

小流域侵蚀地貌过程与耗散结构

钱小蓉 陈山林 艾南山 顾恒岳

(兰州大学西北开发综合研究所)

摘 要

小流域系统是一定面积上(或空间)水流与环境(流域)相互作用产生的具有一定结构和功能的集合体,是一个处于非平衡状态的开放系统。河流与环境不断地交换能量、物质和信息,通过能量耗散和系统内部的非线性动力学机制,形成并维持了时间和空间上的宏观有序结构——耗散结构。我们着重研究了小流域侵蚀地貌过程中力与阻力的对抗作用、动力条件与物质条件,并由非平衡热力学的观点,提出了最小—最大能量耗散率原理及其变分证明;还研究了小流域侵蚀地貌过程的涨落与非平衡相变,并从河相关系与河床演变讨论了小流域自我调整与环境条件变化的适应关系。

一、小流域系统与耗散结构

小流域是一个包括一系列复杂过程的(力学的、物理的、化学的、生物的乃至社会生产的)远离平衡状态的开放系统。广义地说,这一系统是由水分循环所联系的,包括气候、植被、土壤和地下水在内的流域空间;也可狭义地理解为水体流动联系的流域表面。应当指出,无论怎样定义河流系统,它总是以流域为环境,且不断地与环境进行能量转换与物质循环,通过能量耗散和系统内部的非线性动力学机制来形成并维持时间和空间上的宏观有序结构——耗散结构^{〔1〕}〔2〕〔3〕。

在开放系统中,负熵流导致了有序结构的形成和维持。图1给出了小流域系统的熵变,根据不可逆过程热力学可将其表示为

$$dS = deS + diS \quad (1)$$

在这里 deS 是来自环境的负熵流,可理解为气候、植被、土壤、地质、地形及水利水土保持工程等维持水系存在和发展的自然和人工环境的条件变化; diS 是水系内部的熵产生,包括水体流动、水位涨落、物质扩散、泥沙输移、断面冲淤、河床演变等,且有

$$diS \geq 0 \quad (2)$$

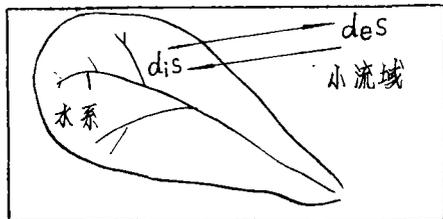


图1 小流域系统的熵变

它表明小流域系统经历着不可逆过程。

小流域是一个运动系统, diS 愈大,过程愈复杂,离平衡愈远。一个不为零的熵流 diS 能够

维持, 甚至在一个稳定情况上 (即 $dS = 0$), 不可逆过程将继续进行下去。小流域要求环境供应熵流, 且将产生一个有关的 deS , 有

$$diS = -deS > 0 \quad (3)$$

如果河流系统受到扰动而失去稳定性, diS 呈现增大或减小。前者意味着河流发育, 向高一级的有序结构演进; 后者意味着退化到平衡态, 河系趋于消亡。

熵产生效应, 是耗散量的简单量度。在流域系统中, 来自流域的能量、物质及信息, 维持着水系的运动。这种供求关系及满足程度, 导致了河流系统的演进与衰退, 发育与消亡, 控制了它们的方向和速度。

以上分析表明, 流域是开放系统, 远离热平衡状态, 各组分间存在着非线性的相互作用, 系统呈现随机性涨落现象。这就满足了产生耗散结构的基本条件。

二、小流域侵蚀地貌过程

小流域侵蚀地貌是流域系统的子系统, 它包括水流、水流挟带的泥沙及其运动边界条件约束下塑造的各类地貌形态。

(一) 小流域侵蚀地貌过程

在水流作用下, 流域地表形态及其组成的时空变化, 谓之小流域侵蚀地貌过程。它以水流挟带的泥沙输移为主要表征, 以河槽演变为集中表现。

在一个庞大而复杂的流域系统中, 小流域侵蚀地貌是气候、植被、土壤、地质构造及人类活动综合作用的结果。河流地貌过程 $G_m(t)$

$$G_m(t) = \left. \begin{array}{l} C(t) \\ P(t) \\ S(t) \\ G(t) \\ M(t) \end{array} \right\} \quad (4)$$

式中: $C(t)$ 、 $P(t)$ 、 $S(t)$ 、 $G(t)$ 、 $M(t)$ 分别为流域的气候、植被、土壤、地质构造及人类活动过程。

小流域侵蚀地貌形态 G_{mt}

$$G_{mt} = C(t) \cap P(t) \cap S(t) \cap G(t) \cap M(t) / t \quad (5)$$

(二) 力与阻力

小流域侵蚀地貌过程的能量, 来源于重力和降雨、风力等气象因子。显然, 作用于地表且引起侵蚀和物质移动的力主要是重力, 水的张力和压力, 水流的力及雨滴撞击力, 水分和水温度变化产生的膨胀力、扩散力。卡尔森 (M. A. Carson) 和凯克彼 (M. J. Kirkby) 估计了上述各种力的量级和效率^[4](表1)。

表1的数据表明, 在一个包括坡面和河道的流域系统中, 无论是能量消耗和泥沙输移, 水流的作用都是最重要的。

对侵蚀和物质输移的阻力, 集中表现为物质固有的抗剪强度, 它由平面摩擦力、粘结力、有效法向力和粘结力组成, 与重力和水流产生的剪切应力相对抗。

表 1

侵蚀地貌系统中力的量级及其搬运泥沙的效率

力	所完成的总功量 (焦耳/平方米·年)	向下搬运泥沙所 完成的总功量 (焦耳/平方米·年)	效率 (%)
重力: 以滑坡、崩塌等方式向下搬运	1—100	1—100	100
水流: 主要是河流中的溶移质和悬移质	$10^5—10^6$	10—100	0.01
降雨撞击力	2,000 500	0.02 (草地) 0.5 (裸地)	0.002 0.1
膨胀 水分 冻结 温度	2,000 5×10^7 2×10^8	0.4 0.1 0.02	0.001 2.5×10^{-7} 1.5×10^{-9}

力和阻力的对抗与组合, 刻画了河流地貌的 3 种最基本的相:

- 1、力 > 阻力 侵蚀;
- 2、力 = 阻力 搬运;
- 3、力 < 阻力 堆积。

在侵蚀力学的基础上, 根据沙伊德格尔的对抗性原理, 我们认为, 小流域侵蚀地貌是力和阻力对抗作用的产物, 不同的对抗与组合产生了不同的地貌形态。不过应当指出, 这里力包括内营力(地壳抬升、新构造运动)、外营力(降雨、水流); 阻力也包括内营力和外营力矛盾作用的概念。

(三) 动力条件与物质条件

以上分析说明, 小流域侵蚀地貌是水流和泥沙运动综合作用的产物。虽然大量实测资料证明了明流流速具有半对数分布特征, 但是在天然河流中却不可能出现均匀流动。一方面这是因为某一河段河床凹凸不平, 断面宽窄相间, 深槽浅滩交错, 河道蜿蜒摆动, 水力条件呈随机变化; 另一方面从宏观来看, 通常一条河流纵坡沿程递减, 河宽增加, 导致流速减缓, 水深加大, 成为河流发育的一般规律。

通过水系发育内外营力作用的泛系分析, 我们认为, 这种内营力主导的局部水力条件的随机性和外营力主导的河网水力条件的系统性, 正是沙伊德格尔对抗原理的反映。

形成和维持小流域侵蚀地貌过程的条件是:

- 1、动力条件—水流。水体流动乃是能量耗散、泥沙产生及输移的主要动力;
- 2、物质条件—泥沙。河流通过泥沙塑造各种侵蚀地貌形态, 借以自我调整。

(四) 能量耗散的极值原理

1、最小能量耗散率。近年来, 杨志达(C. T. Yang)、宋(C. C. Song)和张(H. H. Chang)等人通过大量河流观测和实验室资料的综合分析, 建立了初具体系的流域最小能量耗散率理论^[6], 其主要点是:

(1) 在固定边界条件下, 一切满足连续方程和边界条件的流动中, 能满足运动方程的流动, 其能量耗散率最小;

(2) 在边界可塑变、流动非恒定条件下, 流动偏离能量耗散率最小值时, 水流将通过自我调整, 使其能量耗散率随时间不断减小, 直到某一最小值出现。此时水流亦达到恒定, 边界亦达到平衡, 即呈现稳定边界条件下的恒定流动的能量耗散率最小, 这又与第一点吻合。

侯晖昌教授将这两点归结为, 在河流中不管其表现形式如何, 促使水流调整的水力因子或冲刷河床的原动力, 都是为了满足水流最小能量耗散的趋向性。换句话说, 河流必需而且只有通过泥沙输移, 来达到改变自身过水断面(边界可塑变时)、水面比降和流速(边界不可塑变时), 降低其能量耗散率, 直至实现可能的最小值为止。

2、最大能量耗散率。与上述理论相反, 黄万里先生提出了最大能量耗散率定律^[6]。他认为, 凡属固体、液体、气体或其它临界物体连续介质独立系统的整体, 以给定的初始和边界条件在外力作用下运动时, 其所有质点将随时按整体机械能产生最大的热能转化率, 即耗散率, 而形成其应力场、应变场, 或流速场、压力场。由此可以直接导出流体动力学第二定律, 即流体或掺有固体的多种流体在一独立系统内, 在给定初始和边界条件下流动时, 在任何时刻的密度、速度和压力分布, 总是使系统整体的能量耗散率, 随时为一最大值。

3、最小—最大能量耗散率。最小能量耗散率的理论在实际中已有较广泛的应用, 取得了一些合乎事实的成果。但这个理论仅是在固定边界, 恒定的、不夹沙的、忽略了惯性项的准线性流动下推导出来的, 在应用中尚有一定局限。此外, 在为这个理论提供数据资料证据时所建立的关系^[7], 缺乏严密的逻辑, 故在实际应用中也有相反的结果。如对河流综合阻力的研究表明^[8], 综合阻力关系并不反应最小能量耗散率原理。

最大能量耗散率可用自然界中丰富的现象来说明, 黄万里教授还用变分法给出了证明, 但却无法用实验验证。

为此, 对能量耗散率极值问题的认识, 我们认为, 有必要全面地、认真地考虑布鲁塞尔学派的非平衡态热力学理论。

(1) 爱因斯坦涨落理论的推广。“非平衡是有序之源”, 这是布鲁塞尔学派倡导非平衡热力学的基本出发点。这是因为系统在远离平衡的不稳定态时, 使系统离开原来轨道的涨落, 不仅不会衰减, 反而可能被放大, 形成“巨涨落”, 使系统跃迁到一个新的有序状态。这就是所谓的涨落导致有序, 并将由于与外界交换物质和能量而获得稳定。所以, 耗散结构表现的有序性就是涨落的有序性, 这与平衡结构的有序性完全不同。

(2) 能量耗散率的涨落变化对于河流中的单元水体, 其输送泥沙的能量是它的势能。这样每单元水体的势能耗效率, 将直接与含沙量有关, 并可由普通物理学给出其数学表达式

$$y' = \frac{dy}{dt} = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{dy}{dx} = V \cdot S \quad (6)$$

式中: y ——指定的研究河段单位重量水体的势能耗散;

t ——时间;

x ——研究河段的长度;

V ——平均流速;

S ——能面比降。

从这样一个简单的式子, 我们很容易推断 y' 的一般变化规律: 对某一指定河段来说, 汛期大于枯水期, 涨水大于退水, 冲刷大于淤积; 对于一条河流来说, 上游大于下游, 直道大于河弯, 急流滩大于缓流段。譬如, 当我们只考虑洪水涨落对水面比降变化的影响, 在受洪水涨落影响的

水位流量关系曲线 (图 2) 上可以看出, 无论在 $V = f(H)$ 或 $S = f(H)$ 上, 涨水时

$V = f(H)$ 和 $S = f(H)$ 递增, $f'(H) > 0$;

退水时

$V = f(H)$ 和 $S = f(H)$ 递减, $f'(H) < 0$;

所以在峰顶有 $V_P = V_{max}$, $S_P = S_{max}$

在峰谷有 $V_V = V_{min}$, $S_V = S_{min}$

这样, 由式 (6) 可推得:

$$y'_P = y_{max}, y'_V = y_{min}$$

以上式中, V_P , S_P , y'_P 分别为峰顶的流速比降和能量耗散率; V_V , S_V , y'_V 分别为峰谷的流速、比降和能量耗散率。

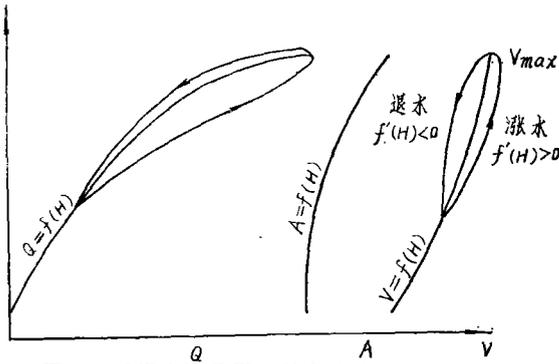


图 2 受洪水涨落影响的水位流量关系曲线

以上分析表明, 在一次洪水过程中, 客观上存在着能量耗散率 $y_{min} \rightarrow y_{max}$, $\rightarrow y_{min}$ 的变化。这种涨落实际上是耗散结构有序性的表现, 与布鲁塞尔学派的基本出发点一致, 我们称为最小—最大能量耗散率原理。

(3) 涨落趋势的调整。能量耗散率的涨落趋势, 按 $diS = -deS > 0$ 进行调整。

a、当 $diS < -deS$ 时, 总熵度 $dS = deS + diS < 0$, 此时环境负熵流足以维持流域系统的不可逆过程, 能量耗散率增大, 小流域侵蚀地貌处于发育性的演变状态, 向更高一级的稳定有序结构发展;

b、当 $diS > -deS$ 时, 总熵度 $dS = deS + diS > 0$, 此时环境不能供应小流域以足够的负熵流, 能量耗散率减小, 小流域侵蚀地貌发育衰退或停顿, 有序结构解体;

c、当 $diS = -deS$ 时, 总熵度 $dS = 0$, 此时流域生态平衡, 小流域能量耗散稳定, 小流域侵蚀地貌发育处于定常状态, 抗干扰力强, 是理想的稳定有序结构。

三、最小—最大能量耗散率原理的变分证明

黄万里先生在参考文献 [6] 中给出了最大能量耗散率原理的一个变分证明。这里, 我们将沿用其思路, 给出最小—最大能量耗散率原理的证明。

(一) 能量耗散率的驻值原理

考虑一开放的热力学系统, 能量守恒定律要求

$$\dot{E} = \dot{E}_c + \dot{E}_a \quad (7)$$

式中: \dot{E} ——系统 t 时刻总能量变率;

\dot{E}_c ——系统 t 时刻总储存能率;

\dot{E}_a ——系统 t 时刻总能量耗散率。

且输入能率 \dot{E} 非负。系统的不可逆过程要求

$$\dot{E}_a \geq 0 \quad (8)$$

考虑系统从真实状态到某一虚拟状态的变分, 变分过程中, 时刻 t 是固定的。由式 (7)

$$\delta \dot{E} = \delta \dot{E}_c + \delta \dot{E}_a \quad (9)$$

假定, 对于任何虚拟系统, 输入能率 \dot{E} 保持不变, 于是式(9)为

$$\delta \dot{E} = \delta \dot{E}_c + \delta \dot{E}_a = 0 \quad (10)$$

式(9)中, $\delta \dot{E}$ 相当于某一增添的输入能率额外的加于系统, 相应的只会反映出一个增添的 $\delta \dot{E}_c$ 和增添的 $\delta \dot{E}_a$, 换句话说, $\delta \dot{E}_c$ 和 $\delta \dot{E}_a$ 应有相同符号。但由于式(10), 必须有

$$\delta \dot{E}_c = 0 \quad (11)$$

$$\delta \dot{E}_a = 0 \quad (12)$$

式(9)即能量耗散率驻值条件, 可以叙述为, 对任何具有相同输入能率的可能系统而言, 真实系统的能量耗散率取驻值。式(11)表明, 储存能率也取驻值。

(二) 能量耗散率的最小—最大值原理

首先, 我们进一步来考虑驻值条件式(11)和式(12), 如前述, $\dot{E} \geq 0$, $\dot{E}_a \geq 0$; 其次, 对任意相邻的两个虚拟状态而言, 式(10)仍成立, 即 $\delta \dot{E}_c = -\delta \dot{E}_a$, 但 $\delta \dot{E}_c$ 和 $\delta \dot{E}_a$ 并不为零。

假定 $\dot{E}_c \geq 0$, 并且假定, 对任何虚拟系统, \dot{E}_c 也非负, 则可以证明, 对真实系统, $\dot{E}_a = \max$ 。

见图3a, A点对应于真实状态。 $\dot{E}_a = \max$ 相当于任一变分途径ECABD必须是凸的, 事实上, 如果变分途径是凹的, 则由于变分的任意性, 我们总可以找到途径, 例如 $E'C'AB'D'$ 有 $\dot{E}_c < 0$ 与假设矛盾, 所以 $\dot{E}_a = \max$ 成立。

假定 $\dot{E}_c \leq 0$, 并且假定, 对任何虚拟系统, \dot{E}_c 也非正, 则可以证明, 对真实系统, $\dot{E}_a = \min$ 。

如图3b, A点对应于真实状态。 $\dot{E}_a = \min$ 相当于任一变分途径ECABD必须是凹的。事实上, 如果变分途径是凸的, 则由于变分的任意性, 我们总可以找到途径 $E'C'AB'D'$, 有 $\dot{E}_c < 0$, 与假设矛盾所以, $\dot{E}_a = \min$ 成立。

上述结论可以叙述如下:

对任何具有相同输入能率 $\dot{E} (\geq 0)$ 的可能系统而言, 对储存能率 $\dot{E}_c \geq 0$ 的一切可能系统, 真实系统能量耗散率 $\dot{E}_a = \max$; 反之, 对储存能率 $\dot{E}_c \leq 0$ 的一切系统, 真实系统 $\dot{E}_a = \min$ 。

这就是能量耗散率的最小和最大值原理。

不难推论出, 对储存能率 $\dot{E}_c = 0$ 的一切可能系

统, $\dot{E}_a = \text{const}$, 即是稳定耗散的。由上述证明可看出, 相应于 $\dot{E}_a = \max$, 必有 $\dot{E}_c = \min$; 相应

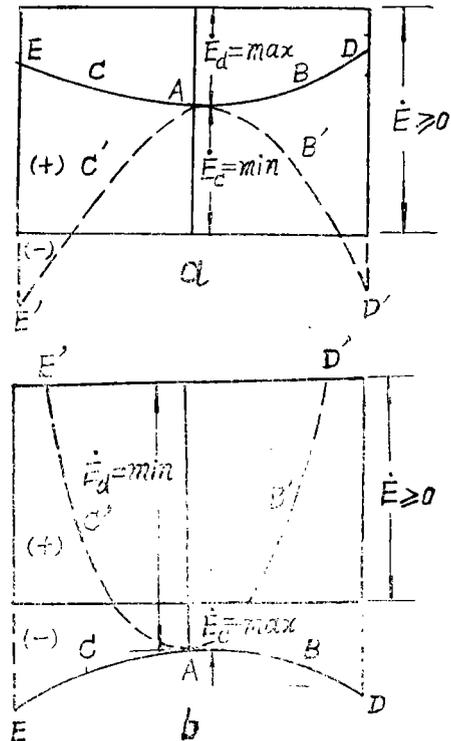


图3

于 $\dot{E}_d = \min$, 必有 $\dot{E}_c = \max$, 即存在着对应的储存能率的最大和最小值原理。

我们通过储存能率 \dot{E}_c 的不同情况, 将能量耗散的最小和最大值原理统一了起来。事实上, 这就表明, 系统的总熵度 $dS = deS + diS$ 正是统一最小和最大能量耗散原理的尺度。

四、涨落与非平衡相变

一个宏观系统由于外部和内部的原因, 常会出现一种随机的涨落现象。涨落的产生是必然的, 涨落的尺度则具有偶然性。远离平衡的系统, 情况将完全不同, 甚至可能与最小熵产生原理相反。非平衡系统是物质流穿过时受约束的系统, 并在与环境作用中耗散能量。当系统由平衡越过平衡态的分支时, 可以失去它的稳定性质。小的偏差消失后, 系统从这种状态过渡到一个与平衡性质完全不同的新的状态。它能够利用空间和时间的有序化来表现系统的自组织性能, 这就是非平衡相变的过程。

(一) 河床类型

根据河床形态及演变规律, 常划分为如下4个类型:

1、顺直微弯形。平水期, 深槽浅滩交替出现; 汛期, 洪水淹没交错分布的边滩并推动其向下游缓缓移动; 枯期, 边滩出水, 水流归槽, 又成微弯形水道。

2、弯曲型。弯曲(深槽)与过渡段(浅滩)相间, 其演变主要表现为槽向变形, 凹岸后退, 凸岸淤长, 产生河曲蠕动, 发展到一定程度则引起自然裁弯。

3、分汉型。河身呈宽窄相同的莲藕状, 窄段为一河槽, 宽段为汉道, 各汉处于交替发育和消亡之中。汉道的形成过程为: 雏型心滩阶段, 心滩阶段, 江心洲阶段。

4、游荡型。河身宽浅, 沙滩众多, 汛期一片汪洋, 波涛汹涌, 枯期河汉密布, 水流散乱, 河床变形迅速。每遇洪水, 边滩切割成心滩, 心滩靠岸成边滩, 合并、分离频繁出现, 致使主流摆动不定。

以上类型既是侵蚀地貌学中的四类河床地貌形态, 又是河流动力学中河道演变的4个阶段, 为地学界所公认。

(二) 地貌的演变过程

在线性非平衡区, 涨落是一种破坏自身稳定性的干扰, 想使系统离开定态; 而在远离平衡态的非线性区, 在分支点之后, 涨落的作用完全相反, 成了非平衡相变的触发器。小流域侵蚀地貌过程属后一种情况, 图4是河床演变的相变、耗散结构及其状态转移的示意图。

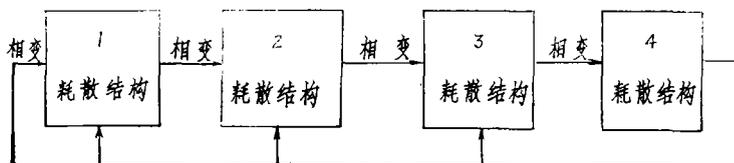


图4 河床演变的相变、耗散结构及其状态转移图

在这里, 相变可以是冲刷、切割, 或淤积、合并, 也可以是一定条件下的冲淤交替或相对平衡。它体现了河流吸收环境的能量, 进行一系列自我调整, 达到新的平衡的自组织作用。这种非线性非平衡的相变, 既可表现在时间上, 也可表现在空间上, 它构成了小流域侵蚀地貌过程, 实

质上就是流域系统耗散结构的涨落表现。

(三) 非平衡相变与环境的适应

小流域的自我调整包括两类物理量：

- 1、与边界条件有关的量，如断面形状、糙率、纵剖面、河曲形态等；
- 2、与流量特性有关的量，如流速及含沙量分布、紊动特性、比降变化、水深等。

调整的幅度、速度及形式，受到诸如气候、地质、地形、土壤、植被及人类活动等流域环境条件的约束。

由于流域条件的复杂性、多变性，地面升降，气候变迁，植被增减，土壤侵蚀，水利水土保持工程等，都会直接改变流域的产水产沙条件。流域自我调整的目的，就是使来水来沙畅通输移，适应环境条件的改变，产生相应的河相关系及地貌形态。

(四) 非平衡相变的特征

与力学、物理、化学、生物等各类非平衡相变一样，小流域侵蚀地貌的非平衡相变具有如下特征：

- 1、是在非平衡区域中实现的；
- 2、是突变，诸如河曲蠕动、裁弯取直、断面冲淤、边滩切割、心滩靠岸、河汉分并、主流摆动等，多呈突变性；
- 3、是物态相同的相转变。
- 4、相变后所形成的新的耗散结构，要依靠环境的能量和物质以维持自身的稳定。

四、讨 论

1、小流域系统具有形成耗散结构条件：

- (1) 河流以小流域为环境，进行物质、能量和信息交换，是一个开放系统；
- (2) 小流域系统远离热平衡状态；
- (3) 小流域系统内部各要素，如水流、泥沙、河床之间存在着非线性关系，产生协调作用和相干效应，使其组合不仅是量的增加，且有质的变化；
- (4) 水情变化的随机性涨落，是产生非平衡相变和导致有序性的重要原因。

2、水土流失等能量耗散率的最小 \longleftrightarrow 最大变化，表明流域一系列自我调整是适应水情随机涨落，经过相变产生相应的河相关系和地貌形态，以最大限度地满足来水来沙的畅通输移。

3、维持河流耗散结构的流域环境的复杂性，尤其是水情变化的偶然性和必然性，导致了局部河段或时段上河流地貌形态的随机性，以及河流和多年平均地貌形态的系统性。

4、小流域环境的生态平衡将直接影响水情变化，并反映在河流地貌耗散结构的稳定性上，即：生态平衡，耗散结构稳定；生态平衡受干扰，耗散结构失稳；生态平衡破坏，耗散结构解体。

参考文献

- [1] G. Nicolis and I. Prigogine: Self-Organization in Non-equilibrium System, 1977;
- [2] I. Prigogine: Time, Structure and Fluctuation, 《SCIENCE》, Vol. 201, No4538, 1978;
- [3] I. Prigogine: From Being to Becoming, 1979;
- [4] M. A. Carson and M. J. Kirkby: Hillslope form and Process, Cambridge at the University Press, 1972;
- [5] C. T. Yang and C. C. Song: Theory of Minimum Rate of Energy Dissipation, Proc. ASCE, J. Hydr. Div. Hy 7, pp769-784, 1979;
- [6] 黄万里: “连续介质动力学最大能量消耗率定律”, 《清华大学学报》, Vol. 21, No. 1, 1981;
- [7] C. T. Yang: “Theory of Minimum Rate of Energy Dissipation and Its Application,” A Compilation of the Lectures on River Sedimentation”, Edited by Sedimentation Committee Chinese Society of Hydraulic Engineering, June, Beijing, 1981, ppi59-196;
- [8] 赵安业等: 河流建库后下游河床演变与河床演变理论问题”, 《泥沙研究》 No.1, p77, 1982.

ON THE CONNECTION BETWEEN GEOMORPHOLOGICAL PROCESSES OF A SMALL WATERSHED AND DISSIPATION STRUCTURE

Qian Xiaorun Chen Shanlin Ai Nanshan Gu Hengyue

Northwest Comprehensive Institute of Exploitation

under Lanzhou University

Abstract

As a non-equilibrium open system, the water system is a set with certain structure and function formed under action between flowing water and environment. In this paper the dissipation structure of geomorphological processes of a watershed is discussed. Attention is paid to the antagonistic action of force and resistance, dynamic and material condition. According to non-equilibrium thermodynamics, the principle of the minimum-maximum energy-dissipation rate is set up and proved with calculus of variation.