

河流动力系统的自组织原理及机制探讨

汪富泉

(广东石油化工学院继续教育学院,广东 茂名 525000)

摘要:为探讨河流系统发展演变的规律,应用耗散结构、协同学、分形、混沌等自组织理论及河流动力学的思想,通过类比、归纳、演绎等方法,总结了河流动力系统的关联原理、协同原理、反馈原理、细致平衡原理、突变原理、自适应原理等 6 个自组织原理和开放性、随机性、非线性和耗散性等 4 个物理机制。

关键词:河流动力系统;热力学;自组织原理;自组织机制

中图分类号:P341 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)04-0001-04

Self-organized principles and mechanisms of river dynamic system//WANG Fuquan(*School of Continuing Education, Guangdong University of Petrochemical Engineering, Maoming 525000, China*)

Abstract: In order to study the development and evolution rules of river system, the self-organized theory such as dissipative structure, synergetics, fractal, chaos and so on as well as the river dynamics are applied to the system through conclude, analogy and deduce. The 6 self-organized principles, such as relevance principle, coordination principle, feedback principle, detailed balance principle, mutation principle, and adaptive principle and etc. and 4 basic physical mechanisms such as openness, randomness, nonlinear and dissipative etc are revealed for the river system.

Key words: the river dynamic system;thermodynamics;the self-organized principle;the self-organized mechanism

近年来一些学者应用自组织原理探讨河流、流域、水系的特征与规律,通过对流域侵蚀、水系、地貌等的探讨,发现了类似于自组织临界性 (self-organized criticality, SOC) 的现象^[1-3]。Sapozhnikov 等^[4]曾对这些研究提出质疑,同时他们研究了实验室内的一条辫状河流,并把动态标度指数的出现解释为辫状河流可能处于临界态且具有 SOC 系统的行为^[5]。汪富泉等^[6-7]建立演化方程研究了河湾形态演变的自组织及其稳定性,对 SOC 的有关理论和机制进行了分析并对 Sapozhnikov 的结果提出过质疑。Mark 等^[8]研究了河岸系统的自组织临界性。最近,Wang 等^[9]研究了我国中部地区降雨的自组织临界性。把河流作为一个动力系统来研究其自组织规律和机制,迄今未见报道,本文把河流作为一个开放的动力系统来探讨其自组织原理和机制。

1 河流动力系统与热力学方法

河流是一个复杂的动力大系统,由水体和容纳水体的河床组成,泥沙是连接这两个子系统的纽带,笔者称其为连接子系统。水流塑造河床形态并使之

变化;反过来,河床又影响水流结构。两者通过泥沙运动相互作用,相互依存,相互制约,使河流处于永恒的发展变化之中。河流动力学从水动力作用出发研究水流、泥沙运动及相对平衡的规律,主要内容包河道水流结构、泥沙运动规律和河床演变规律,也可划分为河流过程与河床过程两个方面^[10]。河流过程是一个十分复杂的过程,既有确定性作用,又蕴含着随机因素。河床过程是泥沙运动的表现和结果,与泥沙群体运动密切相关。不研究群体泥沙的宏观运动,就不可能深刻理解河床过程,流体力学是研究这两种过程的传统方法。

力学是描述少量粒子的运动规律和相互作用的科学^[11]。然而,浑水水流和河床是由大量客体组成的宏观系统,其运动变化和各部分的相互作用具有高度的非线性特性和不确定性,即使知道了含沙水流和河床的精确组成及全部微观相互作用,也无法得到全部力学方程。另外,自然界的河流已经过长时间演化,即使是很年轻的河流也有数千年历史,其形成的初始条件很难追溯,更谈不上求解这些方程和由此计算系统的物理性质。因此,仅依赖现在

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB036401);国家自然科学基金(51179110)

作者简介:汪富泉(1955—),男,四川南充人,教授,博士,主要从事水文学及河流动力学研究。E-mail: wm2981138@163.com

流体力学的成果不可能完全回答和解决有关河流的问题。于泳等^[11]指出对于宏观系统,力学是无能为力的,行之有效的是热力学方法。力学和热力学是针对微观和宏观这两个极端情形发展起来的,使这两个学科达到相辅相成的基本事实是宏观系统由大量微观粒子组成。若以热力学观点来处理泥沙问题,那么我们对某一时刻一颗泥沙具有什么速度和处于什么位置兴趣不大,经常关心的是系统的宏观参量,即大量泥沙颗粒的集体作用所产生的平均效应。这样,在描述泥沙系统时只要少数几个宏观参量就够了,这是在处理复杂系统时热力学比河流动力学的优越之处。

河流动力学的基本概念是能量,热力学除能量以外,还需要用到“熵”这样一个特有的概念。熵是系统不确定性或不可用来做功的能量的一种量度,是描述开放系统的一个重要参数。河流是开放系统,在水文循环和水沙输移过程中与环境交换物质和能量。由于存在诸如水流不能自动从低处流向高处这类不可逆的过程,系统和环境也交换熵。Leopold 等^[12]曾利用有关熵的规律来研究河流的能量分配,结果表明冲积河流的调整将使能量的沿程分配保持均匀一致。Langbein 等^[13]利用 Leopold 等^[12]的结果研究了河床纵剖面。Yang 等^[14-15]把最小功原理移植到河流中提出了著名的河流最小能耗理论,其有关结果也可从熵的概念推出。Chang^[16-17]也根据最小功原理得到相应的结果。White 等^[18]证明 Yang 等^[14]和 Chang^[16-17]所依据的最小功原理与最大输沙设想可互相置换。熵概念的移植曾引起一些争论。Davy 等^[19]曾对把熵概念移植到河流系统中来的合理性提出疑问。韦直林^[20]认为 Yang 等^[14]未能证明河流的最小能耗理论。张书农等^[21]则认为河流最小能耗理论可能是解释河型成因的最有希望的理论之一。钱宁等^[15]指出,把其他领域的一些概念和设想移植到河床演变中来是一种很有益的尝试,把河床演变和体系内部的能量分配联系起来的大方向是正确的,但是现有的理论都还不能完美地阐明问题的物理本质。笔者认为,把熵概念移植到河流动力学中具有积极意义,但是 Leopold 等^[12]和 Yang 等^[14]的熵类比是应用孤立系统的热力学第二定律 $ds \geq 0$ 导出的,当系统达到平衡时,熵达到最大($ds=0$)。河流是开放系统,其熵变应分成两部分: $ds=ds_e+ds_i$,其中 ds_e 叫熵流,反应系统与外界的熵交换,它可取正、负或零; ds_i 表示系统内部的熵产生,是非负的。开放系统热力学第二定律应表述为 $ds_i \geq 0$,或者 $ds \geq ds_e$ 。这说明,如果外界不断地从系统中提取熵(或输入负熵), $ds \geq 0$ 就可能不成

立。在开放系统的非平衡线性区,普里戈金^[22]提出了最小熵产生原理。Yang 等^[14]在论证最小能耗理论时采用熵类比并应用了熵产生率最小的思想,但仍是按孤立系统讨论的。在下面的分析中,本文将针对开放系统的特点来运用熵概念。

2 河流动力系统的自组织原理

河流是流域的有机组成部分,它本身又是一个大的动力系统,由水流、泥沙与河床等要素组成。系统与要素是相对的,研究河流时,流域因素如气候、地质、地貌、植被、土壤等可视为环境要素;研究河床或悬移质、推移质体系时,除流域因素外,水流也可视为环境要素。归纳河流动力学和流水地貌的研究成果,把它们与自组织原理进行类比和演绎,本文从自组织原理的角度概括出以下几个基本原理:

a. 关联原理。水流、泥沙与河床之间存在非线性的相互关联和相互作用。水流挟带和输运泥沙,因明渠水流一般是湍流,使泥沙运动及特征值分布呈强非线性特征。反之,泥沙的存在又影响水流结构,使它比清水运动更为复杂。在一定的地质、地貌和气候条件下,水流与泥沙共同塑造河床形态。反过来,河床形态又强烈地反作用于水流和泥沙,加上流域因素对河流结构与河流过程的影响,河流问题是一个复杂的多体问题,这是河流研究困难的根源。

b. 协同原理。河流系统内部各子系统之间、河流与环境之间存在着竞争与合作关系。湍流与环流运动中的组织与结构是水分子、水团协同的产物;泥沙颗粒之间通过合作形成集体运动——沙波,颗粒起动时的协作效应导致床面泥沙成片运动;水流剪切力与周界阻力的竞争和合作,使河槽形成具有一定宽深比的断面形态;河床各部分的协同作用产生千姿百态而又高度有序的空间结构;水流、泥沙、河床之间通过竞争与协作而获得动态平衡;河流自动调整是多因素协同的产物。

c. 反馈原理。河流内部进行物质和能量交换的同时也进行着信息的交换。水流与河床之间以泥沙为纽带构成一个反馈回路。水流与河床在交换物质与能量时,通过泥沙含量和水流挟沙力的信息反馈,河段对冲淤变化做出调整,获得河段的动态平衡。河流与流域之间也构成一个反馈回路。当环境引起河流大幅度、大范围变化时,河流通过流域特征的改变减缓自身的调整强度。

d. 细致平衡原理。河流系统中大量微观的运动过程(元过程),如泥沙的悬浮与沉降、河床的冲刷与淤积、弯道的发展与裁直、流量过程的丰水与枯水等在长时间、大范围内可以相互抵消,使总的宏观

状态维持平衡。即每个正的元过程有相应的反过程,河流系统在大量正、反过程的补偿中实现总的动态平衡。

e. 突变原理。河流系统的某些状态可在内外部因素的触发下突变。突变形式分为两类:①物理参数的不连续变化引起的突变。例如一场特大洪水可使河流面目全非,气候的变迁可使河流急剧展宽。②物理参数连续改变引起的形态突变。这是一种临界现象,又称为非平衡相变,即当控制参数达到某个临界值时就会引起系统的急剧改变。例如河湾蠕动中曲率半径达到某个临界范围引起蠕动速度的较大变化;河谷平均方向与河流轴线的夹角达到某个临界值时河湾的自然裁直等。下荆江尺八口和碾子湾的蠕动与自然裁弯、上车湾的撇弯切滩就是这类突变^[6]。地貌临界条件也是非平衡相变的例子,这类突变的物理本质是对称性破缺。

f. 自适应原理。从河床反应的角度看,河流系统具有一定的自适应性。当环境条件改变使河流失去平衡时,河流将自动地调整自身的形态和结构以适应环境的变化和恢复平衡,不适应水沙输移的形态结构被淘汰,适应水沙输移的形态结构得以维持,力求达到水沙输移平衡。河流在调整方向上所作出的选择,体现了调整的目的性。河流自身的调整有一定的限度,界定了人类活动的强度。河流恢复平衡有一个弛豫时间(即滞后性)。

3 河流动力系统的自组织机制

上述原理说明河流结构是一种有序的动态结构,河流的发展和演变过程遵循一定的秩序性和组织性。这样的规律是在没有人类力量强行干扰的情况下自发地产生的,因此是自然规律或自组织规律。这种自组织结构与过程的形成和发展具有若干物理机制,这些机制是河流系统形成自组织结构和规律的必要条件。

a. 开放性。河流是开放系统,与环境之间有物质、能量和熵的交换。河流沿程接受流域面上的水流和泥沙,又源源不断地把它们送向大海。水循环也是河流与环境之间进行物质、能量和熵交换的重要途径。

b. 随机性。随机性作用也称为涨落,是系统自组织的动力。流域气候、水文、地质和地貌等因素的涨落无时无处不在。大气环流运动与降水、洪水起涨及持续时间等都带有很大的随机性并较强烈地影响浅滩的发展。泥沙运动及冲积河流的调整水平也有较大的随机性,例如拾兵等^[23]用仙农熵来表示河相关系数的概率密度及其随时间变化的随机微分方

程。汪富泉等^[6]得到的河湾演化方程也是一个非线性随机微分方程。在诸多随机因素的影响下,河流形态及其演变既有确定性周期振荡的一面,又有随机性波动的一面,这是河流形态各异的根本原因。

c. 非线性。河流系统各要素之间的定量关系可表示为线性方程的极少,一般为非线性方程,如输沙量与流量、河相关系等都是幂函数。黄才安等^[24]得到的河相关系即为幂函数:

$$\zeta = \frac{b^j}{h} \tag{1}$$

其中
$$j = 1 - \frac{1}{2m} \frac{\tau - \tau_c}{\tau} \tag{2}$$

$$\tau = \rho g R J \tag{3}$$

式中: ζ 为断面河相系数; b 、 h 分别为相应于平滩流量的河宽和平均水深; τ 为床面水流切应力; τ_c 为泥沙起动切应力; m 为一常数,一般取 1~2; ρ 为水的密度; R 为水力半径; J 为水力坡度; g 为重力加速度。陈绪坚等^[25]在研究河型弯曲机理时得到水流平均含沙量 S 和平均弯曲系数 η 的关系为非线性幂函数 $S = k\eta^{-3/2}$ 。拾兵等^[23]得到的河相系数与流速、河床坡度之间的关系也是非线性的。这说明,非线性相互作用是河流系统各要素相互关联的纽带,是系统内外协同,产生宏观的自组织结构和自组织过程的内部根源。由此,河流的演化方程必为非线性方程,这可作为河流模拟的一个原则。

d. 耗散性。水流中的泥沙系统与河床系统具有耗散结构的特征:他们具有时空结构,其形成和维持要靠水流或流域提供物质和能量;某些新结构在控制参数达到阈值时才突然出现;新结构的对称性比阈值前的低;新结构具有一定的稳定性,不被小扰动所破坏。能量耗散是在远离平衡以及作用力与物质流、能量流非线性相关的条件下系统演化的结果,河床要形成和维持自己的有序结构,必须通过耗散水流能量(引入负熵)来实现,系统能量耗散时熵变与河床反应情况如表 1 所示。

表 1 系统能量耗散时熵变与河床反应情况

熵项	能量转换与耗散	熵变	河床反应
热交换效应	吸收太阳能、地热能等	熵产生	导致沙纹、沙波、沙垄的形成或改变,影响河床表面平整
	通过蒸发释放热量	引入负熵	
质量交换效应	冲刷河床,耗散能量	熵产生	河床变粗糙,引入负熵河床变平整,熵产生
	泥沙淤积,减少能量消耗	熵减少	
不可逆效应	螺旋流耗散能量	熵产生	凹岸冲刷,凸岸淤积,河床形态变歪曲,引入负熵
	湍流运动(势能转换为热能)	熵产生	

4 结 语

探讨了河流动力学和热力学的相关性,应用耗

散结构、协同学、分形、混沌等自组织原理和河流动力学的思想,通过归纳、类比、演绎等方法,经过初步论证,得到了河流动力系统的关联原理、协同原理、反馈原理、细致平衡原理、突变原理和自适应原理等6个自组织原理以及开放性、随机性、非线性和耗散性等4个物理机制。

参考文献:

- [1] TAKAYASU H, INAOKA H. New type of self-organized criticality in a model of erosion [J]. *Physical Review Letters*, 1992, 68(7): 966-969.
- [2] RINALDO A, RODRIGUEZ-ITURBE I, RIGON R, et al. Self-organized fractal river basin geometry [J]. *Physical Review Letters*, 1993, 70(6): 882-825.
- [3] RIGON R, RINALDO A, RODRIGUEZ-ITURBE I. On landscape self-organization [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(11): 971-993.
- [4] SAPOZHNIKOV V B, FOUFOULA-GEORGIOU E. Do the current landscape evolution models show self-organized criticality [J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(4): 1109-1112.
- [5] SAPOZHNIKOV V B, FOUFOULA-GEORGIOU E. Experimental evidence of dynamic scaling and indications of self-organized criticality in braided river [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(8): 1983-1991.
- [6] 汪富泉, 曹叔尤, 丁晶. 河湾形态演变的自组织及其稳定性 [J]. *水科学进展*, 2001, 12(1): 7-16. (WANG Fuquan, CAO Shuyou, DING Jing. Self-organization and stability of form evolution of river bends [J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(1): 7-16. (in Chinese))
- [7] 汪富泉, 曹叔尤, 丁晶. 河流网络的分形与自组织及其物理机制 [J]. *水科学进展*, 2002, 13(3): 368-376. (WANG Fuquan, CAO Shuyou, DING Jing. Fractal, self-organization and its physical mechanism of river networks [J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(3): 368-376. (in Chinese))
- [8] MARK F, ANDREW W M. Self-organized criticality in riverbank systems [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2003, 93(2): 281-296.
- [9] WANG Z L, HUANG C Y, HARRY D K. Self-organized criticality of rainfall in central China [J]. *Advances in Meteorology*, 2012, 2012(1): 46-53.
- [10] 侯晖昌. 河流动力学基本问题 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1982: 8-95.
- [11] 于渌, 郝柏林. 相变与临界现象 [M]. 北京: 科学出版社, 1984: 5-82.
- [12] LEOPOLD L B, LANGBEIN W B. The concept of energy in landscape evolution [M]. *Wasinton: Government Pritting Office*, 1962: 1-20.
- [13] LANGBEIN W B, LEOPOLD L B. Quasi-equilibrium state in channel morphology [J]. *America Journal of Science*, 1964, 262(3): 782-794.
- [14] YANG C T, SONG C S. Theory of minimum rate of energy dissipation [J]. *Journal of Hydraulic Proceedings: America Society of Civil*, 1979, 105(HY7): 769-784.
- [15] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 10-121.
- [16] CHANG H H. Geometry of rivers in regime [J]. *Journal of Hydraulic Division Proceedings: America Society of Civil*, 1979, 105(HY6): 691-706.
- [17] CHANG H H. Minimum stream power and river channel patterns [J]. *Journal of Hydrology*, 1979, 41(2): 303-327.
- [18] WHITE W K, BETTESS R, PARIS E. Analytical approach to river regime [J]. *Journal of Hydraulic Division Proceedings: America Society of Civil*, 1982, 108(HY10): 1179-1193.
- [19] DAVY B W, DAVIES T R H. Entropy concepts in fluvial geomorphology-a re-evaluation [J]. *Water Resources Research*, 1979, 15(1): 103-106.
- [20] 韦直林. 评河流最小能耗理论 [J]. *泥沙研究*, 1991(2): 39-45. (WEI Zhilin. On the theory of minimum energy dissipation rate of river [J]. *Journal of Sediment Research*, 1991(2): 39-45. (in Chinese))
- [21] 张书农, 华国祥. 河流动力学 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1988: 8-103.
- [22] 普里戈金. 确定性的终结: 时间、混沌与新自然法则 [M]. 湛敏, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2009: 2-90.
- [23] 拾兵, 王燕, 杨立鹏, 等. 基于仙农熵理论的河相关系 [J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(1): 95-98. (SHI Bing, WANG Yan, YANG Lipeng, et al. Hydraulic geometry based on shannons entropy principle [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(1): 95-98. (in Chinese))
- [24] 黄才安, 周济人, 赵晓冬. 基本河相关系指数的理论研究 [J]. *泥沙研究*, 2011(6): 55-58. (HUANG Caian, ZHOU Jiren, ZHAO Xiaodong. Theoretical study of exponent in basic hydraulic geometry relation [J]. *Journal of Sediment Research*, 2011(6): 55-58. (in Chinese))
- [25] 陈绪坚, 陈清扬. 黄河下游河型转换及弯曲变化机理 [J]. *泥沙研究*, 2013(1): 1-16. (CHEN Xujian, CHEN Qingyang. Theory of river pattern transformation and change of channel sinuosity ratio in Lower Yellow River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2013(1): 1-16. (in Chinese))

(收稿日期: 2013-06-04 编辑: 周红梅)