大相径庭。根据 GB/T 32135—2015《区域旱情等级》,采用评估时段内城市日干旱缺水率作为城市旱情评估指标,将城市旱情等级划分为轻度、中度、严重和特大干旱。

1.1.2 城市干旱风险管理

国内外在城市旱灾风险管理与减灾技术领域的工作主要集中在灾前保护、灾中响应和灾后恢复 3 个方面。灾前保护是基于城市抗旱防灾弹性功能建设与防灾规划,科学构建防灾体系与减灾措施;灾中响应与灾后重建是利用旱情预警、灾情影响评估等技术,强化城市在旱灾发生期间及灾后的应急反应能力,通过科学有序的应急预案体系建设,减小旱灾的不利影响^[21-22]。根据城市功能运转需求的差异性,联合国教科文组织提出将城市旱灾风险管理划分为居民需求保障、城市生态系统维护与提升保障、城市经济职能正常运转 3 个层次,并针对不同层次的应急保障管理,提出了一系列管理对策,涵盖基于“灰绿结合”基础设施的水循环利用技术、旱情中长期预警技术、城市分质分级供水技术、提升环境流量与动植物避难生境保障技术以及推动水敏性城市发展等^[23]。国际上针对城市旱灾防灾规划与旱灾响应策略的防灾减灾效益比 对分析表明,城市应

急供水措施是相对较优的旱灾防治策略,许多城市已提出将保障率可靠的城市应急供水系统作为城市防灾能力提升的长效措施。同时,稳健性分析作为旱灾风险管理的重要技术,已越来越多地应用于城市抗旱应急预案制定工作,为预案措施的可靠性分析提供了有效的技术支撑。

构建长效防灾减灾机制是城市未来的发展愿景,强调通过防灾理念与技术的迭代更新,构建防灾减灾功能完备的弹性城市系统。在相同的致灾强度下,灾情会因对干旱灾害预防、应对、缓冲和恢复的不同反应而呈现出较大的差异,从而“放大”或“缩小”灾情的影响^[11,24]。旱灾风险管理是一种公共危机管理^[18],是一种政府主导实施的有组织、有计划、持续动态的管理过程。对旱灾公共危机管理的研究,逐渐确立了政府主导下多主体合作^[14]、跨部门联动的管理体制和机制。将微观与宏观视角相结合,将自上而下的影响力与个体或群体本身的资源可得性相结合,将增强风险的可管理性^[15]。因此,笔者认为我国城市干旱风险管理系统是政府主导下多主体合作的,为应对干旱风险而采取的有组织、有计划、持续动态的管理过程和管理活动所构成的系统,以减轻干旱灾害对城市所造成的经济社会损失,满足居民需求保障、城市生态系统维护与提升保障、城市经济职能正常运转3个不同层次的需求。按照干旱风险发生的时间维度,将城市干旱风险管理系统划分为防备、响应和恢复3个子系统,如图1所示。

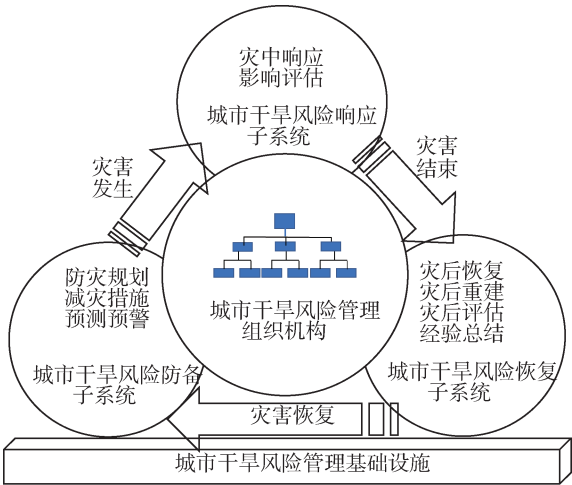


图1 城市干旱风险管理系统结构

干旱防备子系统是指在干旱发生前构建干旱预防和准备系统,对可能出现的灾害进行准备、预测、预警、减灾等管理活动,以预判、避免、降低和转移风险。干旱防备子系统是一个动态的、连续发展和不断演变的系统^[25]。干旱响应子系统是指当干旱发生并认识到其影响之后所制定和实施的一系列措

施,并根据干旱的动态特点和城市的发展特点,如城镇化规模^[26]、产业结构^[27]、水生态文明建设^[28]、水权市场状况^[29]等,及时调整运行管理措施。干旱灾害是一种缓慢发展的自然灾害,不像洪水、地震等其他自然灾害,会造成直接的人员伤亡及建设设施的损毁破坏,因此,干旱恢复子系统是指在城市因灾情发生遭受损失后,弥补损失使城市生产生活恢复到正常以上水平的管理活动。

1.2 城市干旱风险管理系统动态机制

1.2.1 城市干旱风险管理子系统的动态协同关系

B-Z 反应系统是指在 Belousov-Zhabotinskii 复杂化学反应中,在催化剂金属铈离子的作用下,丙二酸等有机酸被溴酸氧化,3 种关键反应物质 Br^- , HBrO_2 和 Ce^{4+} 的浓度在自组织运动下循环往复震荡变化,产生出反应系统宏观时空结构上的有序花纹和周期性红-蓝变化,是典型的具有自组织特征的系统。B-Z 反应系统为研究城市干旱风险管理系统提供了复杂性隐喻关联。与 B-Z 反应系统类似,城市干旱风险管理系统也是一个具有自组织特征的系统。城市干旱风险管理系统的功能是干旱防备子系统、响应子系统和恢复子系统三者协调互动的结果,三者共同构成城市干旱风险管理的内部系统。同时,城市干旱风险管理系统面临着外部宏观环境的不确定性。外部宏观环境包括外部自然环境和外部社会环境。外部自然环境主要指各种自然因素,如气候、水文、地貌等导致的城市干旱灾害风险的不确定性;外部社会环境包括政治、经济、文化、技术等。

在一个干旱事件风险管理周期内,3 个子系统之间可以看作是简单的时间序逻辑循环,如图1所示。但是,许多城市大都反复遭遇干旱事件,因此,为了应对外部环境的长期动态不确定性,需要在3个子系统之间建立动态协同迭代机制。干旱防备子系统是干旱响应子系统和干旱恢复子系统的基础,充分完善的干旱防备子系统有利于干旱响应和恢复子系统的运行,提高二者的风险处置效率。比如,高精度的中长期旱情监测预报,不仅可以对抗旱应急响应和灾后恢复工作的针对性指导,而且可以通过加强水利基础设施的建设提高干旱早期的城市供水保证率,降低干旱灾害损失,并预防次生灾害。干旱防备子系统为干旱风险管理提供资金、人力、物资、信息、制度等基础,但是这些要素需要在干旱响应和恢复子系统的运行中协调运转、协作配合、协同发力,才能实现干旱风险管理的减灾目标。干旱恢复子系统的作用除了灾后重建,更重要的在于对一个干旱灾害周期内风险管

理的经验总结和评估,并反馈到干旱防备和响应子系统以及自身的演化改进,如同3个子系统之间发生了B-Z化学反应,使得城市干旱风险管理系统的增强性能不断涌现。

1.2.2 政府在城市干旱风险管理系统中的管理协同作用

3个子系统之间的这种“化学反应”需要政府管理组织协同的“催化剂”作用。在协同学中,协同是指系统各个组成部分或系统之间的协调一致,共同合作而产生的新的结构和功能。管理协同是指在系统处于变革或临界状态下,以协同思想为指导,综合运用管理方法、手段促使系统内部各子系统或要素按照协同方式进行整合,相互作用、相互合作和协调而实现一致性和互补性,进而产生支配整个系统发展的序参量,使系统实现自组织,而从一种序状态走向另一种新的序状态,并使系统产生整体作用大于各要素作用力之和的系统管理方法。外部宏观环境对城市干旱风险管理系统施加的影响,需要通过城市干旱风险管理系统的跨部门主体协同、信息共享利用和抗旱应急行动发生作用,即政府协调资金、人力、设备、技术等对干旱风险进行管理^[30]。美国创立了综合应急管理模式CEM,通过全危险方法、信息共享和应急管理循环三大制度支撑体系进行灾害统一管理。我国在2003年“非典”之后建立了国家应急管理体系,出台《中华人民共和国突发事件应对法》,由各级政府统一应对突发事件,建立IEMIS进行信息共享,建立应急管理循环,包括预防与准备、监测与预警、救援与处置、善后与恢复,对灾害进行全过程风险管理,强调分类管理原则^[19]。由于旱灾影响范围广,持续时间长,给生产线、生命线以及社会基础设施和服务都带来严重伤害,并可能引发火灾、虫灾等灾害链式反应,因此,政府在资源、信息、人员、政策等方面的跨部门管理组织协同是3个子系统得以协同、运行和进化的基础和保障。

2 城市干旱风险管理系统协同演化模型

2.1 变量与参数的确定

城市干旱风险管理系统是一个具有开放性、动态性、非线性、自组织性的复杂系统,经过一定的条件可以成为耗散结构。根据协同学理论,序参量是能够影响系统演进方向的宏观变量。根据上述分析可知,干旱防备能力、响应能力与恢复能力是驱动城市干旱风险管理系统演化的序参量。在战略管理中,能力被描述为一个累积的实体,它们的存量水平会正向影响自身的积累速率,此外它们彼此之间也相互影响,干旱防备能力和响应能力与干旱恢复能力之间具有正向的协同作用。政府管理协同能力是指在一定的环境条件下,通过管理活动来协调和开发资源以创造价值的才能,反映了政府积累知识、经验和技能,对资源进行最优配置和使用,或使系统整体功能发生倍增或放大的协同效应的能力。在政府管理协同能力的作用影响下,当干旱风险管理系统产生出干旱防备能力、响应能力与恢复能力,驱动3个子系统之间相互作用与协调,系统才得以向新的序状态演化。

干旱防备能力水平、响应能力水平与恢复能力水平3个序参量是城市干旱风险管理系统的状态变量,产生于系统内部,是3个子系统宏观上的特征表现,对系统的运转产生长期的影响。跨组织协同度支撑是3个子系统协同演化的控制变量,描述政府管理协同能力对城市干旱的防备、响应与恢复能力协同支持的综合效用。城市干旱风险管理系统的演化还需要确定系统状态变量之间的相互作用系数,称为调节参数^[31]。表1列出了城市干旱风险管理系统协同演化的变量和参数。

表1中参数定义如下: $\theta = \sqrt[i]{\prod_{i=1}^n \theta_i}$,为跨组织协同度支撑,表示政府跨部门协同能力指数,作为控制变量,对干旱防备能力、响应能力和恢复能力提供协同

表 1 城市干旱风险管理系统协同演化的变量与参数

变量与参数	变量与参数名称	变量与参数含义
状态变量 x_1	干旱防备能力水平	反映城市干旱风险管理过程中对旱灾进行防备的能力水平状态
状态变量 x_2	干旱响应能力水平	反映城市干旱风险管理过程中对旱灾进行响应的能力水平状态
状态变量 x_3	干旱恢复能力水平	反映城市干旱风险管理过程中对旱灾进行恢复的能力水平状态
控制变量 θ	跨组织协同度支撑	描述政府管理协同能力对城市干旱的防备,响应与恢复能力协同支持的综合效用,由指标体系综合评价获得
调节参数 α	干旱防备能力指数	衡量城市干旱防备能力自调节水平,由指标体系综合评价获得
调节参数 β	干旱响应能力指数	衡量城市干旱响应能力自调节水平,由指标体系综合评价获得
调节参数 γ	干旱恢复能力指数	衡量城市干旱恢复能力自调节水平,由指标体系综合评价获得
管理效率 k_1	防备子系统内部效率	常数,反映干旱防备子系统因内部管理效率引起的自身衰减
管理效率 k_2	响应子系统内部效率	常数,反映干旱响应子系统因内部管理效率引起的自身衰减
管理效率 k_3	恢复子系统内部效率	常数,反映干旱恢复子系统因内部管理效率引起的自身衰减

支持; θ_i 为评价体系中的指标参数; $\alpha = \sqrt{i \prod_{i=1}^n \alpha_i}$, 为干旱防备能力指数,是状态变量 x_1 的调节参数,用于衡量城市干旱防备能力自调节水平,其中 α_i 为评价体系中的指标参数; $\beta = \sqrt{i \prod_{i=1}^n \beta_i}$,为干旱响应能力指数,是状态变量 x_2 的调节参数,用于衡量城市干旱响应能力自调节水平,其中 β_i 为评价体系中的指标参数; $\gamma = \sqrt{i \prod_{i=1}^n \gamma_i}$,为干旱恢复能力指数,是状态变量 x_3 的调节参数,用于衡量城市干旱恢复能力自调节水平,其中 γ_i 为评价体系中的指标参数; k_1 、 k_2 、 k_3 分别为干旱防备子系统、响应子系统和恢复子系统的内部管理效率,表示因内部管理效率引起的自身能力衰减部分,一般认为,子系统的能力越强,其内部管理效率也越高,反之亦然。因此,为简单起见,本文选取 k_1 、 k_2 、 k_3 与子系统的的能力指数数值相同。

城市干旱风险管理系统协同演化模型参数评价指标如表 2 所示。

2.2 模型构建

城市干旱风险管理系统是由防备、响应与恢复子系统构成的既竞争互补又协同演化的动态过程系统,系统的组织结构、信息共享、协调机制、防御措施、制度规范、减灾投入等物质流、资金流和信息流在子系统之间流动,为子系统的相互作用与演进提供综合支撑,是城市旱灾管理功能强弱与控制水平

高低的综合体现。

a. 城市干旱风险管理系统防备能力动态演化方程。在跨组织协同度 θ 的影响下,状态变量 x_1 的 Logistic 演化方程为

$$\frac{1}{\alpha} \frac{dx_1}{dt} = \theta \left(1 - \frac{1}{k_1} x_1 \right) x_1 - \beta x_1 x_2 - \gamma x_1 x_3 \quad (1)$$

式中: θx_1 为在跨组织协同度 θ 影响下 x_1 的增长情况; $-\theta \frac{1}{k_1} x_1^2$ 为防备子系统内部的管理效率对 x_1 增长的阻尼作用; k_1 为管理效率, k_1 越大,对 x_1 增长的阻尼作用越小; $-\beta x_1 x_2$ 、 $-\gamma x_1 x_3$ 分别表示“重应急处置,轻风险管理”下旱灾响应子系统和旱灾恢复子系统对旱灾防备子系统造成的资源竞争影响。

b. 城市干旱风险管理系统响应能力动态演化方程。在跨组织协同度 θ 影响下,状态变量 x_2 的 Logistic 演化方程为

$$\frac{1}{\beta} \frac{dx_2}{dt} = \theta \left(1 - \frac{1}{k_2} x_2 \right) x_2 + \theta \frac{\alpha}{\beta} x_1 \quad (2)$$

式中: θx_2 为在跨组织协同度 θ 影响下 x_2 的增长情况; $-\theta \frac{1}{k_2} x_2^2$ 为响应子系统内部的管理效率对 x_2 增长的阻尼作用; k_2 为管理效率, k_2 越大,对 x_2 增长的阻尼作用越小; $\theta \frac{\alpha}{\beta} x_1$ 为 x_1 对 x_2 的影响因子,在跨组织协同度 θ 影响下,旱灾防备能力越强,发生旱灾

表 2 城市干旱风险管理系统协同演化模型参数评价指标

参数	参数评价指标	评价指标说明
干旱防备能力指数	干旱灾害制度建设	干旱政策法规与制度越完善,干旱防备能力越强,指标值越高
	干旱防灾减灾规划	干旱防灾减灾规划越完善,干旱防备能力越强,指标值越高
	干旱灾害监测预报能力	气象水文网站越完善,干旱防备能力越强,指标值越高
	城市供水系统建设	城市供水系统建设越完善,干旱防备能力越强,指标值越高
	城市备用水源建设	城市备用水源建设越完善,干旱防备能力越强,指标值越高
	其他防灾减灾基础设施建设	其他防灾减灾基础设施建设越完善,干旱防备能力越强
	其他防灾减灾措施建设	其他防灾减灾措施越完善,干旱防备能力越强,指标值越高
	企业及居民节水抗旱意识	企业居民节水抗旱意识越强,干旱防备能力越强,指标值越高
干旱响应能力指数	城市应急供水能力	城市应急供水能力越强,干旱响应能力越强,指标值越高
	城市应急供水秩序	城市应急供水秩序越完善,干旱响应能力越强,指标值越高
	城市应急供水价格体系	城市应急供水价格体系越完善,干旱响应能力越强
	城市干旱应急资源投入保障	资金设备人力等投入越有保障,干旱响应能力越强
	政府响应能力	政府采取综合措施进行灾情处置的能力越强,指标值越高
	干旱影响评估	干旱影响评估及时性和准确性越高,干旱响应能力越强
干旱恢复能力指数	恢复生产生活能力	旱灾后恢复生产生活能力越强,指标值越高
	旱灾损失评估能力	及时、科学、准确的损失评估能力越强,干旱恢复能力越强
	灾后重建的策略及经验总结	策略能力及经验总结能力越强,恢复能力越强,指标值越高
政府跨组织协同度支撑	跨部门信息共享能力	信息共享平台,多种方式发布信息,信息准确,指标值越高
	跨部门协调机制	跨部门协调机制越健全,指标值越高
	跨部门联动能力	跨部门联动能力越强,指标值越高

时,旱灾的响应能力越强。

c. 城市干旱风险管理系统恢复能力演化方程。在跨组织协同度 θ 影响下,状态变量 x_3 的 Logistic 演化方程为

$$\frac{1}{\gamma} \frac{dx_3}{dt} = \theta \left(1 - \frac{1}{k_3} x_3 \right) x_3 + \delta_1 \theta \frac{\alpha}{\gamma} x_1 + \delta_2 \theta \frac{\beta}{\gamma} x_2 \tag{3}$$

式中: θx_3 为在跨组织协同度 θ 影响下 x_3 的增长情况; $-\theta \frac{1}{k_3} x_3^2$ 为恢复子系统内部的管理效率对 x_3 增长的阻尼作用; k_3 为管理效率, k_3 越大,对 x_3 增长的阻尼作用越小; $\delta_1 \theta \frac{\alpha}{\beta} x_1$ 为 x_1 对 x_3 的影响因子,在跨组织协同度 θ 影响下,旱灾防备能力越强,旱灾结束后,旱灾的恢复能力越强; $\delta_2 \theta \frac{\alpha}{\beta} x_2$ 为 x_2 对 x_3 的影响因子,在跨组织协同度 θ 影响下,发生旱灾时,旱灾响应能力越强,旱灾结束后,旱灾的恢复能力越强; δ_1 、 δ_2 为常数,分别为干旱防备能力和响应能力对于干旱恢复能力具有的影响效应。

综上所述,基于 B-Z 反应的由旱灾防备能力、响应能力和恢复能力共同构成城市干旱风险管理系统动态演化模型为

$$\begin{cases} \frac{1}{\alpha} \frac{dx_1}{dt} = \theta \left(1 - \frac{1}{k_1} x_1 \right) x_1 - \beta x_1 x_2 - \gamma x_1 x_3 \\ \frac{1}{\beta} \frac{dx_2}{dt} = \theta \left(1 - \frac{1}{k_2} x_2 \right) x_2 + \theta \frac{\alpha}{\beta} x_1 \\ \frac{1}{\gamma} \frac{dx_3}{dt} = \theta \left(1 - \frac{1}{k_3} x_3 \right) x_3 + \delta_1 \theta \frac{\alpha}{\gamma} x_1 + \delta_2 \theta \frac{\beta}{\gamma} x_2 \end{cases} \tag{4}$$

模型(4)利用3个主要状态变量的演化过程模拟城市干旱风险管理系统演化规律,干旱防备状态变量、干旱响应状态变量和干旱恢复状态变量将城市干旱风险管理系统内外部因素进行整合,3个状态变量变化类似“B-Z”反应模型中3种主要物质的浓度状态变化,在控制变量和调整参数的作用和影响下,各状态变量自身以及相互影响的演化过程反映了干旱风险管理系统及其子系统紧密协调、协同有序发展的规律。

假设, $\delta_1 = \delta_2 = 2$, 表示干旱防备能力和响应能力对于干旱恢复能力具有倍增效应,则式(4)转化为

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \alpha \theta \left(1 - \frac{1}{k_1} x_1 \right) x_1 - \alpha \beta x_1 x_2 - \alpha \gamma x_1 x_3 \\ \frac{dx_2}{dt} = \beta \theta \left(1 - \frac{1}{k_2} x_2 \right) x_2 + \alpha \theta x_1 \\ \frac{dx_3}{dt} = \gamma \theta \left(1 - \frac{1}{k_3} x_3 \right) x_3 + 2 \alpha \theta x_1 + 2 \beta \theta x_2 \end{cases} \tag{5}$$

系统从混乱到有序,需要经过涨落过程,以帮助系统突破阈值限制,实现系统在序参量役使下的自组织。采用李雅普诺夫第一法分析式(5)表示的系统动态演化模型的稳定性。

2.3 系统稳定性分析

由矩阵论可以推导出 $x_1^0 = x_2^0 = x_3^0 = 0$ 是式(5)的唯一孤立平衡态。将式(5)在原点平衡态附近进行线性化,式(5)的 Taylor 展开式如下:

$$\dot{x} = f(x_e) + \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x^\tau} \right|_{x=x_e} (x - x_e) + R(x - x_e) = A(x - x_e) + R(x - x_e)_{x=x_e} \tag{6}$$

求式(5)的雅可比矩阵 A

$$A = \left. \frac{\partial f(x)}{\partial x^\tau} \right|_{x=x_e} = \begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial x_1 & \cdots & \partial f_1 / \partial x_n \\ \vdots & & \vdots \\ \partial f_n / \partial x_1 & \cdots & \partial f_n / \partial x_n \end{bmatrix}_{x=x_e} = \begin{bmatrix} \alpha \theta & 0 & 0 \\ \alpha \theta & \beta \theta & 0 \\ 2 \alpha \theta & 2 \beta \theta & \gamma \theta \end{bmatrix} \tag{7}$$

则式(5)的线性化方程为

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \alpha \theta x_1 \\ \frac{dx_2}{dt} = \alpha \theta x_1 + \beta \theta x_2 \\ \frac{dx_3}{dt} = 2 \alpha \theta x_1 + 2 \beta \theta x_2 + \gamma \theta x_3 \end{cases} \tag{8}$$

求线性化系统的特征值,解系统的特征方程 $|\lambda I - A| = 0$,可得线性化系统的特征值为

$$\lambda_1 = \alpha \theta, \lambda_2 = \beta \theta, \lambda_3 = \gamma \theta \tag{9}$$

则由李雅普诺夫第一法可知,由于线性化系统的特征值中至少有一个具有正实部,则原非线性系统的平衡态 x_e 不稳定。

3 仿真分析

3.1 仿真情景设计

仿真主要考查风险防备能力水平和协同能力水平对城市干旱风险管理系统动态机制的影响。基于 Simulink 构建系统(5)的控制仿真模型,对城市干旱风险管理系统演化方程进行仿真分析。求解器选择 ode45。设置系统的初始状态为 $X_0 = (x_1^0, x_2^0, x_3^0)$,表示城市干旱风险管理系统构建初期干旱风险防备能力、响应能力和恢复能力的初始情况。同时,针对跨部门组织协同度,本文区分两种情形:①令 $\theta = 0.1$,反映跨组织协同度对城市干旱防备、响应和恢复的支持性较弱,城市干旱风险管理系统的发展处于不确定状态;②令 $\theta = 1$,反映跨组织协同度对城市干旱防备、响应和恢复的支持性很强,有力地推动城市

表 3 仿真情景设计

仿真情景		仿真参数							
		X_0	θ	α	β	γ	k_1	k_2	k_3
“危机-应对”管理模式	弱协同	(0,1,1)	0.1	0.1	1.0	1.0	0.1	1.0	1.0
	强协同	(0,1,1)	1.0	0.1	1.0	1.0	0.1	1.0	1.0
“风险常态化”管理模式	弱协同	(1,1,1)	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	强协同	(1,1,1)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

干旱风险管理系统及其子系统的发展。本文针对城市干旱风险管理系统发展过程中两种不同的情况进行研究:①城市干旱处于“危机-应对”管理模式,城市干旱风险防范能力较弱,风险响应能力和恢复能力较强;②城市干旱处于“风险常态化管理”模式,城市干旱风险防范能力,响应能力和恢复能力都较强。

3.1.1 “危机-应对”管理模式下的城市干旱动态协同机制

仿真初始状态为 $X_0 = (0,1,1)$ 。在“危机-应对”管理模式,风险防范系统较响应系统和恢复系统被忽视,因而假设风险防范系统的增长率较低 $\alpha = 0.1$,风险防范系统的内部协调程度较低 $k_1 = 0.1$,响应系统和恢复系统的增长率较高 $\beta = \gamma = 1$,系统内部协调程度较高 $k_2 = k_3 = 1$ 。跨组织协同度较低环境下 $\theta = 0.1$ 的仿真结果如图 2 所示,跨组织协同度较高环境下 $\theta = 1$ 的仿真结果如图 3 所示。

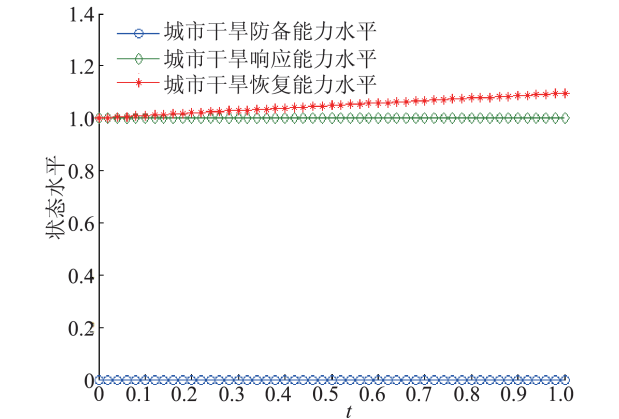


图 2 情景 1(弱协同,弱防备能力)协同演化

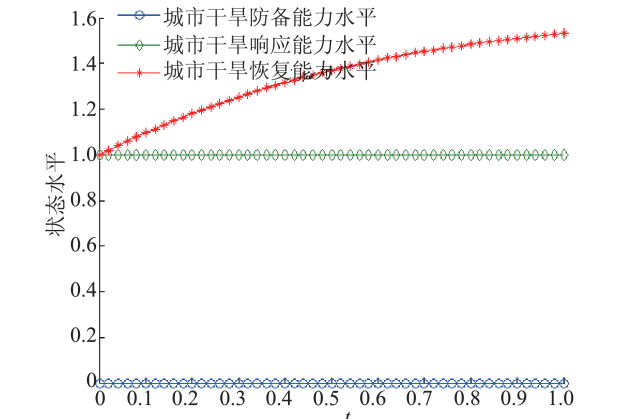


图 3 情景 2(强协同,弱防备能力)协同演化

3.1.2 “风险常态化”管理模式下的城市干旱动态协同机制

仿真初始状态为 $X_0 = (1,1,1)$ 。在“风险常态化”管理模式,风险防范系统被加强,因而假设风险防范系统的增长率较高 $\alpha = 1$,风险防范系统的内部协调程度较高 $k_1 = 1$,响应系统和恢复系统的增长率较高 $\beta = \gamma = 1$,系统内部协调程度较高 $k_2 = k_3 = 1$ 。跨组织协同度较低环境下 $\theta = 0.1$ 的仿真结果如图 4 所示,跨组织协同度较高环境下 $\theta = 1$ 的仿真结果如图 5 所示。

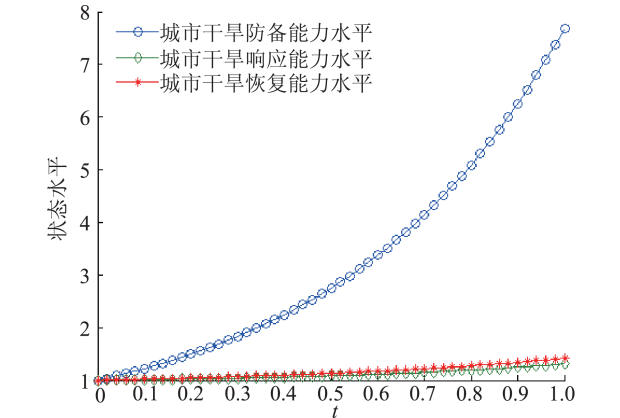


图 4 情景 3(弱协同,强防备能力)协同演化

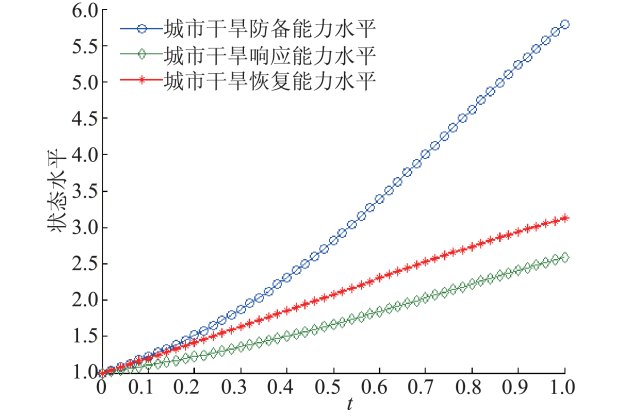


图 5 情景 4(强协同,强防备能力)协同演化

3.2 仿真结果分析

3.2.1 “危机-应对”管理模式下的动态协同机制

由图 2 所示,在弱协同环境下,如果起始时城市干旱风险防范能力不足,则城市干旱防范能力水平和响应能力水平随着时间的推进几乎不发生变化,城市干旱恢复能力水平在弱协同的作用下仅有缓慢

的增长。由图 3 所示,在强协同环境下,如果起始时城市干旱风险防范能力不足,则城市干旱防范能力水平和响应能力水平随着时间的推进几乎不发生变化,城市干旱恢复能力水平在强协同的作用下会有比较快速的的增长。在弱协同环境下,城市干旱恢复能力水平在 $t=1$ 时,增长到 1.1 的水平,而在强协同环境下,在 $t=1$ 时,增长到大于 1.5 的水平。

仿真结果说明:在“危机-应对”管理模式,由于忽视城市干旱风险防范能力的建设,城市干旱风险防范能力处于较低水平,则即使是增强子系统之间的协同水平,也很难提高城市干旱风险响应能力水平。这是由于城市干旱风险的响应能力依赖于对干旱风险的防备建设,防备不足,则响应不足,对于长历程、大范围的干旱尤其如此,甚至造成“应急失灵”。对 2010 年我国西南五省特大旱灾的研究就充分说明这一点,对旱灾风险认识不足,政府基层部门能力缺乏和政府间协调困难,造成旱灾最终演化成经济社会危机^[15];但是,无论是弱协同还是强协同条件下,干旱恢复能力都会有增长,协同水平越强,干旱恢复水平越高。这可以解释为:干旱恢复发生在干旱灾害已经结束的情况下,干旱恢复能力比较不依赖于干旱防范能力和响应能力;对于管理组织机构而言,此时气象、降雨、供水等条件的变化已经解除了干旱危机,形势趋于稳定,各种信息都比较充分完全,利于管理机构进行灾害恢复。但是在干旱防范能力和响应能力均较低的情况下,干旱灾害造成的城市损失均较大,干旱恢复水平越高,也意味着付出的干旱恢复成本越高。这正是“危机-应对”管理模式被动性、滞后性所造成的后果。

3.2.2 “风险常态化”管理模式下的动态协同机制

“风险常态化”管理模式,如图 4 所示,在弱协同环境下,如果起始时城市干旱风险防范能力很强,则城市干旱防范能力水平随着时间的推移会显著快速增长,但是响应能力水平和恢复能力水平随着时间的推进仅有缓慢增长。如图 5 所示,在强协同环境下,如果起始时城市干旱风险防范能力很强,则城市干旱防范能力水平、响应能力水平和恢复能力水平随着时间的推进都比较快速地增长。进一步比较图 4 和图 5 还可以看出,在弱协同环境下,城市干旱防范能力水平在 $t=1$ 时,增长到 7.8 的水平,远远高于响应能力和恢复能力在 $t=1$ 时刻的值 1.2 和 1.4,3 个子系统之间的发展很不平衡;而在强协同环境下,在 $t=1$ 时,仅增长到大于 5.8 的水平,此时响应能力和恢复能力的值分别为 2.6 和 3.2,3 个子系统之间的发展略为平衡。同时, $7.8 > 5.8$,说明在弱协同下,由于子系统之间的发展不平衡,防备子

系统获得了发展优势,后续会一直延续这种发展优势,更进一步加剧子系统之间的不平衡;而在强协同下,由于在 3 个子系统之间平衡分配发展资源,使得防范能力水平低于弱协同下的水平值,体现了在城市有限资源约束下子系统之间存在相互制约作用。

仿真结果表明:①在城市干旱风险防范能力水平都很强的情况下,强协同比弱协同会更加有力地推进城市干旱防范能力、响应能力和恢复能力的同时快速增长;②强协同比弱协同会更加促进 3 个子系统之间的互动,从而促进 3 个子系统之间的平衡发展,对于城市应对干旱更有效率。③在城市有限资源约束下,3 个子系统之间存在相互制约作用,强协同比弱协同在更加平衡子系统之间的发展的同时,会限制具有发展最优势的防范能力达到弱协同下的水平。城市旱灾具有影响范围广、持续时间长、在自然环境变化影响下高度不确定性的特点。城市供水保障策略,如开拓应急水源、外流域调水、水权交易等,均需要消耗很高的经济和社会成本。因此,城市旱灾管理还需要随着旱灾发生发展的状况,及时进行研判,以确定更进一步的城市供水保障策略,过度的防备策略容易造成不必要的成本损失。这些仿真结果体现了政府跨组织协调度促进城市干旱风险管理系统动态演进的机制。

3.2.3 两种管理模式的对比

对比图 2 和图 4 可以看出,在同样的弱协同环境下,如果起始时城市干旱风险防范能力不足,则防范能力、响应能力随着时间几乎没有增长,恢复能力仅有小幅缓慢增长;但是如果起始时城市干旱风险防范能力很强,即使协同较弱,防范能力、响应能力和恢复能力都会有明显增长。对比图 3 和图 5 则可以看出,在强协同环境下,如果起始时城市干旱风险防范能力不足,则防范能力、响应能力随着时间几乎没有增长,仅恢复能力有较大增长;但是如果起始时城市干旱风险防范能力很强,防范能力、响应能力和恢复能力都会有显著增长。因此,仿真结果表明:无论是在强协同还是弱协同环境下,城市干旱风险防范能力越强,防范能力、响应能力和恢复能力越会有显著快速增长。

4 案例模拟分析

鄂尔多斯市位于内蒙古自治区西南部,地处黄河上中游的鄂尔多斯高原腹地,下辖 7 个旗 2 个城区,人口 162.54 万人,其中城镇人口 108.37 万人,城镇化率为 66.7%,人口多集中在市府东胜区、各旗旗府以及工业园区,农牧区人口相对稀少,属北温带半干旱大陆性气候区,降水量少,蒸发量大,气候干旱,风大沙多,区域干旱指数(蒸发量与降水量之

比)达 5.7,造成鄂尔多斯季节性(每年 4—6 月)与随机性、连发性与连片性、历时长与影响广的干旱灾害特点。鄂尔多斯市 2002—2011 年生长季旱情的评估显示,重旱主要发生在鄂尔多斯市的西部,受旱区域从西部向东部不断扩大。2011 年,鄂尔多斯大旱给鄂尔多斯市带来了严重的经济损失。2020 年春季,鄂尔多斯市西部发生中旱以上干旱。鄂尔多斯的干旱风险日趋“结构化”^[32]。

鄂尔多斯市城镇化受水资源和煤炭资源的吸引而呈现出明显的两极特征:受水资源的制约,鄂尔多斯市境内的大量城镇分布于北部和东部黄河沿岸,呈现出沿河发展的趋势;而在南部,依托煤、天然气资源分布较多的城镇,呈现出延边发展的趋势。鄂尔多斯市生态环境具有明显的过渡性和波动性特点,对气候变化及人为扰动的响应极为敏感。随着西部大开发战略以及我国能源产业政策的实施,近年来鄂尔多斯市经济社会呈快速发展态势,经济总量快速增长。鄂尔多斯市水资源开发利用现状存在的主要问题有:①水资源总量不足,水资源短缺、供需矛盾突出;②水资源利用效率不高,与严峻的缺水形势不相适应,尚有节水潜力;③供用水结构不合理,有待调整优化;④局部水污染问题突出,水环境保护亟须加强;⑤水

土流失依然严重,需进一步改善;⑥水资源高效利用的管理机制尚未形成,不适应现代水资源管理需要。

2009 年鄂尔多斯市成立以市长担任总指挥的突发公共事件应急指挥部,2014 年市人民政府印发抗旱应急预案,建立了城市抗旱应急管理系统。通过发放调查问卷,获得鄂尔多斯市的干旱风险防范能力指数 $\alpha = 0.3546$,响应能力指数 $\beta = 0.4309$,恢复能力指数 $\gamma = 0.4309$,跨组织协同度支撑 $\theta = 0.4100$ 。

为了观察跨组织协同度支撑与子系统内部协调程度对城市干旱风险管理系统动态机制的影响,设计跨组织协同度支撑和 3 个子系统的内部协调程度分别处于很弱 ($\theta = 0.1, k_i = 0.1, i = 1, 2, 3$)、较弱 ($\theta = 0.4100, k_1 = \alpha, k_2 = \beta, k_3 = \gamma$)、较强 ($\theta = 0.8, k_i = 0.8, i = 1, 2, 3$) 和很强 ($\theta = 1.0, k_i = 1.0, i = 1, 2, 3$) 几种情况进行仿真。仿真初始状态均设为 $X_0 = (1, 1, 1)$ 。仿真结果表明,跨组织协同度支撑和内部协调程度在很弱和较强情况下的系统动态演进趋势分别与跨组织协同度支撑和内部协调程度在较弱和很强情况下的趋势相同。因篇幅所限,这里仅展示了跨组织协同度支撑和内部协调程度处于较弱和很强两种情况下的仿真结果,如图 6 所示。

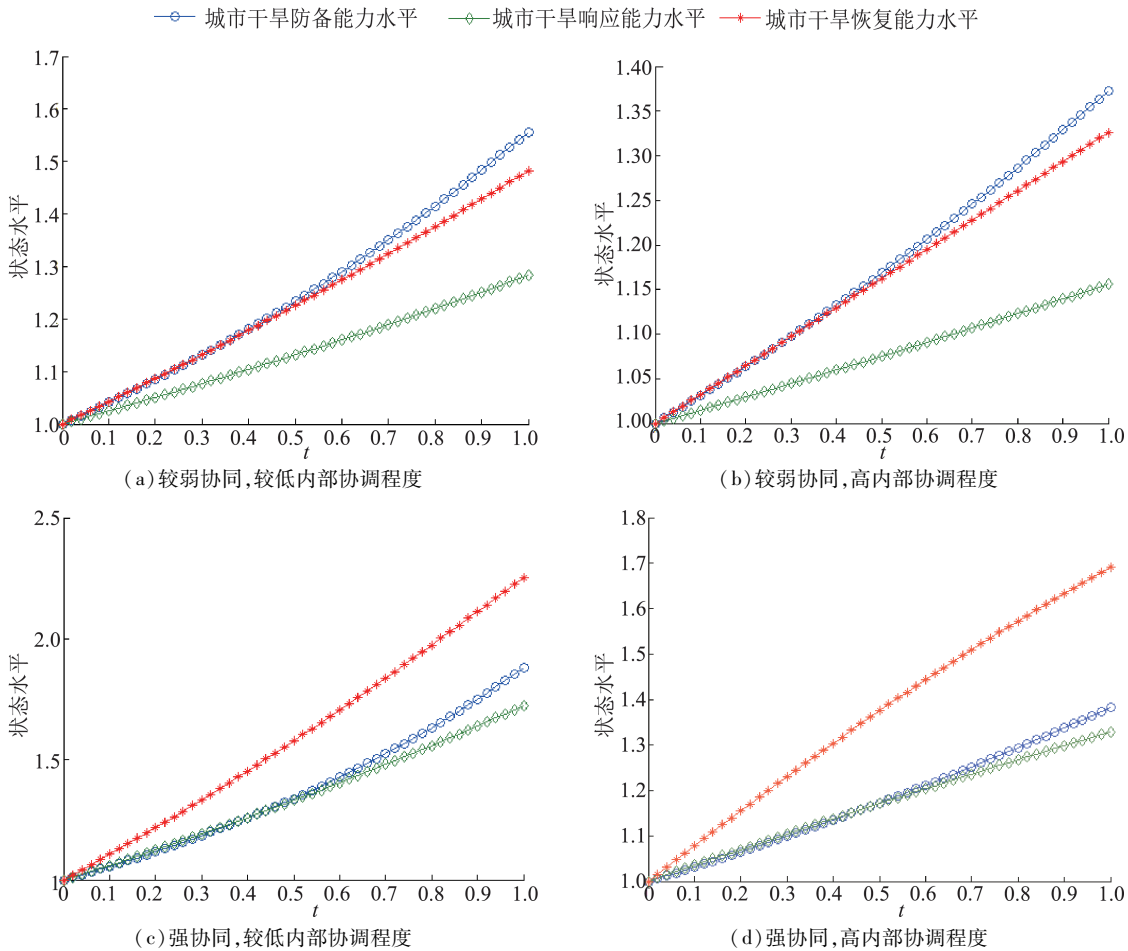


图 6 案例协同演化

从图 6(a)可以看出,鄂尔多斯市在当前的跨组织协同度支撑和较低的内部协调程度下,城市干旱防备能力水平、响应能力水平和恢复能力水平都会逐渐增长,但是增长较为缓慢。这是符合对鄂尔多斯城市干旱风险管理水平的发展预期的。鄂尔多斯市虽然已经建立了城市干旱应急预案体系,并且每年组织开展应急预案演练工作,在应急救援队伍和应急专家队伍建设方面取得了初步成果,但是应急预案体系还有待增强实用性和可操作性,在应急资金储备、装备储备和技术储备方面略显落后,政府相关部门协同仍是工作难点。按照目前的要求,应急管理办公室需要协调包括气象、水利、环保、交通、电力、通信、民政、卫生、公安、消防、财政等在内的几十家单位,在实际工作中凸显出因人员、资源、体制、机制等造成的能力不足问题。图 6(c)为其他参数不变,将跨组织协同度支撑增强之后的协同演化图,对比图 6(a)可以看出,城市干旱防备能力水平、响应能力水平和恢复能力水平都逐渐增长,并且增长加快。在图 6(a)中, $t=1$ 时,城市干旱防备能力水平、响应能力水平和恢复能力水平分别由 1 增长到 1.55、1.28 和 1.48,而在图 6(c)中,则分别由 1 增长到 1.8、1.7 和 2.25。说明,在所有因素不变的条件下,增强跨组织协同度支撑可以有效提高城市干旱防备能力水平、响应能力水平和恢复能力水平。

进一步地,对比图 6(a)和图 6(b)可以发现,在外部协同度不强的情况下,只增加内部协调程度效果不佳。图 6(a)和图 6(b)的跨组织协同度支撑都较弱,图 6(b)增强内部协调程度以后,城市干旱防备能力水平、响应能力水平和恢复能力水平的增长反而不如内部协调程度较弱下的情况。图 6(a)中, $t=1$ 时,城市干旱防备能力水平、响应能力水平和恢复能力水平分别由 1 增长到 1.55、1.28 和 1.48,而在图 6(b)中,则分别由 1 增长到 1.375、1.15 和 1.325。这说明了城市干旱风险管理系统的整体性与 3 个子系统的独立性之间的辩证关系,3 个子系统是相互独立的,但是不能脱离开彼此独自运行,三者之间的相互协调对三者的的发展具有重要的促进作用。图 6(c)和图 6(d)的对比发现,在外部协同度增强,内部协调程度也增强的情况下,反而引起子系统增长水平的降低。图 6(c)中, $t=1$ 时,城市干旱防备能力水平、响应能力水平和恢复能力水平分别由 1 增长到 1.8、1.7 和 2.25,而在图 6(d)中,则分别由 1 增长到 1.39、1.32 和 1.69。可见在强外部

协同度下,内部协调程度也并不是越大越好。但是,图 6(a)和图 6(c),图 6(b)和图 6(d)的对比都说明,在内部协调程度不变的情况下,增强跨组织协同度支撑对于 3 个子系统能力水平的增长具有促进作用。

5 政策建议

全球气候的系统性变迁与频繁的人类活动大大增加了城市面临的干旱风险。我国城市长期面临着资源型或者水质型缺水问题,中央政府已经高屋建瓴地提出了建设海绵城市、节水型社会等战略举措,但是城市应对突发干旱灾害的能力仍需提升,需要运用系统工程思维和方法探索城市干旱灾害应对规律和策略。本文借鉴 B-Z 反应系统的隐喻,从复杂自组织系统的角度建立了城市干旱风险管理系统的演化模型,并对“危机—应对”和“风险常态化”模式下的城市干旱风险管理系统演化规律进行仿真研究。在此基础上,对我国城市干旱风险管理工作提出以下政策建议:

a. 城市干旱风险管理是一个多部门、跨组织协同工作的系统工程,必须打破组织部门之间的合作壁垒,在跨组织协同度和组织内部协调度之间取得平衡,通过建立信息共享、跨部门协调、跨部门联动机制增强跨组织协同度,提高对干旱灾害的实时反应和应对能力。

b. 城市干旱风险管理具有阶段性和长历程的特征,“风险常态化”模式比“危机—应对”模式具有更高效的风险管理效率和效果。通过应急水源储备、跨流域调水框架协议等措施建立旱灾前的防备管理系统,类似于充分的战前准备,平战结合,可以大大提高战时响应能力和战后恢复能力,能够大幅度减轻灾害影响。

c. 城市干旱风险管理枢纽是信息交汇、形势研判、资源调配、应急决策、跨组织协调的灵魂组织,要重视发挥城市干旱风险管理枢纽的领导地位和作用,对抗旱风险管理的各个子系统进行流程监控、任务评估、事件记录和经验总结,建立抗旱风险管理知识发现、知识储备、知识管理、知识复用的工作机制,在不断的风险管理实践中优化抗旱应急预案体系,提高风险管理中枢机构的组织管理水平和工作效率。

d. 城市旱灾具有影响范围广、持续时间长、在自然环境变化影响下高度不确定性的特点。城市供水保障策略,如开拓应急水源、外流域调水、水权交易等,均需要消耗很高的经济和社会

成本。因此,城市旱灾管理还需要随着旱灾发生发展的状况,及时进行研判,以确定更进一步的城市供水保障策略,过度的防备策略容易造成不必要的成本损失。这些仿真结果体现了政府跨组织协同度促进城市干旱风险管理系统动态演进的机制。

参考文献:

[1] ITUARTE L D M, GIAN SANTE C. Constraints to drought contingency planning in Spain: the hydraulic paradigm and the case of Seville[J]. Journal of Contingencies and Crisis Management, 2000, 8(2): 93-102.

[2] ANDREU J, Pérez M A. Decision support system for drought planning and management in the Jucar River Basin, Spain[EB/OL]. [2021-06-08.] https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=d076338dce5de41eeb6378480380e0ff&site=xueshu_se.

[3] ESTRELA T, VARGAS E. Drought management plans in the European Union: the case of Spain [J]. Water Resources Management, 2012, 26(6): 1537-1553.

[4] SIVAKUMAR M V K, WILHITE D A. Drought preparedness and drought management[EB/OL]. [2021-06-10]. <https://www.researchgate.net/publication/267362571>.

[5] WILHITE D A, GLANTZ M H. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions [J]. Water International, 1985, 10(3): 111-120.

[6] WILHITE D A. Drought: a global assessment [M]. London: Routledge, 2000.

[7] WILHITE D A, HAYES M J, KNUTSON C, et al. Planning for drought: moving from crisis to risk management [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36(4): 697-710.

[8] United Nations. Natural hazards and unnatural disasters: the economics of effective prevention [R]. Washington: The World Bank Press, 2011.

[9] 吴志勇, 程丹丹, 何海, 等. 综合干旱指数研究进展[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 36-45.

[10] 冯平. 供水系统干旱期的水资源风险管理[J]. 自然资源学报, 1998, 13(2): 139-144.

[11] 屈艳萍, 吕娟, 苏志诚. 中国干旱灾害风险管理战略框架构建[J]. 人民黄河, 2014, 36(4): 29-31.

[12] 刘兆胜. 基于干旱管理的行动措施和触发点探析[J]. 水利技术监督, 2019(3): 96-99.

[13] 戴静娜, 张泽中, 齐青青, 等. 旱灾风险管理的研究进展[J]. 中国水利, 2014(5): 41-45.

[14] 张乐, 王慧敏, 佟金萍. 云南极端旱灾应急管理模式构建研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(2): 161-168.

[15] 陶鹏, 童星. 我国自然灾害管理中的“应急失灵”及其

矫正[J]. 江苏社会科学, 2011(2): 22-28.

[16] 腾五晓, 王清, 夏剑霞. 危机应对的区域应急联动模式研究[J]. 社会科学, 2010(7): 63-68.

[17] 张景平, 王忠静. 中国干旱区水资源管理中的政府角色演进: 以河西走廊为中心的长时段考察[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版), 2020, 49(2): 1-20.

[18] 唐明, 邵东国. 旱灾风险管理的基本理论框架研究[J]. 江淮水利科技, 2008(1): 7-8.

[19] 张海波, 童星. 中国应急管理结构变化及其理论概化[J]. 中国社会科学, 2015(3): 58-84.

[20] 李树军. 石家庄市城市干旱初探[J]. 地下水, 2014, 36(3): 127-128.

[21] 王绍春. 昆明城市抗旱应急供水方案探析[J]. 水利规划与设计, 2013(6): 26-30.

[22] 刘学峰, 苏志诚, 吕娟, 等. 城市抗旱经济效益评估方法探讨及实践[J]. 中国防汛抗旱, 2009(6): 15-18.

[23] 吕治湖. 西峰区利用雨洪资源破解城市缺水难题[J]. 中国水利, 2006(15): 59-59.

[24] 商彦蕊. 干旱、农业旱灾与农户旱灾脆弱性分析: 以邢台县典型农户为例[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(2): 55-61.

[25] 李中锋. 运用现代管理理论构建干旱防备系统[J]. 中国防汛抗旱, 2011, 21(4): 45-48.

[26] 马骏, 彭苏雅. 新型城镇化、水资源利用效率与经济增长的关系研究[J]. 水利经济, 2021, 39(4): 8-13.

[27] 陈东景, 冷伯阳. 中国工业用水强度下降的省际贡献差异与空间相关性[J]. 水利经济, 2021, 39(5): 44-49.

[28] 金菊良, 汤睿, 周戎星等. 基于联系数的城市水生态文明建设评价方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(4): 1-6.

[29] 刘毅, 张志伟. 中国水权市场的可持续发展组合条件研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2020, 22(1): 44-52.

[30] 吴青熹. 资源下沉、党政统合与基层治理体制创新: 网格化治理模式的机制与逻辑解析[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2020, 22(6): 66-74.

[31] 张铁男, 韩兵, 张亚娟. 基于 B-Z 反应的企业系统协同演化模型[J]. 管理科学学报, 2011, 14(2): 42-52.

[32] 荀丽丽. 干旱风险的社会成因及其社会应对: 以内蒙古鄂尔多斯市乌审旗为例[J]. 黑龙江社会科学, 2013(6): 5-11.

(收稿日期: 2021-08-18 编辑: 陈玉国)

