

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.05.001

人水关系学的基本方程及模型构建

左其亭^{1,2}

(1. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室, 河南 郑州 450001)

摘要: 人水关系是人类与自然界关系中最重要关系之一,人水关系学是研究人水关系的一门新交叉学科,构建其基本方程和模型是深入研究人水关系的核心内容之一。基于前期研究工作和不同学科成果梳理,提出了人水系统“四大过程”(水循环过程、物质循环过程、生物过程、人文过程),总结给出了“四大过程”的基本方程及其耦合与计算方法,提出了考虑“四大过程”的分布式人水关系模型构建框架与人水关系模拟器的构建设想,并介绍了沁河流域分布式人水关系模型应用研究实例。人水系统“四大过程”是表征人水关系的重要基础,其基本方程是研究人水关系学的基础方程,由基本方程耦合构建的模型是模拟人水关系问题的重要工具,可为进一步完善人水关系学奠定基础,为深入研究人水关系模型提供思路。

关键词: 人水关系学;人水系统;基本方程;“四大过程”;分布式人水关系模型

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2024)05-0001-12

Basic equations and model construction of human-water relationship discipline

ZUO Qiting^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The human-water relationship is one of the most important relationships between human and nature. The human-water relationship discipline is a new interdisciplinary subject that studies the human-water relationship. Developing basic equations and models is one of the core contents of in-depth research on human-water relationship. Based on previous research and interdisciplinary findings, this study proposes the “four processes” in the human-water system (the water cycle process, the material cycle process, the biological process, and the humanistic process). The basic equations, the coupling and calculation method of the “four processes” are summarized and presented. The framework for constructing a distributed human-water relationship model considering the “four processes” and the construction idea of human-water relationship simulator are proposed. An application case study in the Qinhe River Basin is also provided. The “four processes” in the human-water system are important foundations for characterizing the human-water relationship. The basic equations of the “four processes” are the fundamental equations for studying the human-water relationship discipline. The model constructed by coupling basic equations is an important tool for simulating human-water relationship issues. This study lays the foundation for further improving the human-water relationship discipline and provides ideas for in-depth research on the human-water relationship model.

Key words: human-water relationship discipline; human-water system; basic equations; “four processes”; distributed human-water relationship model

人类自出现就与水打交道,人类生存和发展从来都离不开水。可以说,人水关系是人类与自然界之间最重要的关系之一,是人与自然之间永恒的、不可逾越的一种基本关系。人水关系研究可以追溯到很久以前,从人类早期认识洪水过程、开发利用水资源就在探索人水关系^[1]。当然,这一漫长阶段只能算是人水关系研究的萌芽阶段。为了系统研究人水关系问题,左其亭于 2021 年第一次提出人水关系学的概念及学科体系^[2],随后提出了人水关系学的基本原理及理论体系框架^[3-4],逐渐形成了总体框架比较完善的新学科体系^[1]。

基金项目: 国家科技基础专项“第三次新疆综合科学考察”项目(2021xjkk0703);国家自然科学基金项目(52279027)

作者简介: 左其亭(1967—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: zuoqt@zhu.edu.cn

引用本文: 左其亭. 人水关系学的基本方程及模型构建[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 1-12.

ZUO Qiting. Basic equations and model construction of human-water relationship discipline[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(5): 1-12.

人水关系的相关研究比较多,如研究人类活动对水系统的影响作用^[5]、水系统变化对人类活动或人体健康的影响^[6]等。针对人类活动和天然状态下的水循环模拟研究成果也非常丰富,如人工-自然二元水循环研究^[7]、人类活动参与下的分布式水文过程模拟研究^[8],这些都属于人水关系学的研究范畴。目前专门针对人水关系的系统研究还比较少,但也有一些成果,如人水系统相互作用关系的分析^[9]、人水关系耦合度量指标研究^[10]、人水关系时空变化分析^[11]以及人水和谐论的相关研究^[12]等。人水关系学提出时间不长,这方面的专门研究也较少,尽管笔者在前期研究中已建立了人水关系学的学科体系、理论框架,介绍了其研究方法和应用实践^[1],但缺少针对人水关系基本方程的系统总结,这直接影响到人水关系学的发展根基。基于这一现状,本文系统研究人水系统的关键过程,给出表征人水关系的基本方程,阐述这些基本方程的耦合计算方法和应用前景。

1 人水系统“四大过程”及理解

1.1 “四大过程”框架

人水关系复杂,究其原因,主要在于其相互作用关系及其机理复杂。理清楚其作用关系是定量化研究的重要基础,但这并非易事。为了揭示人水关系的作用机理,需要剖析其研究对象,总结其作用过程。通过对人水系统的分析认为,一般的人水系统存在水循环过程(water cycle process)、物质循环过程(material cycle process)、生物过程(biological process)、人文过程(humanistic process),即“四大过程”,其关联关系如图 1 所示。

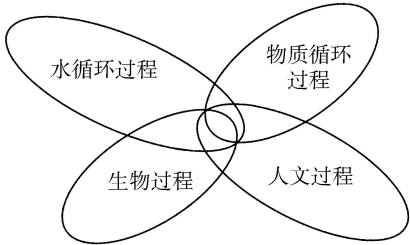


图 1 人水系统“四大过程”关联关系示意图

Fig. 1 Association graph of “four processes” in the human-water system

1.2 “四大过程”的解读

1.2.1 水循环过程

水循环是地球上一个重要的自然过程,它通过降水、截留、入渗、蒸散发、地表径流、地下径流等环节,将大气圈、水圈、岩石圈和生物圈相互联系起来,并在它们之间进行水量和能量的交换。水循环是影响自然环境演变的最活跃因素,是地球上淡水资源的获取途径,也是实现水资源可持续利用的最主要属性。

在水循环过程中,伴随着大量的物质循环,包括自然界岩石溶解形成的矿物质、土壤和泥沙组分等;同时也蕴含一定的水生生物,为生物繁衍生息提供水和矿物质营养。此外,人类在经济社会活动中不断地取水、用水和排水而产生的人为水循环环节,使自然水循环过程更加复杂。人类取水、用水和排水已经严重影响(或干扰)到自然界的水循环,许多流域在天然降水并未减少的情况下出现了河道断流、湖泊干涸、地下水枯竭等问题,就是人类活动带来的影响。因此,人水关系研究需要考虑自然和人类活动共同影响的水循环过程。

1.2.2 物质循环过程

在水体中,除了水分子外,往往伴随着一些其他物质,包括各种盐类矿物质(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等),气体和某些有机化合物等溶解性物质,铁、铝、硅化合物和腐殖物等胶体物质,泥沙、原生动物、藻类、细菌、病毒以及高分子有机物等组成的悬浮物质,以及锂、锶、锌、硒、碘化物、偏硅酸、游离二氧化碳和溶解性总固体等特定营养物质。

这些物质在水体会经历一系列复杂的物理、化学及生物过程,并导致其在水体中的含量不断变化。其中,物质在水中的物理化学作用表现为迁移与扩散、吸附与解吸、沉淀与再悬浮、降解等。

水体中的这些物质,有些是有益成分,是人体和生物生存不可缺少的物质基础,有些是有害成分,或者达到一定浓度后是有害的。同时,水体中这些物质的含量大小也会影响到水体的应用范围和价值,与经济社会发展和生态环境质量都有密切联系。因此,人水关系研究需要描述水体中这些物质的循环过程。

1.2.3 生物过程

包括人类在内的所有生物都要从周围的环境中获取空气、水分、阳光、热量和营养物质。生物在生长、繁育和活动过程中又不断向周围的环境释放和排泄某些物质,死亡后的残体也复归环境。所有生物都依照上述规律生活在生态系统中。

水是整个生态系统中最敏感的因素之一。当前出现的绝大多数生态环境问题都直接或间接与水有关。同时,生物过程中伴随着从水体中获取水分又不断向水体中释放和排泄物质。

所有生物都生活在特定的生态系统中,与周围物质和环境相交互。生物过程与生态环境质量密切相关,与人类生存环境、生活物质获取、经济生产资料来源密切相关。因此,人水关系研究需要描述生物过程。

1.2.4 人文过程

人文过程是人文系统中与人类发展有关的社会活动、经济活动、科技创新、宣传教育、人文关怀等构成的发展过程。社会进步是社会指标由低级向高级的运动和发展过程,或者特定发展阶段中整体运动和发展过程。经济活动是人类为了生存和发展而经过劳动过程或支付适当代价以换取商品或服务的行为。

在人文过程中,需要水的参与,需要从自然界获取物质,需要生态环境支撑并提供生存生产资料。因此,人文过程与水循环过程、物质循环过程、生物过程密切相关。

2 人水系统“四大过程”基本方程

2.1 水循环过程方程

水循环过程是指地球上各种形态的水,在太阳辐射、地球引力等作用下,通过蒸发、水汽输送、凝结降水、下渗以及径流等环节,不断地发生相态转换和周而复始运动的过程^[13]。水循环是水文学的基础性概念,其描述的基本方程也比较成熟,其遵循的基本原理是水量平衡原理。基于水量平衡原理,按照研究对象不同可写出不同的方程表达式,统称为“水循环过程方程”。

2.1.1 计算单元水量平衡方程

任意选择的计算单元(流域或区域),在任意的时段内,其输入的水量与支出的水量之差等于其蓄水量的变化量。即在水循环过程中,水量收支平衡。

$$W_{in} - W_{out} = W_2 - W_1 = \Delta W \tag{1}$$

式中: W_{in} 、 W_{out} 分别为计算时段内计算单元的总输入水量和总输出水量; W_1 、 W_2 分别为计算时段始、末计算单元的蓄水量; ΔW 为计算时段内计算单元蓄水量的变化量, $\Delta W > 0$ 表示蓄水量增加, $\Delta W < 0$ 则表示蓄水量减少。

在式(1)中,总输入水量、总输出水量均可能与人类活动、生态系统、物质迁移转化有关,因此,该水循环过程方程可以与其他三大过程(物质循环过程、生物过程、人文过程)产生耦合关联。

2.1.2 计算单元水循环过程微分方程

在式(1)两边对时间 t 求导,即可得到水循环过程微分方程式:

$$Q_{in,t} - Q_{out,t} = \frac{dW_t}{dt} \tag{2}$$

式中: $Q_{in,t}$ 、 $Q_{out,t}$ 分别为 t 时刻计算单元的总输入流量和总输出流量; W_t 为 t 时刻计算单元的蓄水量。

2.1.3 微分单元水循环过程微分方程

如图 2 所示,在点 $P(x, y, z)$,针对微分单元 $\Delta x \Delta y \Delta z$,在 x 方向流入微分单元的水量为 $(\rho v_x)|_{(x-\frac{\Delta x}{2}, y, z, t)} \Delta y \Delta z \Delta t$,流出微分单元的水量为 $(\rho v_x)|_{(x+\frac{\Delta x}{2}, y, z, t)} \Delta y \Delta z \Delta t$,其中 ρ 为水体密度, v_x 为 x 方向的流速。

x 方向流入流出微分单元的水量差为 $(\rho v_x)|_{(x-\frac{\Delta x}{2}, y, z, t)} \Delta y \Delta z \Delta t - (\rho v_x)|_{(x+\frac{\Delta x}{2}, y, z, t)} \Delta y \Delta z \Delta t$,该水量差可进一步表示为 $\frac{(\rho v_x)|_{(x-\frac{\Delta x}{2}, y, z, t)} - (\rho v_x)|_{(x+\frac{\Delta x}{2}, y, z, t)}}{\Delta x} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t$ 。当 $\Delta x \rightarrow 0$,该水量差就等于 $-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t (\Delta x \rightarrow 0)$ 。

同理,得到 y 、 z 方向流入流出微分单元的水量差分别为 $-\frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t (\Delta y \rightarrow 0)$ 、 $-\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t (\Delta z \rightarrow 0)$,其中 v_y 、 v_z 分别为 y 、 z 方向的流速。

Δt 时间内,流入与流出单元体总的水量差为 $-\left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}\right] \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t$ 。

单元内水量为 $\rho \Delta x \Delta y \Delta z$ 。如果是地下水,由于地下水充填在含水层中,单元内水体体积与孔隙度有关,

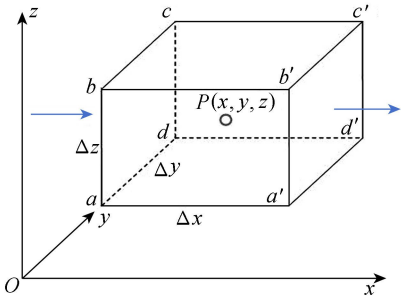


图 2 水体微分单元示意图
Fig. 2 Schematic diagram of water body differential element

设孔隙度为 n , 则单元内水量为 $\rho n \Delta x \Delta y \Delta z$ 。本文只推导了地表水公式, 针对地下水也可以推导出类似公式。

Δt 时间内单元体水量的变化量为 $\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Delta x \Delta y \Delta z) \Delta t$ 。根据水量平衡方程, 得到该微分单元的水循环过程微分方程:

$$-\left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z}\right] \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{\partial}{\partial t}(\rho \Delta x \Delta y \Delta z) \tag{3}$$

式(3)是描述任意水体微分单元的水循环过程方程, 是水体的连续性方程。根据特定条件, 可以对其简化, 再结合其他方程或边界条件, 就可以进行求解计算。在地下水运动研究中, 考虑孔隙度 n , 在不同含水层条件下可以得到不同地下水运动的基本微分方程, 已在地下水计算中得到广泛应用。

2.2 物质循环过程方程

物质循环过程是指地球上除水分以外的各种物质不断变化的过程, 是人类和生物生存繁衍所依赖的物质来源。水体中蕴含着大量有益的物质成分, 当然也存在有害的物质, 特别是有害物质浓度达到一定程度后会带来严重危害甚至是生态灾难。因为不同物质特性存在差异, 描述其循环过程的基本方程也千差万别, 甚至有些物质的基本方程难以描述。这里只介绍比较通用的物质迁移转化方程, 统称为“物质循环过程方程”。

物质迁移转化方程是根据水体中水流连续性原理、能量守恒原理、物质转化与平衡原理而建立的, 用以模拟物质运动和变化过程的最基本方程, 是较为成熟的方程(如文献[13]介绍的水质迁移转化方程), 也派生出很多分支学科, 如研究泥沙动力学及其相关泥沙问题^[14], 也属于这一范畴。

2.2.1 计算单元物质循环方程(零维物质基本方程)

把水体看成一个计算单元, 认为水体中物质完全混合, 物质浓度大小分布均匀。根据水量平衡方程和质量平衡方程, 可以建立非稳定态和稳定态方程。

a. 非稳定态方程: 流量、物质浓度随时间而变化, 表现为

$$\frac{dc}{dt} = \frac{Q_{in}}{V} c_{in} - \frac{Q_{out}}{V} c + \sum S_i \tag{4}$$

式中: c 为单元水体内的物质浓度; c_{in} 为流入该单元水体的物质浓度; Q_{in} 、 Q_{out} 分别为流入、流出该单元的流量; V 为该单元的水体体积; $\sum S_i$ 为该单元的源漏项, 表示各种作用(如生物降解作用、沉淀作用等)使单位水体的某种物质 i 在单位时间内的变化量。 $\sum S_i$ 增加时取正号, 称源项; 减少时取负号, 称漏项。

b. 稳定态方程: 流量(Q)、物质浓度不随时间而变化, $\frac{dc}{dt} = 0$, $Q_{out} = Q_{in} = Q$, V 为常数, 则式(4)简化为稳定态方程:

$$c = c_{in} + \frac{V}{Q} \sum S_i \tag{5}$$

在式(4)和式(5)中, 人类活动可以通过引水、排水以及排放其他物质, 带来方程变化, 使该方程与水循环过程、人文过程建立联系。

2.2.2 一维物质基本方程

对于河流来说, 如果物质浓度在断面上均匀, 只随流程方向(x 方向)发生变化, 就可以构建一维物质基本方程。

如图3所示, 假定某一微分河段长为 dx , Q_x 、 Q_{x+dx} 分别为通过上、下断面(面积为 A_x 和 A_{x+dx})的流量, c_x 、 c_{x+dx} 分别为上、下断面水流的物质浓度, $M_{1,x}$ 、 $M_{1,x+dx}$ 分别为上、下断面的物质分子扩散通量, $M_{2,x}$ 、 $M_{2,x+dx}$ 分别为上、下断面的物质紊动扩散通量, $M_{3,x}$ 、 $M_{3,x+dx}$ 分别为上、下断面的物质离散通量, $\sum S_i$ 为河段内部各种作用引起的单位水体在单位时间内的物质变化量, 即源

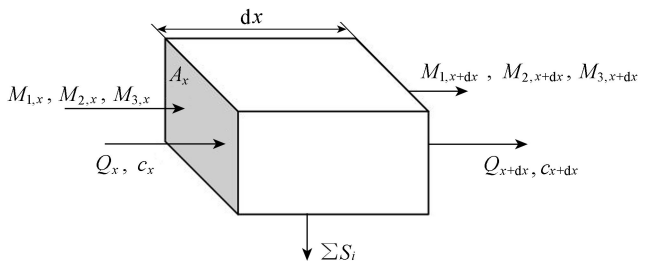


图3 一维微分河段示意图

Fig.3 Schematic diagram of one-dimensional differential river segment

漏项。结合水体中各种物质的物理化学特性,根据质量守恒原理,可建立一维物质基本方程如下:

$$\frac{\partial cA}{\partial t} + \frac{\partial cQ}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(E_{mx} + E_{lx} + E_{dx}) \frac{\partial cA}{\partial x} \right] + \sum S_i A \tag{6}$$

式中: A 为过水断面面积; E_{mx} 为 x 方向的分子扩散系数; E_{lx} 为 x 方向的紊动扩散系数; E_{dx} 为 x 方向的离散系数。

对于均匀河段(即过水断面、流速、扩散系数均为常数),则式(6)可写为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(E_{mx} + E_{lx} + E_{dx}) \frac{\partial c}{\partial x} \right] + \sum S_i \tag{7}$$

河流的离散系数 E_d 一般要比分子扩散系数 E_m 、紊动扩散系数 E_l 大得多,后者通常可以忽略,则 x 方向的扩散系数 $E_x = E_{mx} + E_{lx} + E_{dx} \approx E_{dx}$,式(7)可简化为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v_x \frac{\partial c}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \sum S_i \tag{8}$$

如果浓度 c 不随时间变化,即 $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$,可得到稳态的一维方程:

$$v_x \frac{\partial c}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \sum S_i \tag{9}$$

2.2.3 二维物质基本方程

二维方程可分为水平二维和竖向二维两种情况。水平二维是指水体的流速和物质浓度仅在水平面的纵向、横向变化,在竖向(水深方向)混合均匀。例如浅水湖泊可简化为水平二维来处理。竖向二维是指水体的流速和物质浓度仅在纵向和竖向变化,在横向(宽度方向)保持不变。例如河道型水库可简化为竖向二维问题来处理。

假定某一浅水湖泊,将其沿 x 、 y 方向剖分成若干个微分水体单元,截取其中某一水体单元,设该单元长为 dx 、宽为 dy 、高为水深 h 。类似一维物质基本方程的推导过程,根据质量守恒原理,可得到水平二维基本方程:

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{\partial v_x ch}{\partial x} + \frac{\partial v_y ch}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial ch}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial ch}{\partial y} \right) + h \sum S_i \tag{10}$$

式中 E_x 、 E_y 分别为 x 、 y 方向的扩散系数(即分子扩散系数、紊动扩散系数和离散系数之和)。

对于竖向二维情况,将式(10)中的 y 换成 z 、水深 h 换成断面宽度 D ,就可得到类似形式的竖向二维基本方程。

2.2.4 三维物质基本方程

采用类似一维、二维方程的推导过程,可以推导出一个具有 x 、 y 、 z 坐标的三维物质基本方程:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial v_x c}{\partial x} + \frac{\partial v_y c}{\partial y} + \frac{\partial v_z c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(E_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \sum S_i \tag{11}$$

式中 E_z 为 z 方向的扩散系数。

2.3 生物过程方程

生物过程是生物生长、繁育和活动的一系列过程的总称,与自然界水循环、物质循环密切相关,既是人类生存发展的物质基础,又受人类活动的影响。

生物具有生命力,与周围环境密切联系,其生存和发展规律更加复杂,需要生物学及相关专业人员发现其变化规律,提出相应的基本方程。这里将介绍文献中已提出的部分生物过程方程,并统称为“生物过程方程”。

2.3.1 单种群增长速率方程

假设种群数量为 N 的某种群在 t 时刻的数量为 N_t ,从 t 到 $t+\Delta t$ 时间段中,平均种群增长速率 s 和平均种群相对增长速率 r 可分别表示为

$$\begin{cases} s = \frac{N_{t+\Delta t} - N_t}{\Delta t} = \frac{\Delta N}{\Delta t} \\ r = \frac{N_{t+\Delta t} - N_t}{N \Delta t} = \frac{\Delta N}{N \Delta t} \end{cases} \tag{12}$$

令 $\Delta t \rightarrow 0$, 得到在 t 时刻的单种群增长速率 s 和相对增长速率 r 的表达式:

$$\begin{cases} s_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{dN}{dt} \\ r_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{N \Delta t} = \frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \end{cases} \quad (13)$$

上述表达式可以表征某时刻单种群变化情况。如果进一步求解, 就得到不同的表达式, 以下仅介绍代表性方程以作示例。

2.3.2 单种群增长 Malthusian 模型

假定种群相对增长速率 r_t 为定值 r , 则可得到如下微分方程式:

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = r \quad (14)$$

其中, $r > 0$ 时表示增长过程, $r < 0$ 时表示递减过程。

已知初始条件: 初始时刻 t_0 , 种群数量为 N_0 , 对式(14)求积分可得:

$$r_{t-t_0} = \ln \frac{N}{N_0} \quad \text{或} \quad N = N_0 e^{r_{t-t_0}} \quad (15)$$

该模型(式(15))称为 Malthusian 模型^[15], 表达出种群增长是按指数无限增长。这在很多情况下不符合实际情况, 种群不太可能无限制增长, 因此需要对该模型进行修正。

2.3.3 单种群增长 Logistic 模型

针对 Malthusian 模型中种群无限增长的不合理问题, 用最大生长量 k 反映对种群的限制, 称为饱和种群量。

用 $\frac{k-N}{k}$ 表示种群的不饱和程度, 用 $r \frac{k-N}{k} = r \left(1 - \frac{N}{k}\right)$ 代替式(14)中的 r , 就得到反映资源有限性的 Logistic 模型^[16]:

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = r \left(1 - \frac{N}{k}\right) \quad (16)$$

在式(16)中, 当 N 较小时, 种群增长率接近于 r , 增长曲线接近于 Malthusian 模型曲线; 随着 N 的不断增大, 其增长率不断降低, 增长曲线逐渐远离 Malthusian 模型曲线, 向水平方向倾斜; 当 N 接近于 k 时, 种群增长率接近于 0, 几乎不再增长, 曲线接近于水平。得到的曲线是一条 S 形曲线, 称为 Logistic 曲线^[16]。

已知初始条件: 初始时刻 t_0 , 种群数量为 N_0 , 对式(16)求积分得到 Logistic 曲线方程式:

$$r_{t-t_0} = \ln \frac{N}{N_0} - \ln \frac{k-N}{k-N_0} \quad \text{或} \quad N = \frac{k}{1 + \frac{k-N_0}{N_0} e^{-r_{t-t_0}}} \quad (17)$$

2.3.4 考虑延迟的单种群增长 Hutchinson 模型

针对 Logistic 模型(式(16)), 如果考虑种群自我调节反馈不是立即发生的, 而是有一个延迟时间 τ , 就得到 Hutchinson 模型^[17]:

$$\frac{1}{N} \frac{dN_t}{dt} = r \left(1 - \frac{N_{t-\tau}}{k}\right) \quad (18)$$

考虑延迟时间的增长模型, 在自然界经常遇到, 如昆虫、鸟类疾病传播, 经常有一个潜伏期, 就需要考虑延迟时间。

2.3.5 具有竞争关系的两种群 Lotka-Volterra 模型

当两种物种共同利用空间时, 假如存在竞争关系, 如捕食和被捕食, 这时一个种群的变化率就会受到另一个种群的影响。20 世纪 30 年代, Lotka 和 Volterra 提出了 Lotka-Volterra 模型^[18-19], 用于研究具有竞争关系的两种群之间的变化关系, 其基本形式为

$$\begin{cases} \frac{dN_{1,t}}{dt} = r_1 N_{1,t} \frac{K_1 - N_{1,t} - \alpha N_{2,t}}{K_1} \\ \frac{dN_{2,t}}{dt} = r_2 N_{2,t} \frac{K_2 - N_{2,t} - \beta N_{1,t}}{K_2} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $N_{1,t}$ 、 $N_{2,t}$ 分别为 t 时刻种群 S_1 、 S_2 的数量; r_1 、 r_2 分别为种群 S_1 、 S_2 的增长率; K_1 、 K_2 分别为种群 S_1 、 S_2 的饱和种群量; α 为种群 S_2 对 S_1 的竞争强度系数; β 为种群 S_1 对 S_2 的竞争强度系数。

2.4 人文过程方程

人文过程是人类生长、繁育、发展和活动的一系列过程的总称,与自然界水循环过程、物质循环过程、生物过程密切相关。人文过程既能影响水循环、物质循环、生物过程,又受三大过程的制约。

人文过程方程用于表征经济社会发展关键指标的变化规律,属于社会学、经济学范畴。严格意义上说,人类属于生物范畴,人口增长是生物种群增长模型的一个特例,因此,上文介绍的生物增长模型也同样适用于人口增长的表达。因为人文过程除了人口变化外,对水系统影响非常重要的人类各种活动以及经济社会发展变化,如工业生产、农业生产、工程建设、城市建设等。本文为了表达上的方便,把人文过程从生物过程中分开。这里将介绍文献中已提出的人文过程方程,统称为“人文过程方程”。

2.4.1 人口、经济指标增长方程

参照上文介绍的生物种群增长模型,可以类似列出人口和其他经济社会指标增长方程。

a. 增长速率方程表达式:

$$s_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{dH}{dt} \tag{20}$$

$$r_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta H}{H \Delta t} = \frac{1}{H} \frac{dH}{dt} \tag{21}$$

式中: H 为人口或其他经济社会特定指标; s_t 、 r_t 分别为 t 时刻 H 的增长速率、相对增长速率。

b. 增长 Malthusian 模型:

$$r_{t-t_0} = \ln \frac{H}{H_0} \quad \text{或} \quad H = H_0 e^{r_{t-t_0}} \tag{22}$$

式中: H_0 为某指标在 t_0 时刻的数量; t_0 为初始时间; r 为 H 相对增长速率的定值。

c. 增长 Logistic 模型:

$$r_{t-t_0} = \ln \frac{H}{H_0} - \ln \frac{k-H}{k-H_0} \quad \text{或} \quad H = \frac{k}{1 + \frac{k-H_0}{H_0} e^{-r_{t-t_0}}} \tag{23}$$

式中 k 为指标 H 的最大生长量(约束量)。

d. 考虑延迟的增长 Hutchinson 模型:

$$\frac{1}{H} \frac{dH_t}{dt} = r \left(1 - \frac{H_{t-\tau}}{k} \right) \tag{24}$$

式中: H_t 为指标 H 在 t 时刻的数量; τ 为指标 H_t 的延迟时间。

e. 具有竞争关系的两指标 (H_1 、 H_2) Lotka-Volterra 模型:

$$\begin{cases} \frac{dH_{1,t}}{dt} = r_1 H_{1,t} \frac{K_1 - H_{1,t} - \alpha H_{2,t}}{K_1} \\ \frac{dH_{2,t}}{dt} = r_2 H_{2,t} \frac{K_2 - H_{2,t} - \beta H_{1,t}}{K_2} \end{cases} \tag{25}$$

式中: $H_{1,t}$ 、 $H_{2,t}$ 分别为指标 H_1 、 H_2 在 t 时刻的值; r_1 、 r_2 分别为指标 H_1 、 H_2 的增长率; K_1 、 K_2 分别为指标 H_1 、 H_2 的约束量; α 为指标 H_2 对 H_1 的竞争强度系数; β 为指标 H_1 对 H_2 的竞争强度系数。

2.4.2 经济学方程

在经济学中,有许多方程用于描述经济活动、预测经济行为和制定经济政策。

a. 生产函数方程。描述生产者使用生产要素(如劳动力、资本)来生产商品或服务,其方程为

$$Q_L = f(L, Z, \dots) \tag{26}$$

式中: Q_L 为产出生产量; L 为劳动力; Z 为资本。

b. 总需求-总供给方程。总需求-总供给方程用于分析宏观经济状况,描述总需求、总供给之间的关系,方程为

$$Y_D = C_C + C_I + C_G + (M_{out} - M_{in}) \tag{27}$$

式中: Y_D 为总需求; C_C 为消费支出; C_I 为投资支出; C_G 为政府支出; M_{out} 为出口; M_{in} 为进口。总供给是国内生产总值(GDP), 即有:

$$Y_G = G_{DP} \quad (28)$$

式中: Y_G 为总供给; G_{DP} 为国内生产总值。

c. IS-LM 模型方程。 IS-LM 模型是宏观经济学中用于分析产品市场和货币市场均衡的模型。IS 方程描述产品市场均衡时利率与国民收入之间的关系, LM 方程描述货币市场均衡时利率与国民收入之间的关系。IS 和 LM 方程分别为

$$Y_G = C(Y_G - T) + I(u) + C_G \quad (29)$$

$$\frac{M}{P} = L(u, Y_G) \quad (30)$$

式中: T 为税收; u 为利率; M 为货币供应量; P 为价格水平; $C(Y_G - T)$ 为消费函数; $I(u)$ 为投资函数; $L(u, Y_G)$ 为货币需求函数。

2.4.3 系统动力学模型

系统动力学方法是一种以计算机仿真技术为辅助手段, 研究复杂经济社会系统的定量分析方法。它自 20 世纪 50 年代中期创立以来, 得到了广泛应用, 包括在水资源开发利用、规划与管理等方面的应用。

系统动力学以反馈控制理论为基础, 以仿真技术为手段, 建立的方程主要包括状态变量(L) 方程、速率(R) 方程和辅助(A) 方程等。

a. 状态变量方程。 在系统动力学中, 状态变量是常见变量, 比如人口数、工业产值、农业产值、科技投入、工程建设投资、生活用水量、工业用水量、农业用水量等。状态变量方程可表示如下:

$$H_{t+1} = H_t + (S_{in} - S_{out}) \Delta t \quad (31)$$

式中: H_t 、 H_{t+1} 为 t 时刻、 $t+1$ 时刻的状态变量值; S_{in} 、 S_{out} 分别为时段内输入、输出的状态变量变化率; Δt 为 t 到 $t+1$ 的时段长。

b. 速率方程。 速率是状态变量在单位时间内输入与输出变化的量, 比如出生率、工业产值增长率、农业产值增长率、工程建设投资增长率等。速率方程就是表征速率的方程式, 可表示为

$$S = \frac{H_{t+1} - H_t}{\Delta t} = \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (32)$$

$$S_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{dH}{dt} \quad (33)$$

式中 S_t 为 t 时刻状态变量变化率。

c. 辅助方程。 辅助方程是对系统动力学模型的补充, 没有统一的标准格式, 可由现在时刻的其他变量表达, 如科技投入延迟、工程建设投资率、用水定额等。

3 基本方程耦合与模型构建

3.1 “四大过程”基本方程耦合与计算

针对复杂的流域或区域人水系统, 其“四大过程”相互作用、互为参数, 耦合在一起可以表征人水系统的作用机理和变化过程。如图 4 所示, 水循环过程方程为物质循环过程方程提供水载体, 为生物过程方程、人文过程方程提供用水; 物质循环过程方程为水循环过程方程提供物质, 影响物质浓度变化, 为生物过程方程、人文过程方程提供物质; 生物过程方程为水循环过程方程提供生态系统载体, 为物质循环过程方程提供利用和排放物质, 为水文过程方程提供生态环境; 人文过程方程对水循环过程方程起到影响和保护水双重作用, 为物质循环过程方程提供利用和排放物质, 对生物过程方程起到影响和保护生物双重作用。

并不是所有的问题都会涉及“四大过程”, 有些可能是简单问题, 如单一过程较少指标的情况。因此, 需要针对不同问题进行分类, 选择合理的方程和模型。某一个人水系统可能具有 1 个、2 个、3 个、4 个过程, 可能研究 1 个、2 个、3 个指标或者更多指标。

因为表征各个过程的基本方程有些非常复杂, 求解比较困难。求解方法主要有两种: 一是解析法; 二是数值法。

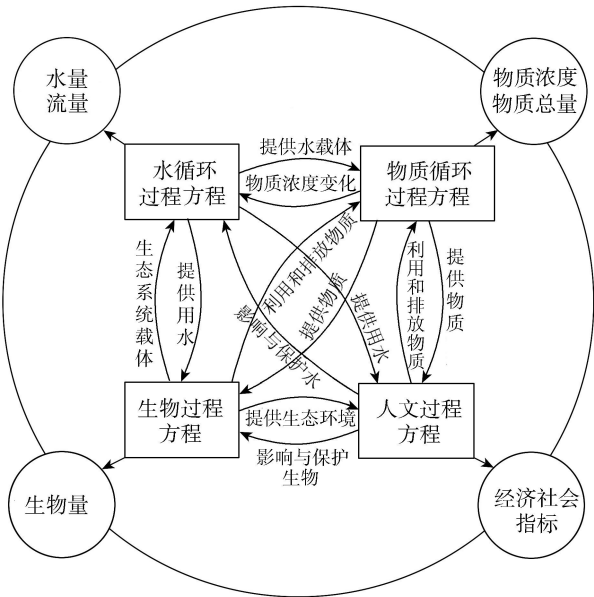


图 4 人水系统“四大过程”基本方程耦合示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the coupling of basic equations for “four processes” in the human-water system

解析法是通过高等数学领域的微分和积分变换等方法来建立模型的数学表达式,进而实现对数学模型求解。多数情况下,需要对基本方程进行尽可能地概化或简化,直至可以求出解析解。例如,针对三维物质循环方程,通过概化条件,转化为零维或一维基本方程,再根据已知条件可进行求解。

数值法是利用离散方法对数学模型进行离散,进而求出其数值解的方法。常用的数值法有有限差分法、有限单元法等,其中有限差分法是用差分商近似代替方程中的微分商的一种数值求解方法。

“四大过程”基本方程耦合计算将遇到以下难点问题:

a. 尺度问题。包括时间尺度不一致和空间尺度不一致问题。水循环过程方程的时间尺度主要是分、小时、日,部分是月、年;物质循环过程方程的时间尺度主要是分、小时、日;生物过程方程的时间尺度主要是月、年,部分是日;人文过程方程的时间尺度主要是年,部分是月。因此,进行耦合计算时,需要按照时间尺度上的差异进行具体处理。例如,人文过程方程计算的人口数一般是年人口数,就把年人口数作为一个定值代入到水循环过程方程中,即认为人口数在年内不变化;生物过程方程计算的生态用水量一般到月或日,认为月或日用水量均匀。空间尺度上,水循环过程方程的空间尺度可以是流域、区域,也可以是某水体、微分单元;物质循环过程方程的空间尺度主要是微分单元、某水体;生物过程方程的空间尺度主要是流域或区域;人文过程方程的空间尺度主要是区域,部分是流域。因此,进行耦合计算时,同样需要对空间尺度进行处理。例如,人文过程方程计算的农业产值,一般是行政区域上的产值,可以把农业产值按照耕地面积折算到空间网格上,再代入到水循环过程方程中。

b. 模型复杂带来的求解问题。人水关系复杂,按照以上“四大过程”方程构建的模型是复杂的模拟模型,特别是针对范围广、求解参数多、作用关系复杂的研究对象,其构建的模型极其复杂。这类模型涉及的数据源信息量大、计算过程烦琐、计算耗时长,一般算力难以胜任,需要借助超级计算机。

c. 基本方程构建及应用多学科交叉问题。“四大过程”方程涉及很多学科,其构建和具体应用需要多学科知识和人才的汇集。现在要完全实现这一目标还比较困难,人水关系模拟器或流域/区域模拟器的构建是未来的发展重点。目前这方面的工作已开始起步(如流域模拟器^[20]),有望得到迅速发展。

3.2 考虑“四大过程”的分布式人水关系模型

随着水利工程建设、工农业生产、城市化扩张等人类活动范围持续扩大、影响持续增强,对流域水系统的扰动也逐渐加强,导致自然水循环通量不断减小、社会水循环通量不断增大。因此,为了模拟更加复杂的人水系统,需要构建更加细致的模型,特别要关注人类活动的影响作用。基于这一目的和原因,需要综合考虑气候变化、工农业和生活取用耗排水、大型水库的调蓄作用、多水库联合控制作用以及其他主要人类活动,即考虑“四大过程”来构建人水关系模型。在文献[21]的基础上,考虑“四大过程”,绘制人水关系模型框架如

扩张(如下垫面变化、污水排放等)以及引调水工程等人类活动数据,评估人文活动对水质(如氮、磷浓度)、水量(如地表径流、地下水补给)、生态指标(如植被覆盖度、生物多样性)等的综合影响,进而反映人文过程与水系统的相互作用关系。

模拟效果及应用:①在水循环过程模拟方面,以径流模拟作为指标,选取沁河流域 3 个典型水文站实测径流量作为模型精度检验标准。其中 R^2 和纳什效率系数(NSE)计算结果均能通过检验标准,表明构建的 DHWR 模型对沁河流域的径流模拟效果较好,模拟径流数据与实测径流数据较为契合。②在物质循环过程模拟方面,通过对比五龙口断面水质监测数据与模型模拟值,可以发现模型对水质模拟具有较高精度,可用于流域面源污染负荷的模拟应用。③在生物过程模拟方面,通过模型计算了蒸散发量与潜在蒸散发量的比值,即生态压力指数,用以反映流域的生物变化过程,用作监测植被生长状况。④在人文过程模拟方面,通过模型计算了沁河流域引调水量与武陟断面出口站流量变化过程,定量表征人类活动对河流径流产生的影响。

3.4 前景分析与模拟器构建设想

在认识、分析人水关系过程中,采用模型方法无疑是一个非常好的途径,既可以仿真再现人水系统现状,也能模拟预测未来发展变化趋势;既能充分利用已知信息,又能智慧展现缺资料情况下的人水系统状况。在十分复杂的人水系统研究中,模型方法具有绝对的优势。在实际工作中,相关的模型应用非常多,如从空间尺度上,大到全球水循环模拟、全国水安全模拟、流域模拟、大型水利工程影响模拟、土地利用/覆被变化模拟、城市化建设模拟、灌区农业生产模拟等,小到河流水量、水质、水生态模拟,以及植物水分、生活用水、厂内耗水、地下水溶质运移等微观尺度模拟等。

为了定量分析大型调水工程的作用和影响、工程建设和土地利用带来的水系统变化、经济社会建设以及国家宏观政策的影响等问题,需要构建基于人水关系模型的模拟器,统称人水关系模拟器(human-water relationship simulator,HWRS)。例如,论证国家水网建设规划方案的科学性,采用常规的计算方法不可能科学模拟计算各个工程、各个方面、各个指标的变化趋势,在这种情况下进行水网建设具有较高风险甚至可能会出现重大问题,需要构建“国家水网建设模拟器”;论证南水北调西线工程是否可以规划建设,也同样面临着水系统变化、水质和其他物质变化、生物和水生态变化以及经济社会系统变化,是一个非常复杂的人水系统变化问题,采用常规的计算模型不可能完成其模拟预测工作,同样需要构建“南水北调西线工程模拟器”。一般的人水关系模拟器包括三大体系:监测体系、模拟体系、服务体系,详细内容可参见文献[20]介绍的长江模拟器。

4 结 语

人水关系复杂,研究内容丰富,实践中需要解决不同尺度的模拟问题,构建其基本方程和模型是其重要基础。基于这一现实需求,本文在前期研究工作的基础上,借鉴多个学科的研究成果,总结提出人水系统“四大过程”,即水循环过程、物质循环过程、生物过程、人文过程;并系统给出了“四大过程”的基本方程,提出了人水系统“四大过程”基本方程耦合与计算方法,给出了考虑“四大过程”的 DHWR 模型构建方法和实例,以及人水关系模拟器的构建思路。

本文解决了人水关系学的基本方程及其耦合计算问题,但仅仅是一个初步研究总结,构建模型还处于设想和初始阶段,针对复杂人水关系问题的模型研究任重而道远,需要多学科共同努力,需要大团队协作攻关,才能真正构建应用于重大工程建设模拟、重大政策影响模拟等复杂场景的人水关系模拟器。

参考文献:

[1] 左其亭. 人水关系学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2023:1-3.
[2] 左其亭. 人水关系学的学科体系及发展布局[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(3):1-5. (ZUO Qiting. Discipline system of human-water relationship and its development layout[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering,2021,32(3):1-5. (in Chinese))
[3] 左其亭. 人水关系学的基本原理及理论体系架构[J]. 水资源保护,2022,38(1):1-6. (ZUO Qiting. Basic principles and theoretical system of human-water relationship discipline[J]. Water Resources Protection,2022,38(1):1-6. (in Chinese))
[4] ZUO Qiting, ZHANG Zhizuo, MA Junxia, et al. Solutions to difficult problems caused by the complexity of human-water relationship in the Yellow River Basin: based on the perspective of human-water relationship discipline[J]. Water, 2022, 14

(18):2868.

[5] 夏军,石卫,王强,等.海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J].水资源保护,2017,33(1):1-8. (XIA Jun,SHI Wei, WANG Qiang,et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction[J]. Water Resouces Protection, 2017,33(1):1-8. (in Chinese))

[6] 夏军,陈进,余敦先.2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J].水利学报,2022,53(10):1143-1153. (XIA Jun, CHEN Jin,SHE Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(10):1143-1153. (in Chinese))

[7] 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. (WANG Hao,WANG Jianhua,QIN Dayong,et al. Theory and methodology of water resources assess ment based on dualistic water cycle model[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(12):1496-1502. (in Chinese))

[8] 张珂,张企诺,陈新宇,等.栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J].水资源保护,2021,37(5):94-101. (ZHANG Ke,ZHANG Qinuo,CHEN Xinyu,et al. Gridded Xin’ anjiang-dual, anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model[J]. Water Resouces Protection,2021,37(5):94-101. (in Chinese))

[9] SHIN S M,LEE S H,SHIN S K,et al. STPA-based hazard and importance analysis on NPP safety I&C systems focusing on human-system interactions[J]. Reliability Engineering & System Safety,2021,213:107698.

[10] CHOI S,LEE S O,PARK J. A comprehensive index for stream depletion in coupled human-water systems[J]. Journal of Hydro-Environment Research,2017,16:58-70.

[11] BAO C,ZOU J J. Analysis of spatiotemporal changes of the human-water relationship using water resources constraint intensity index in Northwest China[J]. Ecological Indicators,2018,84:119-129.

[12] 左其亭.人水和谐论及其应用研究总结与展望[J].水利学报,2019,50(1):135-144. (ZUO Qiting. Summary and prospect of human-water harmony theory and its application research[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(1):135-144. (in Chinese))

[13] 左其亭,窦明,马军霞.水资源学教程[M].2 版.北京:中国水利水电出版社,2016:64-70.

[14] 胡春宏,张晓明,于坤霞,等.黄河流域水沙变化趋势多模型预测及其集合评估[J].水利学报,2023,54(7):763-774. (HU Chunhong,ZHANG Xiaoming,YU Kunxia,et al. Multi model prediction and its ensemble evaluation of runoff and sediment change trend in the Yellow River Basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2023,54(7):763-774. (in Chinese))

[15] MALTHUS T R. An essay on the principle of population[M]. London:Pickering & Chatto Publishers,1978:1-8.

[16] VERHULST P F. Notice on the law that the population follows in its growth[J]. Correspondence on Mathematical Physics,1838, 10:113-26.

[17] HUTCHINSON G E. Circular causal systems in ecology[J]. Annals of the New York Academy of Sciences,1948,50(4):221-246.

[18] LOTKA A J. Elements of physical biology[M]. Baltimore:Williams & Wilkins,1926:295-312.

[19] VOLTERRA V. Variazioni e fluttuazioni del numero d’ individui in specie animali conviventi[M]. Rome:Società Anonima Tipografica Leonardo da Vinci,1926:32-41.

[20] 夏军,占车生,曾思栋,等.长江模拟器的理论方法与实践探索[J].水利学报,2022,53(5):505-514. (XIA Jun,ZHAN Chesheng,ZENG Sidong,et al. Theoretical method and practical exploration of Yangtze River simulator construction[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2022,53(5):505-514. (in Chinese))

[21] 左其亭.人水系统演变模拟的嵌入式系统动力学模型[J].自然资源学报,2007,22(2):268-273. (ZUO Qiting. The embedded system dynamic model used to human-water system modeling[J]. Journal of Natural Resources,2007,22(2):268-273. (in Chinese))

(收稿日期:2024-08-05 编辑:熊水斌)