

冲积河流能量耗散理论的研究^{*}

孙东坡

(华北水利水电学院水利系 郑州 450045)

摘 要 引入河流熵概念,根据冲积河流发展趋向性法则,从系统角度探讨了冲积河流系统自我调节机制及河流能量分配耗散特点,以变分原理为基础,推求了河流系统能量耗散规律,结合人类活动对河流的干扰,研究分析了河床调整自由度与河流能量分配、耗散间的制约关系.文中还指出了近年来黄河内蒙河段河床活动性增强的原因,并给出了该河段曲折率的变化规律.

关键词 河流熵;变分法;河流系统;能量耗散;反馈调整

中图号 TV143

冲积河流是自然环境中一个永不停息的动态反馈系统.河相关系的特点、演进变化的规律、外界干扰的调整等问题,一直是河流动力学界关注的焦点问题.从理论角度看,研究的方法可分为两大类:一类是以向量法为基础依据动力学原理的研究方法;一类是以变分法为基础依据能量耗散理论的研究方法.前者在描述局部微观现象时比较可靠、得力,后者在探求复杂巨系统时具有更强的宏观把握能力.杨志达^[1]、张海燕^[2]、邓志强^[3]等人都是从不同方面进行了研究.本文拟从系统角度出发,依据能量耗散理论探讨冲积河流所遵循的基本原理以及河流反应(造床作用)的制约准则.

1 冲积河流演变原理的探讨

冲积河流的演进变化历程反映了河流系统中存在着一定的调节机制和辩证的因果关系.不断变化的水流泥沙的输入与输出就是影响系统的“因”,相应河槽形态的响应性变化调整则是河流体系综合作用的“果”.从地貌学角度看,决定河床形态变化趋势和程度的自我调节机制受河流体系能量分配和耗散原理的制约.很多河流在趋向于平衡的发展过程中,河床形态总是不断地对自身进行多方面的调整,以适应输移多变的来水来沙的情况.

冲积河流具有复杂系统所应具有的特征,即它的自动调整并非无目的的随机现象,而是与系统所遵循的自组织理论是一致的^[4].当系统受到外界干扰偏离平衡态后,总系统中的各子系统不再相互适应,各自的独立性相对突出.由于各子系统间不再协同,总系统便失去因各子系统关联所具有的整体特性,内部呈现无序的混沌状态.此后系统将产生自组织现象,当各子系统间的关联足以约束各自的独立性而出现协同现象时,整体效应使系统产生新质.整个系统的功能逐渐适应环境输入的要求,系统则逐渐由无序转为较为稳定的新结构.

河流自我调整的程度和范围是与外界环境干扰的程度及河流体系的自由度有关的.反映河流体系可调整自由度的河床形态因子、水力因子、挟沙因子等方面的自组和协同,就是河流自身对外界干扰(如水库引起下游河道水沙条件变化)的具体反馈响应形式.河流体系调整的基本特点是对平衡态的趋向性,它表现为河流系统力图维持动力与形态在新条件下的和谐有序,这反映了一个动态系统的基本生存功能.但是系统每一轮新的平衡,绝不再会是原有平衡的重复了.

从能量角度看,河流系统的调整方向亦即进入新一轮平衡的状态(水平)是遵循能量分配耗散原理的.在能量分配问题上,冲积河流系统受河流熵变化规律的控制,主要表现在系统调整过程中能量呈空间均配的趋

收稿日期:1997-12-21

作者简介:孙东坡,男,副教授,水力学及河流动力学专业,主要从事河流力学与环境研究.

^{*} “八五”国家科技攻关项目(85—926—02—01—04)的部分研究成果.

向性.在能量耗散问题上,冲积河流作为一个耗散系统,还遵循最小能耗原理,表现为河流体系保持最小能耗的趋向性.当河流系统的输入条件(来水来沙)变化时,体系调整会力图使能量沿程分配保持均匀一致.同时,河流的调整也不会集中由某一要素独立承担,而是力图将调整尽量均匀分散在与水流能耗率有关的各要素上.例如河宽、水深、流速、坡降等相关因子都要发生调整,并且使各水力因子的变化尽可能小.这就是所谓的能量均配趋向性.当河流系统对外界干扰进行响应调整时,系统力求使单位重水体的能耗率尽可能低.例如,系统在固定流量和坡降时力求使输沙率保持最大.这就是所谓的能耗最小的趋向性.这些能量分配耗散原理都可以通过引入河流熵的概念来定量表述.

2 基于河流熵概念的能量分配耗散原理

2.1 河流能量分配规律

作为熵理论精华的最大熵原理,在自然科学领域得到了广泛的应用.在热力学体系中,熵的变化可以决定其体系内能量的分配关系.作为同样的自然系统,河流体系内部的能量分配、耗散特点应可类比热力学体系中熵的变化规律.因此由熵理论决定的这种能量制约关系也应能反映河流体系内的能量分配耗散特点.

在任何不可逆的自然过程中,熵总是不断地增加的.熵的变化反映了可供做机械功的能量在系统中是如何分配的,它实质上是表征了一个能量分配函数.在研究具体问题时,通常把熵作为系统处于某种状态的概率来表示.联系熵与状态概率间的关系式为

$$\Phi = k \ln p + C \tag{1}$$

式中 p ——状态概率; k , C ——常数.式(1)也可写为

$$p \sim \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right) \tag{2}$$

式中 kT 代表所有可能出现的状态的总能量.

将一个体系中可能出现的状态以 $1, 2, \dots, n$ 表示,其相应的概率分别为 $p_1, p_2, \dots, p_n$.熵便反映了这些离散的状态概率的对数总和.

$$\Phi \sim \sum \ln p_i \tag{3}$$

体系在趋于稳定的调整过程中,自由能减小并力求使熵值达到最大.此时体系中的能量分配则具有最大可能.当 $\Phi \rightarrow \Phi_{\max}$ 即 $\sum \ln p_i$ 趋于最大时,由数学原理可知,对于多种可能性,最有可能出现的是各种可能性的概率相等的情况.

对于河流系统,设河流总能量为 E ,沿程各河段的能量分别为 $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$,第 i 河段的能量为 E_i .类比热力学体系中介质特点,第 i 河段的能量为 E_i 的或然率,可表述为

$$p_i \sim \exp\left(\frac{-E_i}{E}\right) \tag{4}$$

整个河流的熵为

$$\Phi \sim \sum \ln p_i \tag{5}$$

一般来说,河流能量分布的调整也总要使体系内能量分配具有最大或然率,即在调整过程中力求使熵达到最大.这要求各个可能出现状态的或然率相等.也就是说,仅当熵值 $\Phi \rightarrow \Phi_{\max}$ 时,河流沿程能量的分配达到最大可能性.这时便要求

$$p_1 = p_2 = p_3 = \dots = p_n$$

亦即
$$E_1 = E_2 = E_3 = \dots E_n = C \tag{6}$$

上式中 C 取决于每一河流的特性.该式表明,冲积河流调整的结果将使体系内能量的沿程分配保持均匀一致的有序状态.这一能量分布规律对于长时间系列而言,也应是满足的.对于任一河段,相对下游端的单位体积水体所具有的能量可表示为相对势能和动能之和,即

$$E_i = \gamma \left(\Delta z_i + \frac{v_i^2}{2g} \right) \tag{7}$$

式中 $\Delta Z_i, v_i$ 分别表示河段 i 的落差和平均流速.

从长时段平均考虑,前述能量分布规律也应满足

$$\bar{E}_i = \frac{1}{T} \int_0^T \gamma \Delta z_i dt + \frac{1}{T} \int_0^T \gamma \frac{v_i^2}{2g} dt \tag{8}$$

上式右端第一项(相对)势能(或称势能改变部分)就是河段*i*河流能量的沿程耗散.亦可说是水流克服当地摩阻、切割地貌所做的功.其中:

$$\gamma \Delta z_i = \gamma J_i \Delta l_i = \gamma J_i v_i \Delta t_i \tag{9}$$

式中: J_i Δl_i ——河段*i*的总比降和河槽长度; Δt_i ——水流流经河段*i*的时间.

式(8)中若其中一项能量发生变化,另一项能量也必然会有相应改变.例如,水沙条件变化引起的动能项 $\gamma v_i^2/(2g)$ 改变,则势必会通过调整河段比降、长度等使势能 $\gamma \Delta z_i$ 有相应改变.

若某一河流系统的上游加入了人为干扰因子(如修建大型水库),这必然会大大影响并改变下游天然径流、泥沙的量值及过程,引起河道形态作响应性反馈调整.一些水文因子、河床形态因子都会因此发生变化.但从能量守恒的角度看,河流体系在一长时段内通过自身调整,终会使内部能量分布均匀一致的特性不会改变.具体每一河段,也都应保持时均总能量相同且不变的状态.一般情况下,水库调节总是使其下游年内或年际间的径流过程调匀.尽管长时段内总水量不会有变化,但是流量过程 $Q \sim t$ 不均匀程度的减弱,总会使流速*v*的变幅大大降低,也相应引起高次方均值因子(如动能、水流挟沙力)的减小.若以下角标1,2分别表示河流某特征量处于性质不同的前后两个时段(如上游水库修建前、后)或表示河流某特征量处于同一时段的两种不同状态(无水库的自然状态和有水库的人为干扰状态),那么在等长时段*T*内显然应有

$$\frac{1}{T} \int_0^T \gamma \frac{v_1^2}{2g} dt > \frac{1}{T} \int_0^T \gamma \frac{v_2^2}{2g} dt \tag{10}$$

从能量守恒不变原理出发,由式(11)也可得到

$$\frac{1}{T} \int_0^T \gamma J_1 \Delta l_1 dt < \frac{1}{T} \int_0^T \gamma J_2 \Delta l_2 dt \tag{11}$$

或

$$\frac{1}{T} \int_0^T \gamma J_1 v_1 \Delta t_1 dt < \frac{1}{T} \int_0^T \gamma J_2 v_2 \Delta t_2 dt \tag{12}$$

这说明,当来流趋于均匀、外界干扰使时均动能在后段(状态)比前段(状态)减小时,势必导致该河段的势能变化,即在河流能量横向耗散和沿程阻力做功方面,后时段(状态)比前时段(状态)增大.

2.2 河流能量耗散规律

复杂系统的耗散结构理论认为,对于一个封闭的耗散系统,系统的平衡有序结构需要通过能量耗散来实现.在向平衡有序结构发展的进程中,系统的能量耗散率只能减少,而系统处于平衡状态时的能量耗散率是最低的.

在河流熵理论中,表征水流唯一有用的能量就是它的势能.河流体系中水流的势能和高程,分别相当于热力系统中的热能和绝对温度.根据这种模拟类比和热力学中熵的变化规律,可以证明:河流系统处于平衡状态时的河流总功率(能量耗散率)是最小的.这一最小能耗理论也可由 Navier-Stokes 运动方程导出^[1].

对于不可压缩流体,紊流运动的时均雷诺方程用张量形式可表示为

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \gamma h}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \tag{13}$$

式中: γh ——水的时均重力势能; u_i ——时均流速; σ_{ij} ——雷诺总应力张量.引入涡粘系数 ν_t ($\nu_t = \rho \epsilon$),则雷诺应力也可写成

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \rho (\nu + \epsilon) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{14}$$

式中: p ——时均压强; δ_{ij} ——二阶单位张量.

这样,紊流运动的时均雷诺方程就与层流运动方程相似,唯一的差别是粘性系数的构成不同.

若考虑雷诺数不太大的明渠恒定渐变流情况,式(13)左边的惯性项便可忽略不计.则时均雷诺方程就简化为

$$\frac{\partial (\gamma h + p)}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial (\nu + \epsilon) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)}{\partial x_j} \tag{15}$$

与层流运动情况相似,这里把紊流的耗能函数 φ ,即流体单位体积的耗能率定义如下:

$$\varphi = \frac{1}{2}(\rho\nu + \epsilon)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)^2 \quad (16)$$

或者由式(14)耗能函数也可写成

$$\varphi = \frac{1}{2}(\rho\sigma_{ij} + p\delta_{ij})\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (17)$$

若有一种流动状态的流速分布为 u_i ,它满足时均雷诺方程(15)、水流连续方程和一组已知的边界条件。然后考虑另一种流动状态,假设它的流速分布为 $(u_i + \hat{u}_i)$,不满足时均雷诺方程式(15),但却与前种流动具有相同的涡粘系数,满足水流连续方程且有一组已知的边界条件。根据公式(16),这种代换水流的能量耗散函数为

$$\varphi(u_i + \hat{u}_i) = \varphi(u_i) + \rho(\nu + \epsilon)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i}\right) + \frac{1}{2}(\rho\nu + \epsilon)\left(\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{u}_j}{\partial x_i}\right)^2 \quad (18)$$

代换水流的总能量耗散率 E ,可通过对所研究的总流区关于 φ 积分取得(可以证明,上式右边三项和式中的第二项的积分为零)。于是便有

$$E(u_i + \hat{u}_i) = E(u_i) + E(\hat{u}_i) \quad (19)$$

因为 E 不可能是负值,故在任何代换水流 $(u_i + \hat{u}_i)$ 的情况下恒有

$$E(u_i) = E(u_i + \hat{u}_i) - E(\hat{u}_i) \leq E(u_i + \hat{u}_i) \quad (20)$$

上式表明,满足时均雷诺方程(15)的流速分布 u_i 所导致的总能量耗散率小于所有不满足时均雷诺方程的任何其他流速分布。那就是说,在满足连续方程和一组已知边界条件的所有流动状态(流速分布)中,只有使 E 变得极小的那个流动状态(流速分布)才能满足运动方程。从系统结构角度看,只有使 E 变得最小的运动状态才能使河流体系趋于稳定状态。从数学形式上看,根据连续方程和已知边界条件通过求 $E(u_i)$ 最小值所得的系统 u_i 才可以说是真正的水流解。因此,求解水流运动方程问题便转化为通过对流速的泛函 E 取极小值来求解问题。

河流体系的能量分配耗散特点可以通过所谓低能耗趋向性的“最小水流功率”原理来具体表征。河流系统在进行自我调整过程中,总是力图使熵达到最大,而使熵的产生率达到最小。因为只有处于这样一种状态的系统结构才代表低能耗的稳定系统结构。从熵与能量关系可以导出:使能耗率最小亦即是令单位水流功率 $JU \Rightarrow \text{minimum}$ 。这个判别式可以用来分析河流的演变规律、河床形态的调整趋势和造床机理。

2.3 黄河内蒙河段河流能量耗散规律浅析

由于黄河上游修建刘家峡、龙羊峡水库,极大地改变了其下游内蒙河段的水沙过程及搭配关系。水库运用使流量过程均化,月均流量离差系统由建库前的 0.79 降低为 0.36,水沙搭配失调造成干流时常被支流(十大孔兑)的高含沙洪水淤堵;常年小水使造床流量自 60 年代以前的 $2\,000 \sim 3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 降低成近十多年的 $800 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右。

内蒙河段属可自由发展的冲积性河流,上游水库运用引起的水沙条件改变必然引起该河段河流能量分配及耗散过程的改变。这种能量分配耗散的调整是通过塑造河流地貌使河床形态适应新条件下的平衡输水输沙。大量实测资料分析研究表明^[5],该河段的反馈性调整响应实质上是反映了河道流速、纵横比降、造床流量这些能量特征值之间与河床形态因子(曲折率、宽深比等)的相互转换、制约关系。主要表现在:

(a)河流平面活动性增强,小水作用使河流横向切割、摆动作用加剧,纵横比降(横向能耗)加大使河湾曲折系数 ζ 提高,该河段的曲折率 ζ 则直接与水库运用引起的水沙条件改变及对下游径流过程的干扰程度相关。作者通过分析研究^[6],得到

$$\zeta = 1.003(S/Q)^{0.124}C_v^{-0.098}$$

式中: S/Q ——来沙系数; C_v ——径流过程的离差系数。

(b)造床流量逐年下降使河床深泓淤积,过水面积逐年减小,横断面趋向宽浅。典型断面统计表明,1991 年与建库前的 1962 年相比,过水面积减小 16%,宽深比 B/H 增大了近 1.42 倍。横断面调整反映的也是水库运用使水流时均动能减小后河流能量耗散的重新分配结果。这就是要力图在小流量下通过反馈调整河道的过洪能力(造床流量)、河相关系($\sqrt{B/H}$),以适应新条件下系统的平衡输入与输出。内蒙河段近年的演变趋

势、形形色色的河床调整,都可以从水库运用引起的河流能量耗散的再分配调整中得到其根源与合理解释^[5]。

3 结 束 语

对河流系统处于平衡状态时总功率(耗散率)为最小的这一规律的认识,首先是通过系统类比得出的。目前,最小能耗原理在恒定均匀流或无旋流条件下可以由变分极值原理导出。严格地说,导出的最小能耗原理只是反映粘性流体流动时流速分布在一定条件下必须遵循的一种规律。在该原理中,流速的泛函具有能量的形式。因此有人认为^[7],最小能耗原理并不能反映一般水流条件下河流能量在时间和空间的分布规律,不宜将其作为研究河流演变规律的理论基础。笔者认为,虽然能量耗散原理在基本理论体系上并非完善,但在研究复杂的河流系统时,在宏观简化条件下运用最小能耗思想,从河流能量分配耗散关系角度讨论冲积河流的自动调整作用及河流反应的平衡趋向性问题,的确是一种较适宜的工具。笔者在研究水电工程对下游冲积性河流再造床过程的影响时,采用这种方法就取得了较好的效果^[5]。

冲积河流系统自动调整规律的研究是环境-水利界长期关注的焦点,不同理论流派的研究也将会长期并存、相辅相成。对于冲积河流这样的复杂巨系统,能量平衡的观点、系统分析的方法,必须将更多更好地用于河流系统与人类活动协调关系的研究中。

参 考 文 献

- 1 Yang C T. Minimum unit stream power and fluvial hydraulics. *Hydraul Div*, 1976, 107(HY7): 919 ~ 934
- 2 张海燕.河床演变工程学.北京:科学出版社,1990.148 ~ 225
- 3 邓志强.基于最大熵原理的河相关系.见:曾庆华主编.首届全国泥沙基本理论学术讨论会论文集.北京:中国建材工业出版社,1992.441 ~ 449
- 4 尹国康.系统科学在地貌学中的应用.地理学报,1991(3): 3 ~ 9
- 5 李国庆,孙东坡.大型水电工程对下游冲积性河道的影响分析.水科学进展,1996(6): 151 ~ 157
- 6 Sun Dongpo. Study on basic characteristics and river reaction of alluvial river System. Beijing: International Academic Publisher, 1996. 167 ~ 171
- 7 韦直林.评河流最小能耗理论.泥沙研究,1991(2): 16 ~ 22

Study on Energy Dissipational Theory of Alluvial Rivers

Sun Dongpo

(Dept. of Water Conservancy, Noth China Institute of Water Conservancy Hydroelectric Power, Zhengzhou 450045)

Abstract The concept of river entropy is introduced. On the Basis of the trend law of river system, the self-adjusting mechanism and energy dissipating properties of alluvial rivers are analyzed from the point of the view of the system. According to the variation principle, the energy dissipating pattern of river systems is developed and the relation between the freedom digree of river bed adjustment and river energy dissipation in consideration of the river distrubance by human activities is further studies. The cause of increase of the activity of riverbed is pointed out, and a law of winding coefficient for the Inner Mongolia reach of the Yellow River is given.

Key words river entropy; calculus of variations; river system; energy dissipation; feedback adjustment