

论河流功能

赵银军^{1,2}, 丁爱中¹, 李原园³

1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875
2. 广西师范学院北部湾环境演变与资源利用省部共建教育部重点实验室, 南宁 530001
3. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120

摘要 针对河流功能认知不深入的问题,从系统论观点出发,对河流功能本质进行了探讨,服务于河流功能的可持续利用,以期推动河流功能理论发展。研究表明,河流功能是河流系统与其环境相互作用过程中表现出的能力和效用,是河流系统发挥的有利作用,由河流系统结构决定,通过河流系统中的物质流、能量流和信息流实现,通过对自身及外部环境需求的满足表现,通过采取局部利益服从整体利益和低层次需求优先原则权衡对河流的需求实现河流功能和谐。

关键词 河流结构;河流功能;生命体

中图分类号 P512.31

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.33.002

River Functions

ZHAO Yinjun^{1,2}, DING Aizhong¹, LI Yuanyuan³

1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
2. Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resources Utilization, Ministry of Education; Guangxi Teachers Education University, Nanning 530001, China
3. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China

Abstract In order to deeply understand river functions, the essence of river function is discussed from the system theory for its sustainable utilization and it is expected to promote theoretical development of river function. The results show that, river function is the ability and effectiveness in the interactional process between river system and environment, it is determined by the structure of river system, achieved through the material flow, energy flow and information flow in the river system, and expressed through meeting demands for river own and external environment. River functional harmony was built by using principles that includes the local interest obedience overall benefit and the lower level needs priority.

Keywords river structure; river functions; life

0 引言

河流是地球上主要的淡水资源,与人类生存息息相关。人类开发利用和保护河流,最根本的目的是为了可持续使用河流功能。目前,受短期社会经济利益驱动以及对河流功能认识不足的影响,人类大肆利用河流某一方面功能,破坏了河流系统结构,部分河流甚至出现断流,严重损害了河流功能甚至使其丧失。据统计,中国海河、黄河、辽河、淮河的水资源开发率分别达到了90%、70%、65%、60%,均远超国际公认

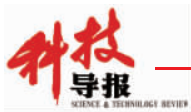
的40%警戒线,河流功能退化已成为制约中国经济社会发展的瓶颈之一,并且带来了许多隐性灾难^[1]。

对河流功能的研究多集中在河流功能区划^[2-4]、河流健康评价等方面。石瑞花等^[5,6]建立了河流功能评价指标体系,对河流功能定量分析进行尝试;赵银军等^[7,8]把河流功能分为3个一级功能及12个二级功能,并对二级功能进行表征。但上述研究均缺少对河流功能本质的探讨。本文从系统论的观点出发,探寻河流功能的本质,加深对河流功能的认知。

收稿日期:2013-05-30;修回日期:2013-09-15

基金项目:北京师范大学自主科研基金项目(2009SD-27);北部湾环境演变与资源利用省部共建教育部重点实验室项目(BBG1109);国家自然科学基金项目(41361023)

作者简介:赵银军,副教授,研究方向为河流功能,电子邮箱:crpp0104@163.com



1 河流系统

1.1 河流系统结构

河流系统是由河流源头、湿地、湖泊以及众多不同等级的支流和干流组成的流动的水网、水系或河系^[9]。其中水流是河流系统最重要的组成要素,是河流系统的动力所在和功能源泉,没有流动的水体,河流系统就无从谈起。水流中的悬浮物和边界是河流系统的另外两大要素^[9]。河流一般挟带有泥沙、生物等悬浮物,具有二相性,水流挟沙量受降雨条件、水土保持措施、河道采砂等影响;水中生物受水流状态、温度、营养物质和水质等影响。河流系统边界对水体以及水体中的悬浮物起约束作用,常见的有河槽、河漫滩、河堤、河岸带等,主要由自然的沙石、泥土、植被或者由混凝土等人工构筑物构成。河流系统内各要素间主要依靠泥沙等物质流、能量流以及信息流的运动相互联系、相互作用,使得河流系统具有整体性,规定了河流系统的质。

地球上的河流系统大小不等、形态各异、生物和非生物因子叠加作用各不相同、物质能量及信息流动千差万别,因此造就了丰富多样的河流系统。从系统角度看,河流系统具有系统的一切特征。物理结构表现为纵向、横向、垂向和时间维度上四维连续体(图1),生态结构表现为细菌、藻类、大型植物、原生动物、无脊椎动物、脊椎动物(如鱼类、两栖动物、爬行动物以及哺乳动物)等生物在个体、物种、种群、群落、生态系统5个等级上组织并构成复杂的生态系统,在结构层次上包括河流水产沙子系统、中下游河流输水输沙子系统、河口三角洲沉积子系统,外观形态上表现为面状和线状要素的耦合。

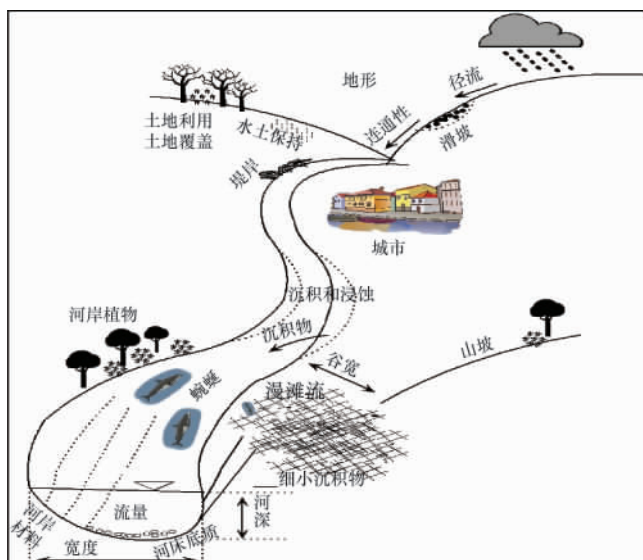


图1 河流系统物理结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of physical structure of river system

1.2 河流系统自然特征

系统普遍具有整体性、层次性、开放性、目的性、稳定性、

突变性、自组织性和相似性等特征。河流通过不断与外界交换抵消系统内熵增,保持系统正常秩序,并在时间和空间维度上不断发展和进化。依据系统论观点,河流系统具有如下特点:(1)以物质流、能量流和信息流的形式不断与外部环境进行交换,是一个开放系统;(2)存在非线性作用,只有系统内存在非线性关系,才能使系统各要素之间产生协调、竞争、调节,并通过涨落发生突变,使系统由无序变为有序^[10];(3)边界相对清晰,但涉及因素较多;(4)各要素之间相互作用,关系复杂;(5)处于不断运动中;(6)具有自组织性;(7)结构和功能具有突变性;(8)存在空间层次性和时空异质性。

河流系统处于不断运动过程中,理论上可存在平衡态、近平衡态和远离平衡态3种宏观状态。但现实中,河流系统只能处于近平衡态和远离平衡态,河流平衡态受外界条件限制不会实现^[11]。河流近平衡态是河流系统与外部环境处于相对平衡状态,呈线性作用关系,河流具有一定的抗干扰能力^[12]。河流处于远离平衡状态,与外部环境呈现非线性作用关系,水沙运动涨落可能将系统推向新的有序耗散结构。根据1967年普利高津提出的耗散结构理论,形成耗散结构需要具备以下4个条件:(1)必须是开放系统;(2)系统必须处于远离平衡态;(3)存在非线性相互作用;(4)通过结构-功能-涨落之间相互作用达到有序。河流系统在远离平衡态满足形成耗散结构的一切条件,可以建立有序稳定的耗散结构。

1.3 河流系统生命特征

河流作为自然界最大的自然生产力系统之一,为人类提供了丰富的物质和财富。传统人类中心主义者认为,河流只是为人类服务的客体,不存在主体性,进而忽略了河流自身的需求。当前,受人类活动巨大影响,全世界河流不同程度地出现了河源崩溃、河道淤塞、河床萎缩、湿地退化、尾间消失、河道断流、物种灭绝、水质污染等一系列病症,进而引发了生态移民、癌症村、盐碱化、血吸虫等一系列问题以及由此引发的隐性灾难,使人类感受到切肤之痛。由此发现,河流以及人与河流之间的关系问题,仅从纯自然科学角度认识和研究存在缺陷,还需人文社会科学提供思想认知工具,进而引发了人类对河流生命的思考,人类意识开始觉醒。2003年,李国英提出了“河流生命”的概念,是对河流认识的一个飞跃。

传统生命一般指有机体,人们可以很容易的区分生命体和非生命体。但受生命的复杂性影响,难以给出一个具体的定义。从不同科学角度,对生命的解释也各不相同。生理学认为,具有消化、呼吸、发育、生长、新陈代谢的系统均可视为生命系统;生态伦理学家指出,生命不仅指人类和其他有机体,而且也包括河流大地景观和生态系统^[13]。从哲学观点看,只要具有存在和消亡过程,都具有生命。生命的不同在于他们的存在方式,有的是生长、有的是运动、有的是流动,而互有差异^[14]。从这一角度讲,河流就是一个生命体。

河流由大自然孕育,一般开始于地质运动过程,经历河床下切、沟谷侵蚀、水系发育、河床调整,最终全线贯通,形成一条奔腾跌宕的河流。河流按照自身的规律自我组织、自我

维护、自我表达,通过这些方式实现自身的演化,完成自己的使命,从而实现自身的发展和演化^[4]。受地质运动等自然因素或人类活动影响,很多河流最终消亡。

水是河流生命的核心,流动性是其命脉。河流在持续流动过程中繁衍、滋养和推动了很多生命体的存在,具有本源意义上的生命^[5],是生物圈层面上的生命概念,具有以下5个方面的生命特征:(1) 河流具有再生性,河流平均更新周期为16d^[6];(2) 具有完整的水系通道;(3) 以流动为主要运动特征的开放动态系统,在运动过程中维系碳、氢、氧、氮、磷和硫6种常量营养元素反复循环;(4) 与生物多样共存共生;(5) 河流生命要素中,流量与流速代表了河流生命的规模和强度,洪水与洪峰是河流生命的高潮与能量顶峰,水质标志着河流生命的内在品质,湿地体现了河流生命的多样性^[3]。

人水矛盾的根本原因在于人类对河流价值主体地位的忽视,未能把河流看作生命体,尊重和平等对待这一生命。只有赋予河流生命意义,才能树立河流价值主体地位,才能正视人与河流的关系,才能改变以人为中心的价值取向。从哲学角度看,河流同人类一样,均由大自然创造,也是生命体,也拥有主体性地位和自身的内在价值,是价值关系的主体。

2 河流功能分析

2.1 河流功能概念

河流功能是河流系统与其环境相互作用过程中表现出的能力和效用,是河流系统发挥的有利作用。河流环境有内外之分,河流的外环境既可以是自然环境,也可以是其他系统和人。例如,流域降水、地质地貌、植被、河岸带、地下水位及人类活动等条件构成了河流的外环境,而河道内的地貌单元、光照、溶解氧、能量等条件属于内部环境。河流功能相应也有内外之分,河流外功能是河流系统与外部环境相互作用表现出的效用和作用,而河流内功能则是河流系统与内部环境相互作用表现出的效用和作用。河流内功能是其外功能的基础,内功能的状况决定着外功能的状况;河流外功能反作用于其内功能,外功能的充分发挥会刺激内功能的提高和进一步完善。一般来说,河流系统具有多重功能,会根据环境条件或服务对象的状态与要求表现出不同的功能类别和效益。河流功能在使用或传递过程中,质和质量始终随服务对象状态和要求而改善^[7]。当河流系统和人相互作用,满足人类需求时,河流外功能则主要表现为人类提供服务,被称为河流社会功能。而河流系统的内功能是通过系统的自组织性,维护河流系统有序,满足系统生命演化的需求。

2.2 河流结构决定河流功能

河流功能由河流系统内部结构决定。河流系统的结构和功能实际是河流系统中的水、沙、水生生物、河漫滩、河岸等要素相互联系、相互作用形成的河流系统整体性关系的两个方面。一定的河流系统结构具有一定的河流功能,河流功能不能离开河流系统结构独立存在。河流系统结构与河流功能

总是相互联系而存在,河流系统结构是河流功能的基础,河流功能依赖于河流系统的结构。对河流结构的优化外在的表现是对河流功能的优化。只有合理的河流系统结构,河流功能才能较好发挥。一定的河流系统结构决定了河流具有的功能,但河流功能的表现与具体的环境相关。利用河流的条件、时间、方式和对象等不同,即环境条件不同,河流所表现的功能也不同。现实中,河流系统功能需要接受外界的认定和评判。当河道比较顺直、坡降较小且宽浅时,河流系统可用作通航。当人类提出运输需求时,河流就表现出航运功能。当河流来沙粗粒床沙质较多时,河流系统就表现出强的造床作用,满足河流冲刷河道的需求。

河流系统结构隐藏于内,河流功能则表现于外,是河流系统的两种规定性。河流系统结构侧重于系统内要素间的关系,而河流功能侧重于系统具有的能力。河流某个功能过度发挥,会损害河流结构,而在一定范围内某个功能反复使用,可使相应结构更加完善。例如建坝后,增强了河流的供水和防洪功能,但下游水量减少、河道和湿地萎缩、河漫滩经常干涸以及水生群落改变,使河流系统结构发生较大改变。

在河流系统不断演化过程中,内部结构在一定范围内随机涨落,引起河流系统局部功能的改变。随机涨落不断驱动系统演化。当涨落通过相干效应不断放大超出河流系统自我调控范围时,一个随机的涨落得到河流系统整体的响应,引起河流系统结构的整体改变,建立了新的河流系统结构,必然产生新的河流功能(图2)。

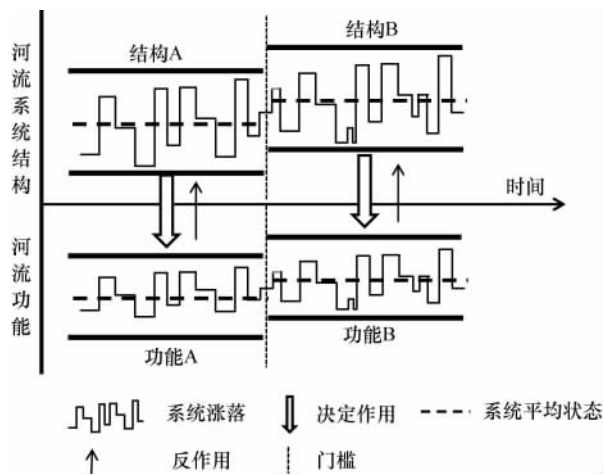
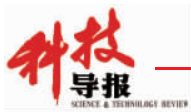


图2 河流系统结构、功能和涨落之间的关系
Fig. 2 Relationship between structure, function and fluctuation of river system

2.3 通过“流”实现河流功能

世界由物质、能量和信息3大要素构成。河流系统是陆海域泥沙和元素循环的载体,是地球物质循环流动的重要链条,是地球表面物质能量和信息传输、转化的重要环节。从系



统论观点看,河流功能主要通过河流系统中不断流动的能量流、物质流和信息流实现(图3)。

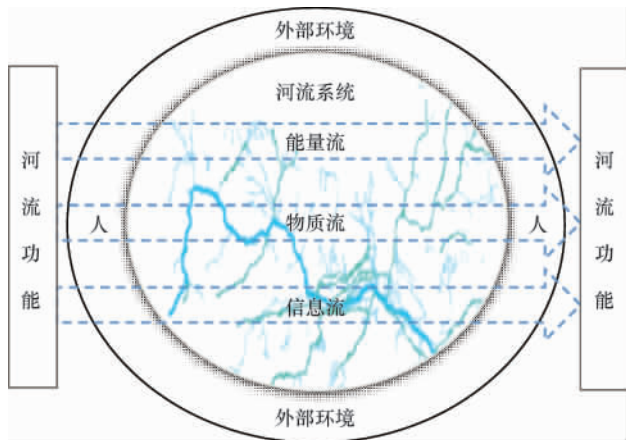


图3 河流系统功能流示意

Fig. 3 Schematic diagram of River system function flow

河流系统的运动过程伴随着大量的物质、能量和信息的输入与输出,三者密切相关。没有物质流动,河流系统就不复存在。没有能量,物质处于静止状态。没有信息流,能量和物质就无从认知。在河流系统中,物质流是能量流和信息流的载体,物质的流动伴随着能量的消耗、转换与回收。随着时间推移,物质流和能量流沿河流在各个环节积存和消耗,伴随信息不断产生、传递与处理成信息流,起着重要的标示、导向和调控作用^[8]。信息交换离不开物质的交换和能量的耗散。

(1) 物质流。河流系统为维持系统结构和活力,必须源源不断地从外部环境吸收物质,并不断向外部环境输出物质,且量一般较大。据 Garris 和 Machenzie 1971 年估算,河流输送了 85% 的陆域进入海洋的物质,而全球每年有 160 亿 t 泥沙入海。中国年入海径流量、悬移质和溶解质分别约为 18152.4 亿 m³、20.4 亿 t、3.11 亿 t^[9]。通过大量的物质流,河流滋养沿河两岸生物、输送物质、雕刻河床、造陆填海等,不断满足自身和外部环境的需要。

系统物质流遵循质量守恒定律,可以应用物质流分析法分析物质流动的源、汇和路径。物质流分析方法源于经济学领域,主要研究系统物质资源新陈代谢,包括特定物质流和经济系统的物质流。现在逐渐扩展到自然科学领域,用于流域氮磷元素流、资源环境承载力等研究。由图4可知,河流系统物质流包括本地直接输入及其产生的隐藏物质输入,进口及其产生的隐藏性物质输入。物质输入以水流和泥沙为主。部分泥沙、有机质、污染物等在河流系统沉积、降解、新陈代谢,固定在河流系统中,剩余部分排泄出河流系统(入海)。输出物质以水沙、污染物、生物物质等直接输出为主,还包括隐藏的物质输出以及物质出口及其产生的隐藏物质输出。

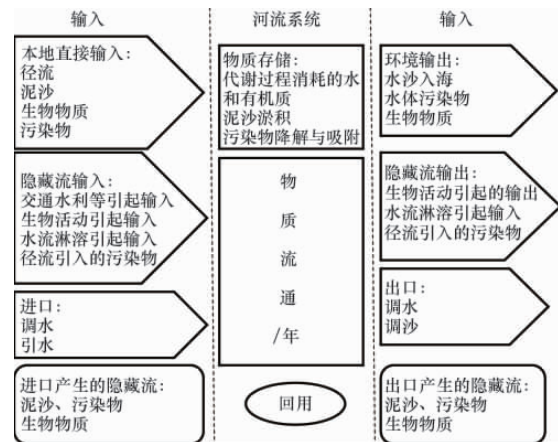


图4 河流系统物质流分析

Fig. 4 Substance flow analysis of river system

(2) 能量流。能量流是系统演化和发展的动力,驱动着系统自组织平衡倾向性。系统具有平衡态和非平衡态两种宏观状态。而稳定态(定态)是指系统的状态参量不随时间改变的状态。定态既可以是平衡态也可以是非平衡态。在非平衡态,虽然系统状态参量已不随时间变化,但系统内部仍可发生各种物理量的宏观流动过程,只是这些内部过程和外界的交换过程的平均效果使系统的状态参量保持不变^[10]。根据最小熵产生原理或最小能耗原理,河流系统在其演变过程中总是朝着熵产生或能耗率减小的方向发展(即 $\gamma QJ \rightarrow \min$, γ 为水容重, Q 为流量, J 为水力坡降),直到河流系统达到与外部环境相适应的某个非平衡定态为止^[9]。在具体河流演化调整过程中不仅趋向动力平衡,能量也趋向沿河呈现均匀分配并保持最小能量耗散。为此,需把调整分散在与水流能耗相关的因素上,表现为流速、坡降、宽深比、河道蜿蜒度、水深、河宽等相关因子以尽可能小的变化来自我组织和协同调整。

河流的能量流主要来源于水流的势能,用于搬运水沙等物质、侵蚀河床,最后耗散于热能。通过熵理论,可以定量描述河流系统能量分配。熵 Φ 是河流系统状态函数,可表示为

$$\Phi = k \ln p + c \quad (1)$$

式中, k, c 为系数, p 为状况概率。则整条河流的熵为

$$\Phi \sim \sum \ln p_i \quad (2)$$

式中 p_i 为河段 i 的状况概率。为了使 Φ 最大,河流系统在能量分布调整时,总要使系统内能量分配具有最大可能,即沿程平均分布^[21]。河流某一段,相对于下游段单位体积水体长时间平均能量 E_i 由势能和动能构成,可表示为^[21]

$$E_i = \frac{1}{t} \int_0^t \gamma \Delta z_i dt + \frac{1}{t} \int_0^t \gamma \frac{v_i^2}{2g} dt \quad (3)$$

式中, t 为时间, γ 为水的密度, Δz_i 为河段的落差, v_i 为河段的平均流速, g 为重力加速度。 $\frac{1}{t} \int_0^t \gamma \Delta z_i dt$ 项是河流沿河的能量耗散,用于克服河道摩擦阻力做功。

(3) 信息流。信息流依赖于物质和能量而产生、存在和

传播,具有普遍性、扩散性、时效性、资源性、转化性。在河流物质和能量系统中,信息表现为径流、泥沙、河床等物质的状态与变化,流速、流量、坡降、能量等参数的变化。在河流系统中,各要素通过信息反馈作用,及时进行调整。例如,汛期流域泥沙被大量冲入河道,河道系统平衡被打破,很快通过淤积河床、增加流速反馈条件的改变进行有目的的行动^[23]。河流系统的洪水往往为很多水生生物产卵提供生物节律信号。

依据美国生态学家 Odum 在 20 世纪 80 年代提出的能值分析理论,可将河流系统中流动的物质、能量和信息统一转换为同一标准的能值,定量分析系统的结构和功能。能值被定义为产品形成所需直接或间接投入应用的一种有效能总量^[23]。任何能量均始于太阳能(单位:太阳能焦耳,缩写为 sej),所以可把其他类别的能量都转换成太阳能来衡量,由能值转化率表示。大量能值研究者给出了各种物质和能量的能值转化率,比如河流势能能值转化率为 $2.78 \times 10^4 \text{ sej/J}$;河水化学能能值转换率为 $4.10 \times 10^4 \text{ sej/J}$;水电能值转换率为 $8.00 \times 10^4 \text{ sej/J}$ 。最终能值由能值转化率和能量乘积求得。

2.4 通过对需求的满足表现河流功能

在河流系统外部,需求表现为交换的需要,由河流系统的本性决定;在内部,需求表现为官能性的需要。需求满足的过程就是功能实现的过程,而功能的发挥外在的表现就是需求的满足。河流的需求是河流自然生存的需要,对外表现为对流域来水来沙的需要,对内表现为健康流动的需要。需求存在层次性,按照需求满足对生命的重要程度依次可分为生存需求、基本需求和非基本需求。而河流的生存需求是指河流为维护生存和水生态环境而提出的需要,主要包括生态用水和水质清洁需求,这是河流生命的最低保障。河流作为全球物质循环的链条具有保持通道完整性、连通性以及物质运动性和造物的基本需求。通过水沙等物质运动,冲刷河床,维持和发展河流躯干。河流发展的过程是一个不断冲刷造陆填海的过程,其实也是生态造物的过程^[13]。只有满足了河流与地下水、水域与陆域的连通性,河源到河口的完整性,以及物质能量流的流动性需求,河流系统才能保持活力,健康演化发展,才能成为流域生命的共同保障,创造并哺育流域内的物种^[13]。河流系统通过与内环境间相互作用,满足了河流自身发展的需要,是河流自然生态功能发挥的效用。

河流系统与人在自然界中共生共存,人类对河流系统提出了众多需求,例如供水需求、排污需求、运输需求、文化娱乐需求等。其中生活用水和防洪需求属于人类的生存需求,灌溉和工业用水、排污、航运、发电等需求属于人类基本需求,文化娱乐等则属于人类非基本需求。从河流系统的外部来看,河流系统通过河流功能服务于人类,满足人类的多种需求,维持了人类生命的发展。

3 河流功能和谐

河流有其自身需求和发展规律,与人类活动相互作用,产生了人水和谐命题。对人水和谐的关注,其根本目的是为

了实现河流功能的持续供给。因此不仅要注意人类的需求,也要认识河流自身,包括需水、冲刷河道、发展河床、参加水文循环等需求。一般来说,河流通过河流内功能满足自身需求,通过社会功能提供服务满足人类需求。二者需求的满足是一个不断博弈的过程,也是实现河流功能和谐的过程。博弈理论已被应用于人水和谐关系^[24]、水资源配置^[25]、水权市场等方面的研究^[26]。如果将河流系统看作理性的决策主体参与博弈,则表现为河流系统和人文系统两大决策主体之间的博弈。博弈过程中,要充分尊重河流主体地位,平等对待人与河流的需求。

当人与河流的需求发生冲突时,首先考虑系统整体利益,其次考虑低层次需求。即以河流系统健康和人类整体利益为重、以生存需求为重。当人类整体利益与一条河流的局部利益,或一条河流系统局部利益与河流整体利益冲突时,整体利益优先;当人类局部利益与一条河流系统局部利益,或人类整体利益与一条河流系统整体利益冲突时,首先满足生存需求,其次是基本需求、非基本需求^[14]。当同时存在生存需求时,则优先保障人类需求。基于以上准则,构建人与河流需求判优流程图解决人与河流需求之间的矛盾(图 5)。

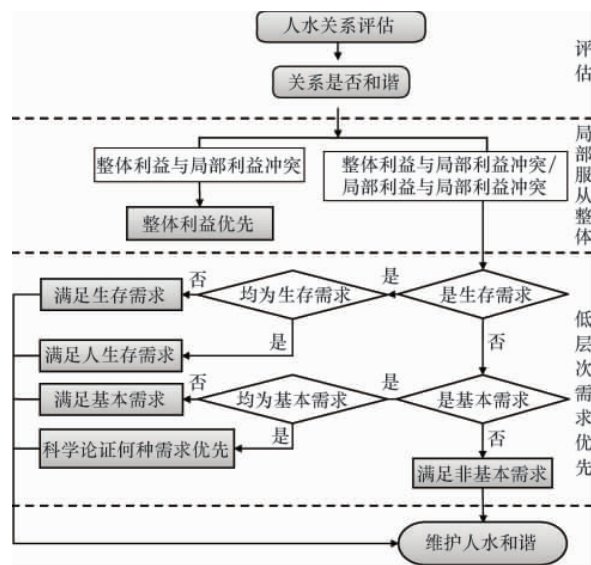


图 5 人与河流需求判优流程

Fig. 5 Flow chart for prioritizing requirements of people and rivers

同人类持续增长的需求相比,水资源相对有限,因此更加关注人与人的竞争与合作关系。每个人都追求自身利益最大化,最终必然导致“公共地悲剧”,黄河、永定河断流就是很好的实例。从社会学角度看,人水和谐就是人与人和谐^[27]。此时,河流只作为表演的舞台,真正起作用的是人。由此可见,要实现河流功能和谐关键是协调好人与人之间的关系,规范人类行为。可采取的措施有适当调整社会关系,合理分配不同地区、不同部门、不同用水户间的用水量、排污量和应承担的责任,规范人类的取用排水行为等,既要共享水资源又要共同承担保护水资源的责任^[28]。

4 结论

(1) 河流系统是一个开放的系统,边界相对清晰,具有自组织性,结构和功能具有突变性,可在远离平衡态形成稳定有序的耗散结构。

(2) 河流系统是一个生命体,拥有完整的水系通道,以流动为运动特征,与生物共存共生。河流繁衍、滋养和推动了众多生命体的存在,是生物圈层面上的生命概念。

(3) 河流功能是河流系统与其环境相互作用过程中表现出的能力和效用,是河流系统发挥的有利作用。河流功能有内外功能之分,由河流系统结构决定,由系统的物质流、能量流和信息流实现,通过满足人与河流的需求表现,可反作用于河流系统结构。

(4) 河流功能和谐问题其实就是人与河流需求判优以及人与人和谐问题。人与河流需求可按局部利益服从整体利益和低层次需求优先原则判定。人与人和谐主要依靠协调人与人之间关系、规范人类活动解决。

参考文献 (References)

- [1] 李国英. 河流伦理[J]. 人民黄河, 2009, 31(11): 3-5.
Li Guoying. Yellow River, 2009, 31(11): 3-5.
- [2] 许士国, 石瑞花, 赵倩. 河流功能区划研究[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(9): 1521-1528.
Xu Shiguo, Shi Ruihua, Zhao Qian. Science in China, Series E: Technology Science, 2009, 39(9): 1521-1528.
- [3] 吴永祥, 王高旭, 伍永年, 等. 河流功能区划方法及实例研究[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 741-749.
Wu Yongxiang, Wang Gaoxu, Wu Yongnian, et al. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 741-749.
- [4] 赵银军, 丁爱中, 潘成忠, 等. 河流功能区划理论与实例[J]. 科技导报, 2013, 31(16): 60-64.
Zhao Yinjun, Ding Aizhong, Pan Chengzhong, et al. Science & Technology Review, 2013, 31(16): 60-64.
- [5] 石瑞花, 许士国. 河流功能综合评价方法及其应用[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(1): 131-136.
Shi Ruihua, Xu Shiguo. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(1): 131-136.
- [6] 盖永伟, 黄昌硕. 河流功能评价指标体系及应用[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(3): 42-46.
Gai Yongwei, Huang Changshuo. South-to-North Water Science & Technology, 2013, 11(3): 42-46.
- [7] 赵银军, 丁爱中, 沈福新, 等. 河流功能理论初探[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2013, 49(1): 68-74.
Zhao Yinjun, Ding Aizhong, Shen Fuxin, et al. Journal of Beijing Normal University: Natural Science Edition, 2013, 49(1): 68-74.
- [8] 赵银军, 魏开涓, 丁爱中. 河流功能及其河流生态服务系统功能对比研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(1): 72-75.
Zhao Yinjun, Wei Kaimei, Ding Aizhong. Water Resources and Power, 2013, 31(1): 72-75.
- [9] 文伏波, 韩其为, 许炯心, 等. 河流健康的定义与内涵[J]. 水科学进展, 2007, 18(1): 140-150.
Wen Fubo, Han Qiwei, Xu Jiongxin, et al. Advances in Water Science, 2007, 18(1): 140-150.
- [10] 高志强, 周清明. 农业生态系统的耗散结构特征探析[J]. 农业现代化研究, 2009, 30(4): 471-474.
Gao Zhiqiang, Zhou Qingming. Research of Agriculture Modernization, 2009, 30(4): 471-474.
- [11] 徐国宾, 杨志达. 基于最小熵产生与耗散结构和混沌理论的河床演变分析[J]. 水利学报, 2012, 43(8): 948-956.
Xu Guobin, Yang Zhida. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(8): 948-956.
- [12] 徐国宾, 练继建. 流体最小熵产生原理与最小能耗率原理 (I)[J]. 水利学报, 2003(5): 35-40.
Xu Guobin, Lian Jijian. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(5): 35-40.
- [13] 侯全亮. 河流伦理—维持黄河健康生命的人文基础[J]. 中国水利, 2005(1): 60-62.
Hou Quanliang. China Water Resources, 2005(1): 60-62.
- [14] 李肖强. 河流管理的伦理维度研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(3): 1-3.
Li Xiaoliang. Yellow River, 2010, 32(3): 1-3.
- [15] 李映红, 黄明理. 论河流的主体性及其内在价值—兼论互主体性的河流伦理理念[J]. 道德与文明, 2012(1): 116-119.
Li Yinghong, Huang Mingli. Morality and Civilization, 2012(1): 116-119.
- [16] 侯起秀, 程迎春. 对河流生命及其特征的初步认识[J]. 水利发展研究, 2005(3): 60-62.
Hou Qixiu, Cheng Yingchun. Water Resources Development Research, 2005(3): 60-62.
- [17] 徐琳瑜. 城市生态系统复合承载力研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2003.
Xu Linyu. Research on complex carrying capacity of urban ecosystem [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2003.
- [18] 龙妍, 黄素逸, 张洪伟. 物质流、能量流与信息流协同的初探[J]. 化工学报, 2006, 57(9): 2135-2139.
Long Yan, Huang Suyi, Zhang Hongwei. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(9): 2135-2139.
- [19] 程天文, 赵楚年. 我国沿岸入海河川径流量与输沙量的估算[J]. 地理学报, 1984, 39(4): 418-427.
Cheng Tianwen, Zhao Chunian. Acta Geographica Sinica, 1984, 39(4): 418-427.
- [20] 徐国宾, 练继建. 流体最小熵产生原理与最小能耗率原理 (II)[J]. 水利学报, 2003(6): 43-47.
Xu Guobin, Lian Jijian. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(6): 43-47.
- [21] 孙东坡. 河流系统能量分配耗散关系的分析[J]. 水利学报, 1999(3): 49-53.
Sun Dongpo. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(3): 49-53.
- [22] 尹国康. 河流地貌系统的信息反馈[J]. 南京大学学报, 1994, 30(2): 344-352.
Yin Guokang. Journal of Nanjing University, 1994, 30(2): 344-352.
- [23] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳, 等. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
Lan Shengfang, Qin Pei, Lu Hongfang, et al. The theory of emergy analysis of ecological-economic system [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [24] 赵春霞, 左其亭, 于洪涛. 人水和谐的博弈内涵及认识新途径[J]. 人民黄河, 2009, 31(8): 8-9, 12.
Zhao Chunxia, Zuo Qiting, Yu Hongtao. Yellow River, 2009, 31(8): 8-9, 12.
- [25] 彭祥, 胡和平. 水资源配置博弈论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
Peng Xiang, Hu Heping. Study on water resources allocation with game theory [M]. Beijing: China Water Power Press, 2007.
- [26] 孔珂, 解建仓, 岳新利, 等. 水市场的博弈分析[J]. 水利学报, 2005(4): 491-495.
Kong Ke, Xie Jiancang, Yue Xinli, et al. Journal of Hydraulic Engineering, 2005(4): 491-495.
- [27] 陈阿江. 论人水和谐[J]. 河海大学学报: 哲学社会科学版, 2008, 10(4): 19-24.
Chen Ajiang. Journal of Hohai University, 2008, 10(4): 19-24.
- [28] 左其亭. 人水和谐论—从理念到理论体系 [J]. 水利水电技术, 2009, 40(8): 25-30.
Zuo Qiting. Water Resources and Hydropower Engineering, 2009, 40(8): 25-30.

(责任编辑 王媛媛)