

珠江三角洲咸潮入侵的“自然-人工” 二元系统动力学体系构建

徐礼强¹, 于海霞^{2,3}, 罗 欢¹

(1. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611; 2. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275;
3. 华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要:根据珠江三角洲咸潮上溯受自然-人工二元复合系统影响的特点,以磨刀门水道为例,考虑主要变量数据变化的稳定性及变量间依存的特征,对咸潮发生的自然和人工双重驱动因素贡献进行分解,建立结构完善、体系完整的“自然-人工”二元系统动力学模型。构建了磨刀门水道咸潮上溯的系统动力学模型指标体系,将系统划分为自然因子和人工因子 2 个子系统。其中自然因子子系统确定的状态变量有 6 个,相应的水准变量/变化速率共计 12 个,确定辅助变量(影响因子、影响系数等)共计 14 个;人工因子子系统确定的状态变量有 7 个,相应的水准变量/变化速率共计 14 个,确定辅助变量(影响因子、影响系数等)共计 14 个。进行基于 GIS 的二元系统动力学模型(DSD)系统开发,系统采用 MapX 控件,在 Visual studio. net 环境下,采用 C#. net 进行了二次开发,可实现决策支持等功能。

关键词:珠江三角洲;咸潮;二元系统动力学体系

中图分类号:X143

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2016)S1-0047-05

水资源是人类社会生存和发展的物质基础^[1],是一种基础性的自然资源和战略性的经济资源。人类活动开发和影响剧烈地区的水循环与水资源安全研究,是 21 世纪资源环境学科一个十分重要的问题^[2]。气候变化和人类活动对水循环的影响、极端洪旱灾害及其应对方法研究逐步成为水文水资源领域的重要任务。

珠江流域水资源时空分布不均,并且随着社会经济的发展,珠江下游地区的水体污染问题也日益严峻,水资源已成为制约该地区社会经济发展的瓶颈,枯水期咸潮上溯更加加剧了水资源短缺的局面。对于沿河流出口建设的城市,咸潮对城市供水的影响往往是一种普遍现象。珠海、澳门供水水源主要来自珠江磨刀门水道,磨刀门水道是西江、北江的主要出海口,水量丰沛。在丰水年和平水偏丰年份,一般不会出现供水问题。但在平水偏枯年份的枯水期或枯水年,由于上游径流不足以压制咸潮上溯,加上这些城市供水系统多数以抽取河流水作为水源,而取水口多在咸潮影响的范围内,往往会导致供水危机。为了抑制咸潮入侵,2005 年以来,在国家防

汛抗旱总指挥部主持下,水利部珠江水利委员会先后 9a 的枯季连续实施压咸补淡应急调水、珠江流域骨干水库统一调度和珠江水量调度。实践证明,流域和区域水资源合理调配是目前解决枯水期潮汐影响城市饮用水安全问题的一种有效途径,珠江三角洲入海水道径潮响应机理和调控方法的研究成为抑制咸潮亟待解决的关键科学问题。

随着人类活动的日益加剧,天然状态下的流域水循环模式发生了根本性改变,出现了由“取水-输水-用水-排水-回归”5 个基本环节构成的人工侧支循环圈,形成“天然-人工”双驱动力作用下的流域“二元”水循环模式^[3],水资源形成强大的“自然-人工”二元结构的再生系统。传统集总式模拟方法已不能全面描述“自然-人工”二元模式下的流域水资源演变过程,与合理配置方案相嵌套的水资源实时调度^[4]的方案(即“宏观总控、长短嵌套、实时决策、滚动修正”方法)可以解决不同时段流域来水随机条件下的多时段多目标决策问题^[5]。磨刀门入海水道分布着珠海、澳门许多重要的取水口,近年来因咸潮上溯形成了饮用水安全问题,“压咸补淡”、

基金项目:国家自然科学基金(51009156);广东省自然科学基金(10451061101005309)

作者简介:徐礼强(1976—),男,高级工程师,博士,主要研究方向为水环境与水利工程。E-mail: xu_liqiang@163.com

“枯水期水量统一调度”等人工调控在磨刀门水道的水循环中发挥越来越重要的作用,使得该水道呈现出典型的“自然-人工”二元水循环特征。识别“自然-人工”双重影响下咸潮形成与发生的关键驱动因子,构建咸潮入侵的系统动力学模型,解析径流-潮流响应机理,可为咸潮影响的三角洲地区调水压咸提供理论指导和技术支持。

1 咸潮上溯的系统动力学模型构建

1.1 系统动力学方法研究水环境问题的优点

系统动力学 (systems dynamics, SD)^[6] 是 20 世纪 50 年代由麻省理工学院 (MIT) 的 Forrester 教授创立的一门研究系统动态复杂性的科学。20 世纪 70 年代末由一批学者引入中国,该学科在研究复杂的非线性系统方面具有无可比拟的优势,广泛应用于经济、能源、环境、农业、林业、科技、医疗等领域。系统动力学以控制论、控制工程、系统工程、信息处理和计算机仿真技术为基础研究复杂系统随时间推移而产生的行为模式,把系统的行为模式看成是由系统内部的信息反馈机制决定的。环境系统模拟^[7]对于帮助理解社会、经济、环境等问题的过程、机制和关系,解决环境系统各层面尤其是复杂环境系统中的各种动力学关系具有重要作用。

系统动力学模型模拟是一种“结构-功能”模拟。它一反过去常用的功能模拟(也称黑箱模拟)法,从系统的微观结构入手建模,构造系统的基本结构和信息反馈机制,进而模拟与分析系统的动态行为。通过建立系统动力学模型,利用 DYNAMO 仿真语言在计算机上实现对真实系统的仿真,可以研究系统的结构、功能和行为之间的动态关系,以便寻求较优的系统结构和功能。

系统动力学基于系统论,并吸收控制论、信息论和决策论的精髓,融结构与功能、物质与信息、科学与经验于一体,沟通了自然科学和社会科学的横向联系。系统动力学最为突出的优点在于它能处理高阶次、非线性、多重反馈、复杂时变的系统问题,成为研究复杂大系统运动规律的理想方法。随着系统动力学在多领域的广泛应用,其方法也不断地更新。在 20 世纪 80 年代涌现出一批系统动力学专用模拟分析软件,其中 Vensim PLE (Ventata Simulation) 是其中具有代表性的一种。它是一个可视化应用软件,由 Ventata. inc 公司开发,主要用于政府决策,在 Windows 下运行,因而具有比在 DOS 下运行的 DYNAMO 语言有更大的可操作性。

系统动力学模型在水资源水环境领域的应用,主要集中在水资源承载力、水资源配置和水质模拟

等方面,我国不同学者在这些方面进行了研究。水环境问题研究将面对着包括自然系统和人工系统在内的纷繁复杂大系统,这个系统内既有自然因素的影响,又有经济、社会、文化等社会因素的作用。为此,该模型将在系统论指导下,立足于研究范围的关键科学难题,以系统工程方法为依据,着重从控制的可能性出发,研究动态调控对区域用水安全的支持作用。

系统动力学方法的主要优点:①采用一组差分方程来描述系统动态行为,且描述方法是分别对每对因果关系进行的,具有积木式的灵活性特点。该方法的这种特点使其比微分方程更简便、更灵活地反映系统的动态行为,因此有广泛的适用性。②系统动力学模型既有描述系统各个要素之间因果关系的结构模型,以此来认识和把握系统结构,又有专门形式的数学模型,据此进行仿真试验的计算,用以掌握未来系统的动态行为,是定性分析与定量分析相结合的仿真技术。③运用系统动力学研究咸潮上溯与以往其他研究方法(如采用一维、二维、三维数值模拟)相比,系统动力学能比较容易地得到不同方案的调控方案,计算结果显示,其更能真实地反映咸潮上溯与区域自然和人工双重系统的响应机制。④系统动力学帮助决策者了解和判断水环境系统的动态行为。用系统动力学模型计算的调控方案不是简单地给出所能给出的需水量,而是通过各种决策在模型上模拟,清晰地反映自然、人工双重影响与动态调控的相应关系。

由于磨刀门水道咸潮上溯研究涉及因子众多,又具有多目标、动态性和极限性等特点,因此,为了更快捷、客观地进行研究,主要采用系统动力学仿真模型(简称 SD 模型)进行定量计算的复合研究方法。

1.2 系统动力学方法的建模思路与方法

系统动力学的本质是一阶微分方程组。一阶微分方程组描述了系统各状态变量的变化率对各状态变量或特定输入等的依存关系。而在系统动力学中则进一步考虑了促成状态变量变化的几个因素,根据实际系统的情况和研究的需要,将变化率的描述分解为若干流率的描述。是一种面向实际的结构型建模方法,其主要特点是能方便地处理非线性和时变现象,能作长期的、动态的、战略性的仿真分析与研究。

SD 模型中,水准方程是主干,因为它系统描述了水准(状态)变量(流位)的变化规律,而实际上流位方程是欧拉法数值积分的表示,其中状态变量是系统的核心,表示系统在变化过程中某个具体时刻的状态,其一般形式为

$$LK = LJ + (IJK - OJK)dt \tag{1}$$

式中: L 为状态变量; I 为输入速率; O 为输出速率; dt 为计算步长(从过去 J 时刻到现在 K 时刻的时间间隔)。

式(1)在系统动力学专业软件 Vensim PLE 中用 INTEG 函数表示。在对问题定性分析的基础上,即在因果关系图、流程图和有关的数据、参数的基础上利用相关软件编制相应的方程,再加进选择的辅助变量,就可以进行计算机模拟试验,得出随着时间变化的定量结果。因为系统动力学研究的是复杂动态系统的问题,这种系统中的许多要素之间往往会形成正反馈回路,而处于正反馈回路中的一些状态变量(或称之为积累变量、流位变量、水平变量等,是系统中的一类重要因素)往往按照指数规律增加或减少。而这种按照指数规律变化的变量,开始时变化并不很明显,往往不符合实际情况,需要对一些指标进行调整,重新确定数量关系,进行计算,直到符合实际。

1.3 系统动力学进行研究的步骤

系统动力学认为系统与系统之间、系统内部各因素之间存在着因果关系,并且这种因果关系构成闭合的反馈回路。因此,明确系统边界后还需确定系统的构成单元和影响因素,然后确定各子系统的接口。

应用系统动力学进行研究的步骤如下:
(1)明确系统仿真目的。一般说来,系统动力学对系统进行仿真试验的主要目的是认识和预测系统的结构和未来的行为,以便为进一步确定系统结构、设计最佳运行参数以及制定合理的策略等提供依据。
(2)确定系统边界。系统动力学是研究封闭的系统,因此在明确系统仿真目的后,接着就要确定系统的边界,这是因为系统动力学所分析的系统行为是基于系统内部种种因素而产生的,假定系统尾部因素不会对系统行产生本质影响,也不受系统内部因素的控制。
(3)因果关系分析。通过因果关系分析明确系统内部各要素间的因果关系,并用因果关系的反馈回路来描述。
(4)建立系统动力学模型。系统动力学模型主要包括流程图和结构方程式 2 个部分。流程图是根据各影响因素之间的关系利用专用符号设计的,结构方程式是各因素间数量关系的体现,包括水准方程式、速率方程式、辅助变量方程式等。
(5)计算机仿真试验。把所确定的各种参数带入结构方程式,进行运算,得出各变量的值及相关变化图表。
(6)结果分析。为了解仿真试验是否达到预期目的,或者为了检验系统结构是否有缺陷必须要对仿真结果进行分析。
(7)系统模型的修正。根据仿真结果分析,对系统模型进行修正。修正内容

包括:修正系统结构,或修正系统运行参数、策略,或重新确定系统边界等,以便使模型能更真实地反映实际系统的行为。

1.4 模型变量及系统流图

用系统动力学方法建模,是通过把影响经济的各因素用流图的形式连接在一起,组成一个系统,以信息反馈控制理论和决策理论来定量模拟。模型由变量和方程式构成。变量有水准变量、速率变量和辅助变量,方程式有水准方程(也称积量方程)、速率方程、辅助方程、常量方程、初值方程和表方程组成。

根据珠江三角洲咸潮上溯受“自然-人工”二元复合系统影响的特点,以磨刀门水道为例,考虑主要变量数据变化的稳定性及变量间依存的特征,在参阅相关研究的基础上,将系统划分为自然因子和人工因子 2 个子系统。其中自然因子子系统确定的状态变量有 6 个,相应的水准变量/变化速率共计 12 个,确定辅助变量(影响因子、影响系数等)共计 14 个;人工因子子系统确定的状态变量有 7 个,相应的水准变量/变化速率共计 14 个,确定辅助变量(影响因子、影响系数等)共计 14 个。磨刀门水道咸潮上溯的系统动力学模型指标见表 1。根据子系统划分及确定的状态变量、水准变量/变化速率、辅助变量建立了系统流图,如图 1 所示。

表 1 磨刀门水道咸潮上溯的系统动力学模型指标

子系统	状态变量	水准变量/ 变化速率	辅助变量 (影响因子、影响系数等)
自然因子	径流	流量增加 流量减少	雨情、气象、水文
	潮汐	潮量增加 潮量减少	气象、大气环流、潮汐周期
	风况	增强咸潮 减弱咸潮	有利风向、不利风向
	波浪	增强咸潮 减弱咸潮	波高强度
	河口地形	利于咸潮 抑制咸潮	河道水深、阻力、纳潮量
	拦门沙	利于咸潮 抑制咸潮	面积、坎高
人工因子	改变水系	改变分流比 改变水动力	河网水深、分流比
	围垦及联围筑闸	改变分流比 改变水动力	水沙分流比、水位及行洪
	垦荒与水库建设	改变可控水量 改变水动力	调洪蓄沙、径流变率
	航道建设	利于咸潮 抑制咸潮	河道阻力、纳潮量
	河床采砂	利于咸潮 抑制咸潮	河床调整、纳潮量
	水量调度	控制分流比 控制关键断面	西、北江分流比,马口、三水断面
	闸泵取水	水质达标 水量达标	CI-达标、满足取淡水量

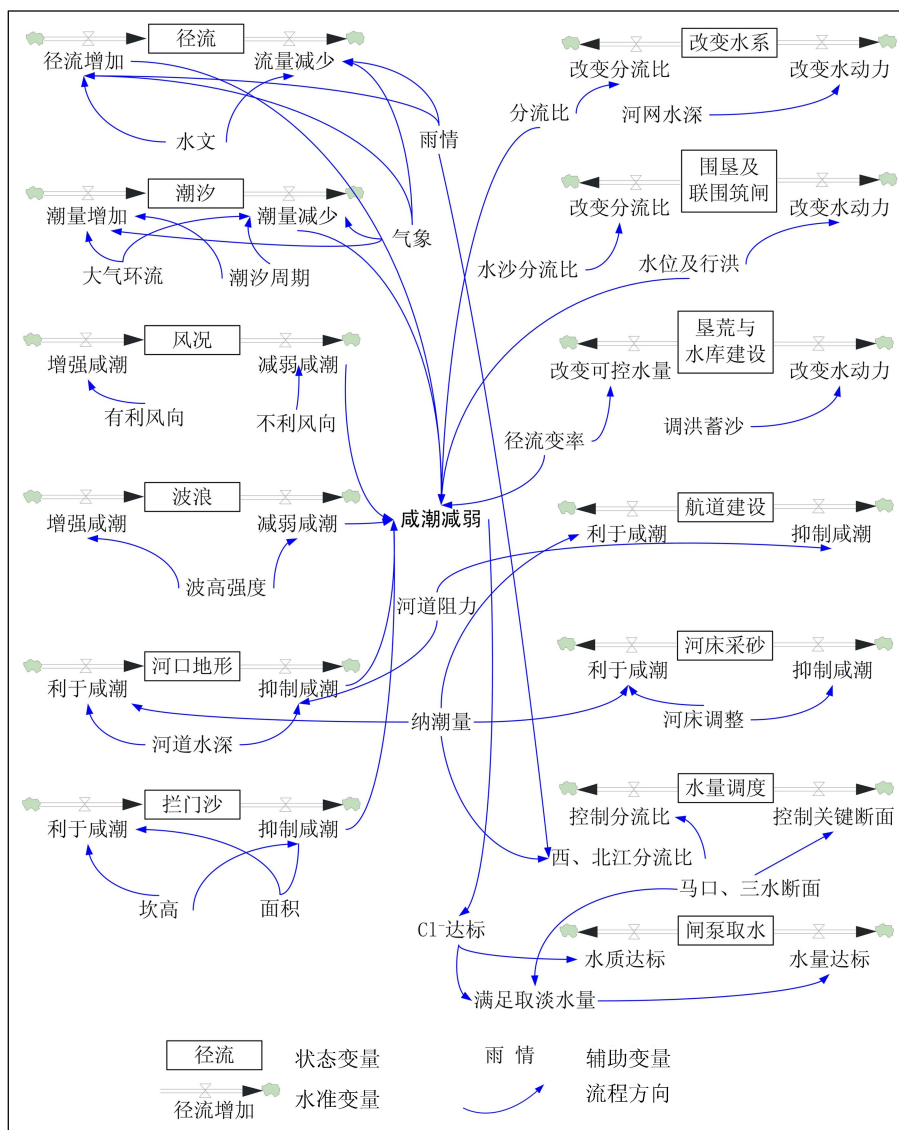


图1 磨刀门水道咸潮上溯的系统动力学模型结构流程

1.5 模型运行与有效性检验

采用 Vensim PLE 软件,将磨刀门水道咸潮上溯的系统动力学模型各种指标、参数代入仿真系统,模型投入实际应用和对其结果进行分析之前,必须检验模型的模拟运行结果和实际系统行为是否相符,以保证模型的有效性和可靠性。本文系统动力学模型的检验方法:(1)直观检验。根据专业知识和所掌握的系统动力学建模方法,直观地对模型的变量定义、边界选择、因果关系及系统方程进行检验,并做出正确的判断;(2)运行检验。建立系统动力学模型,并运用 Vensim PLE 软件进行模拟仿真,使用软件的模型检测和单位检测功能来检验模型方程的正确性、系统参数的合理性;(3)历史性检验。将模拟仿真部分结果与已有的历史数据进行对比,检验其符合的程度,判别模型的可信度。前 2 项要求在建模过程中已经进行了考虑,这是因为系统动力学模型的检验证实工作贯穿于循环反复建模的过程

中,磨刀门水道咸潮上溯的系统动力学模型在建模过程中满足前 2 项要求。

2 基于 GIS 的咸潮上溯二元系统动力学模型系统开发

2.1 系统基本情况

基于 GIS 的磨刀门水道咸潮上溯二元系统动力学模型 (DSD) 系统采用 MapX 控件, 在 Visual studio. net 环境下, 采用 C#. net 进行二次开发。

系统的数据主要分为电子地图数据和元数据,它们主要以 MapInfo 文件格式和关系型数据库的形式存储,因此系统的主要数据类型有两类:一是 Map 图层空间型数据库,用于存放空间位置数据;二是 Access 关系型属性数据库,用于存放关系型数据。基础地图实现了背景图层和决策的空间地图数据显示功能; Access 关系型属性数据库实现了系统决策的数据库支持功能。

2.2.1 系统主界面与功能显示

2.2.2 系统模块集成及功能实现

3 结 语

[illegible]

图3 模块集成示意图

参考文献:

- [1] 刘昌明,王红瑞. 浅析水资源与人口、经济和社会环境的关系[J]. 自然资源学报,2003,18(4):635-643.
- [2] 夏军. 华北地区水循环与水资源安全:问题与挑战[J]. 地理科学进展,2002,21(6):517-526.
- [3] 王浩,王建华,秦大庸,等. 现代水资源评价及水资源学科体系研究[J]. 地球科学进展,2002,17(1):12-17.
- [4] 王浩,王建华,贾仰文,等. 现代环境下的流域水资源评价方法研究[J]. 水文,2006,26(3):17-21,92.
- [5] 王浩,王建华,秦大庸,等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J]. 水利学报,2006,37(12):1496-1502.
- [6] FORRESTER J W. Industrial dynamics[M]. New York & London: The M. I. T. Press. and John Wiley & Sons Inc, 1961.
- [7] FORD A. 环境模拟:环境系统的系统动力学模型导论[M]. 唐海萍,史培军,译. 北京:科学出版社,2009.