

# 侵蚀基准面下降对水系发育与 产沙影响的实验研究

金德生, 张欧阳, 陈 浩, 郭庆伍

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 在  $35.56\text{mm/hr} \cdot \text{cm}^2$  定雨强的人工降雨条件下, 组成物质中径为  $0.021\text{mm}$ , 侵蚀基准面两次下降的流域发育对比实验表明, 水系发育以增加河道(沟道)数目及流域出口段河道下切、溯源侵蚀延伸长度两种方式进行最小消能, 产沙过程具有明显的复杂响应特征。流域侵蚀产沙与水系分形维数间存在显著的非线性特征, 分数维值与产沙量间呈不对称双曲线的关系。侵蚀基准面下降导致流域势能的相对增大, 在消能过程中, 第一次基准面下降带来的影响比第二次基准面下降带来的影响要显著, 在空间上, 其影响随远离流域出口而减弱。

**关键词:** 基准面下降; 水系发育; 产沙; 非线性; 实验分析

**中图分类号:** P931.1; P333.4 **文章编号:** 1000-0585(2003)05-0560-11

一个典型的流水地貌系统由侵蚀带、输移带及沉积带三部分组成, 流域水系是其中一个重要组成部分<sup>[1]</sup>。流域水文地貌的定量描述, 早在 20 世纪 40 年代, Horton 就作出了卓越的贡献, 他归纳出数条 Horton 定律<sup>[2]</sup>, 60 年代以来, Leopold 及 Langbein 对水系进行随机游动和熵的研究<sup>[3,4]</sup>、Shreve<sup>[5~7]</sup>, Smart<sup>[8,9]</sup> 及 Scheideger<sup>[10,11]</sup> 等人对水系结构进行了随机拓朴定量研究。80 年代以来, 鉴于水系长度、水系密度、水系结构、河流平面形态及河流纵剖面等具有明显的分形特征, 人们开始对水系及其发育特征加以分形研究与分数维分析, 并研究它们与紊流分形、流量过程及消能的关系等<sup>[12~30]</sup>。

迄今为止, 流域水系的分形研究, 主要集中在水系形态及结构方面的分形分析和分数维计算, 且侧重在空间分形特征分析, 而时序分形特征研究较少, 对流域水系的地貌演化分形研究较少, 涉及水文动力过程、沙泥运动输移及其相互关系的分形研究则更少, 笔者曾对流域水系发育与产沙间的非线性关系作了初步研究<sup>[31]</sup>, 并进一步探讨了流域物质组成对水系发育过程中分形特征及产沙的影响<sup>[32]</sup>。Schumm<sup>[33]</sup> 曾进行过侵蚀基准面下降对水系发育的实验研究, 但运用实验资料进行侵蚀基准面下降对水系发育与产沙间非线性关系分析尚属空白。因此, 本文力图对该方面进行初步的实验分析。

## 1 实验设计及初始条件

### 1.1 流域地貌模型实验设计

对于流域地貌的物理实验, 有人运用比尺模型加以设计<sup>[34]</sup>, 大多数人采用比拟模型

收稿日期: 2003-01-14; 修订日期: 2003-05-28

基金项目: 国家自然科学基金委员会、水利部联合资助国家自然科学基金重大基金资助项目(59890200)及国家自然科学基金青年基金项目(40201008)

作者简介: 金德生(1940-), 男, 江苏江阴人, 研究员。主要从事流水地貌研究及实验模拟, 发表论文 60 余篇, 编著 4 本。E-mail: jinds@igsnr.ac.cn

设计<sup>[33]</sup>，笔者的设计则运用过程响应方法<sup>[35,36]</sup>。

流域地貌过程响应模型是基于地貌形态取决于作用过程，研究流域水力几何关系、形态物质与能耗率关系的模型，注重流域地貌宏观统计特征与物质能流特征相结合，而不拘泥于具体的形态相似，也不注重具体的微观细节。因此，运用该模型来研究流域物质组成的不同，如何影响水系发育与产沙间非线性关系是颇为合适的。因为自然界水系本身具有自相似性，通过实验流域加以论证，则更可添加非线性分析的色彩。由于流域地貌系统是一个复杂的开放系统，鉴于它的综合性和随机性，因此可以采用过程响应系统的相似性来描述原模型流域地貌系统的相似程度。具体体现在：1) 流域地貌形态的统计特征相似；2) 模型流域的物质组成结构比例相似或相同；3) 相对演变速率相似或相近；4) 消能方式及消能率相近或相似，以及 5) 因果关系一致或“异构同功”<sup>[37]</sup>。

### 1.2 实验设备及初始条件

本实验旨在探讨物质组成对流域地貌水系发育影响问题，在给定雨强条件下，塑造三种物质组成的初始流域地貌形态模型，观察水系发育过程、流域地貌演变、产流产沙过程等。实验给定平均雨强约  $35.56\text{mm/hr}\cdot\text{cm}^2$ ，相当于一般性中等侵蚀产流降雨强度，均匀系数为 0.87，降雨由动压式高压泵供给水源，由压力控制器稳压，降雨器由按六边形法则布设的七个喷头组成，降雨器中心与流域中心之间的空高为 5.50m，人工降雨点系下喷方式。

实验流域水槽宽 8m，中线长 11.3m，两侧长 8m，流域四周以水泥墙防渗，流域出口布置三角堰（图 1）。堰口最低点高程为 16.25cm，作为实验流域的临时侵蚀基准高程。

三组（I-0、II-0、III-0）的物质组成的中径均为 0.021mm，实验初始条件见表 1。总体而言，模型流域的纵比降中心线大于两侧，横比降两侧对称。除第 I 组外，II-0 及 III-0 自上游向下游有所增大，在第 I 组 I-6 测次及第 II 组 II-6 测次实验末了，待水系发育相对稳定后，流域出口的侵蚀基准面分别下降 7.25cm 和 7.13 cm。

表 1 实验初始条件

Tab. 1 Initial conditions for experiments

测次	起点距 (m)	纵比降	横比降		物质组成		侵蚀基准面 下降值 (cm)	雨强 (mm/hr·cm <sup>2</sup> )
			左	右	中径 (mm)	粉粘粒 (%)		
I-0	0	0.0626	0.0368	0.0380	0.021	92	0.00	35.56
	5							
	9							
	11.3							
II-0	0	0.0711	0.0100	0.0100	0.021	92	7.25	35.56
	5							
	9							
	11.3							
III-0	0	0.0711	0.0100	0.0100	0.021	92	7.13	35.56
	5							
	9							
	11.3							

### 1.3 实验数据采集

实验共三大组，18 小组（I-1~6，II-1~6 及 III-1~6），实验历时共 48 小时，18 个测次。各测次为 2 小时。每测次降雨开始后，观测开始产流时间，降雨结束时观测断流时间。实验过程中，每间隔 10 分钟采集水量，用容积法计算代表该时段的径流量，同时采集水沙样，用浊度仪及烘干法测得含沙量，计算该时段产沙量。每测次终了凌空拍摄流域地貌及水系平面照片，并按间距 0.5m 的网络，辅以补助点，测量流域地面高程、沟道起点及平面位置。结合凌空拍摄的照片，调绘流域地形等高线及水系平面分布图，运用 Strahler 河道级别划分方法对沟道水系级别作了处理<sup>[38]</sup>，在水系分布图上，获取有关分析资料。

## 2 流域产沙过程实验

### 2.1 背景流域产沙过程特征

I 组为背景流域产沙过程实验。实验历时共 12 小时，分 6 个测次进行（I-1~I-6）。由过程线可知（图 2），每测次均出现产沙峰值，产沙峰值出现的时间随测次的推进而提前，而峰值逐次降低。总体而言，除个别测次（I-2）外，往往出现幅度不大的双峰，甚至出现多峰值，显示了产沙过程的随机性和复杂性特征。不过，点绘稳渗产流后的产沙量与实验历时（图 3），并用负指数曲线加以拟合，可表达为以下关系式：

$$Q_{s-1} = 8.586 \exp^{-0.003T}$$

式中， $Q_{s-1}$  为产沙量，以 kg/10min 计，T 为时间，以分钟计。

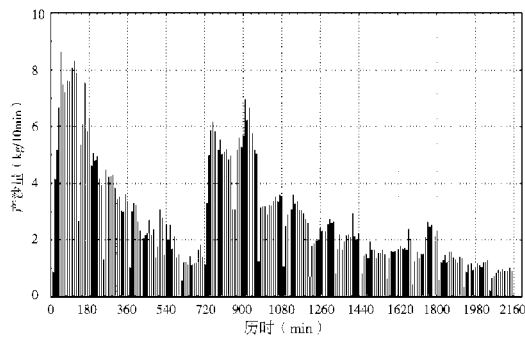


图 2 流域产沙过程图  
Fig. 2 Sediment yield processes of model drainage

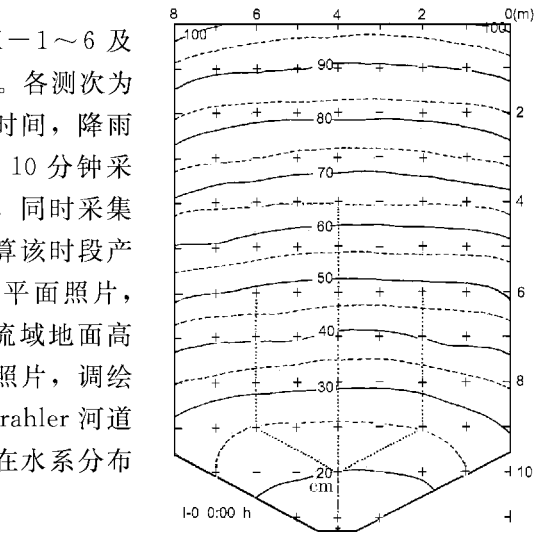


图 1 实验流域平面形态  
Fig. 1 Platform of model drainage basin

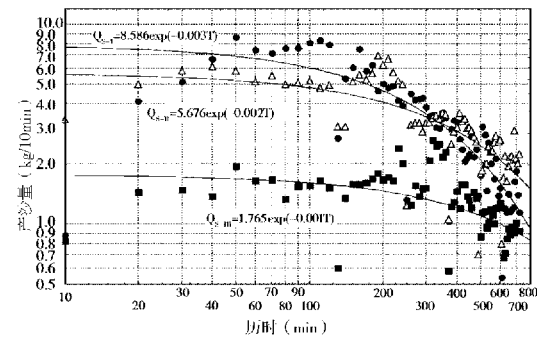


图 3 基面下降后流域产沙过程与背景流域产沙过程比较  
Fig. 3 Comparing sediment yield processes of base level lowering with background drainage development

## 2.2 侵蚀基准面第一次下降后流域产沙过程特征

实验 II 组流域为在实验 I 组流域实验基础上, 侵蚀基面下降 7.25cm 后, 实验流域的产沙过程。也进行 12 小时 6 个测次 (II-1~II-6), 每测次历时为 2 小时。由产沙过程线 (图 2) 不难看出, 大体可划分两个时段, 头 2 个小时中 (II-1~II-2 测次), 产沙量有大幅度增加, 出现明显的双峰夹一谷, 在 II-1 测次出现全过程的次高产沙峰值, 而 II-2 测次出现全过程的最大高产沙峰值, 两峰之间为高出 II-3~II-6 测次产沙谷值。自 II-3 测次以后, 产沙量明显降低, 到 II-6 测次, 产沙量逐渐趋向稳定, 其产沙率已几乎和 I-6 测次末了相当。显然, 当基面下降后, 流域产沙出现复杂的响应过程, 该过程具有先增高, 而后略有减低, 再增高达最大值, 进而很快降低趋向稳定值。

稳渗产流后的产沙量与实验历时可用下列方程拟合 (图 3):

$$Q_{s-II} = 5.676 \exp^{-0.002T}$$

式中,  $Q_{s-II}$  为产沙量, 以 kg/10min 计,  $T$  为实验历时, 以分钟计。

## 2.3 侵蚀基准面第二次下降后流域产沙过程特征

第 III 组流域实验是在实验 II 组流域实验基础上, 侵蚀基准面再下降 7.13cm 后, 实验流域的产沙过程。进行 12 小时 6 个测次 (III-1~III-6) 实验, 每测次历时同样为 2 小时。由产沙过程线 (图 2) 看出, 也大体可划分两个时段, 头 3 个小时中的第一个时段的第 1 个测次, 即 III-1 测次的 120 分钟内, 于 50 分钟时出现产沙的小高峰, 而后产沙量略有降低; 在 III-2~III-3 测次, 产沙量先是不断增大, 到 320 分钟时达到全过程的最大值, 而后迅速下降。在后三个测次 (III-4~III-6) 的第二个时段内, 每一测次均有不明显的峰、谷值变化, 产沙量总体平稳降低。当侵蚀基准面再次下降后, 实验流域的产沙过程也具有类似特征, 先是两峰夹一谷, 而后迅速趋向稳定值。显然, 第二次侵蚀基准面下降, 同样使实验流域的产沙出现复杂响应过程。

稳渗产流后的产沙量随时间变化亦可以用下列表达式拟合, 且呈现图 3 的负指数曲线形式:

$$Q_{s-III} = 1.765 \exp^{-0.001T}$$

式中,  $Q_{s-III}$  为以 kg/10min 计的产沙量,  $T$  为实验历时, 以分钟计。

## 2.4 产沙过程曲线对比分析

三组不同的流域产沙过程具有一个共同特征, 产沙量以不同的速率, 随着时间的推进而衰减, 产沙过程峰谷起伏, 峰谷值亦随时间衰减。总体而言, 背景流域具有产沙量的最大值 (大于 8kg/10min) 和 1kg/10min 左右的稳定值; 当两次基面下降时, 开始都分别出现 6.5kg/10min 及 1.5kg/10min 的较大及次大的产沙值, 紧接着的是两峰夹一谷, 而后迅速趋向稳定值的复杂响应产沙过程, 且稳定值也为 1kg/10min 左右。

两次基面下降所造成的产沙的复杂响应过程又具有差异性。首先, 各曲线在表示产沙量的纵坐标轴上有不同的截距。背景流域有最大的截距, 即有最大的起始稳渗产沙量; 第一次基面下降后, 流域响应的产沙过程曲线具有较小的截距, 即较小的起始稳渗产沙量; 第二次基面下降后, 流域响应的产沙过程曲线具有更小的截距, 也就是具有更小的起始稳渗产沙量。其次, 两次基面下降后, 尽管流域响应的产沙过程曲线具有小的起始稳渗产沙量, 但两者差值不大。第三, 基面下降后, 流域产沙过程的复杂响应强度与幅度有所不同, 第一次基面下降后引起的大于第二次; 其最大产沙量, 第一次的大于第二次, 分别为

7.0 kg/10min 和 2.7kg/min, 分别约为背景流域末了的 7 倍和 3 倍。最后, 第一次下降引起的产沙过程复杂响应来得快, 产沙量随时间的衰减率相对较慢; 而第二次下降引起的产沙过程复杂响应来得较慢, 但产沙量随时间的衰减率相对较快。

### 3 流域水系发育过程实验分析

#### 3.1 水系发育的量度

##### 3.1.1 水系空间发育特征及分形维数量计

习惯上, 人们运用河数定律及河长定律等来描述流域水系中不同级别河道的数目及平均长度与河道级别关系, 揭示流域水系的分布特征; 或用随机拓扑方法, 揭示水系发育的拓扑几何特征。不论怎样它们只能反映流域发育的空间分布的平均状况, 很难反映流域系统受外界因素, 例如气候变迁、构造运动、基面变化以及人为作用影响下, 水系发育演化的时序特征, 也不易描述不同级别河道之间的递变规律。水系分形维数的分析有望弥补这一不足。王嘉松等<sup>①</sup>根据 Horton 的河数定律表达式  $N_u = K_1^{(s-u)}$  以及河长定律表达式  $\bar{l}_u = \bar{l}_1 K_2^{(u-1)}$  中系数  $K_1$  及  $K_2$ , 经推导得水系分形维数( $D$ )定义为:

$$D = \ln K_1 / \ln K_2$$

由河数定律

$$\ln N_u = s \ln K_1 - u \ln K_1$$

令

$$a_1 = s \ln K_1 \quad \text{及} \quad b_1 = -\ln K_1$$

则

$$\ln N_u = a_1 + b_1 u$$

令

$$a_2 = -\ln K_2 \quad \text{及} \quad b_2 = -\ln K_2$$

则

$$\ln(l_u/l_1) = a_2 + b_2 u$$

显然, 由实测原型水系或模型水系各级河道或沟道的数目及平均长度, 通过回归计算, 可以很方便地获得  $\ln K_1 = -b_1$  及  $\ln K_2 = b_2$  并相应计算出分形维数  $D$ , 本文计算了模型水系及部分沟道的分形维数, 以此进行模型水系发育的分形研究。

##### 3.1.2 水系分形维数的物理意义

流水地貌系统中分形的物理意义及水系分形维数的意义有人作过阐述<sup>[39~41]</sup>。他们认为: 其意义是 1) 可以模拟流域水系的形态, 2) 研究河长与流域面积关系及 3) 探讨流域水力学与流域尺度相关问题等。笔者认为, 如果按照王嘉松等人获得的河网分维值  $D = b_1/b_2$ , 其中  $b_1$  反映某一级河道数目的增长速率, 而  $b_2$  表示某一级别河道长度的增长速率。后者反映增长过程, 河道发生弯曲, 比降变缓, 是能量趋向最小消耗的一种形式; 而河道数目的增多, 也是能量趋向最小消耗的另一形式。显然, 分形维数  $D$  值, 一方面表示不同级别河道数目与长度的相对增长率; 另一方面, 又是水系消能率的一种量度。水系发育过程中,  $D$  值的变化是水系发育时序过程的量度<sup>[33]</sup>。一个相对稳定的流域系统在外界因素影响下, 输入的能量必然会发生变化, 也会改变水系分形维数  $D$  值。

#### 3.2 实验流域水系的几何特征

三组实验流域水系不同级别河道的数目及平均长度极值(表 2)及每组中代表性的水系发育状况(图 4)分析表明: 无论是背景实验流域, 还是流域受侵蚀基面下降影响后, 在它们的发育过程中, 河道级别越低的河道数目越多, 其变化范围越大; 河道级别越高的

① 王嘉松, 王长宁. 计算河网分维的一种方法. 南京大学数学系, 1990.

河道数目越少，变化范围越小。而不同级别河道的平均长度，当河道级别越低，河道平均长度越短，其变动范围越小；相反，河道级别越高，河道平均长度越长，且变化范围越大。与自然界的流域发育相比，情况十分类似；所不同的是，由于模型边界出口条件限制，V级河道的长度反而较短。

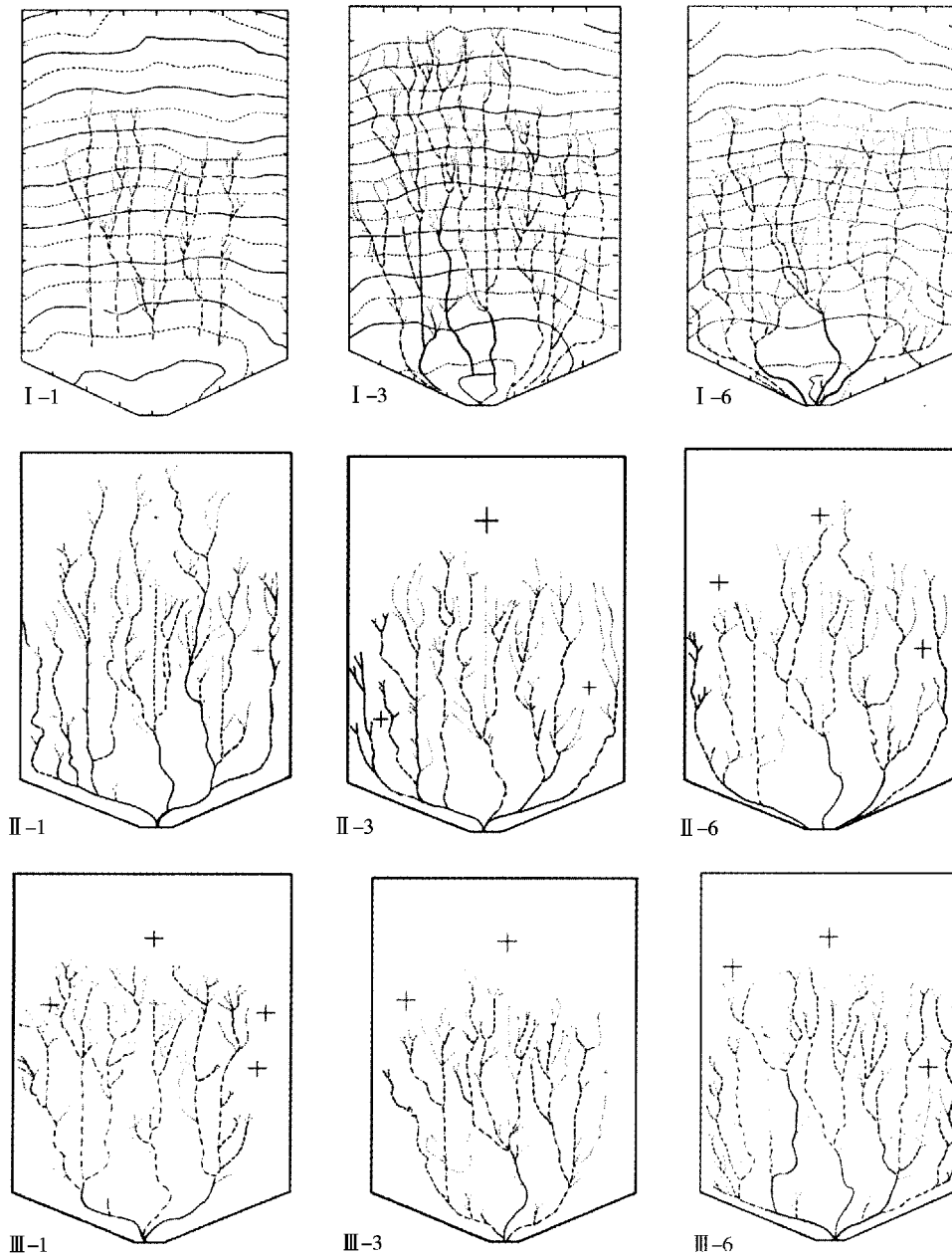


图 4 背景流域及基面下降影响下流域的典型水系发育图

Fig. 4 Sketches of typical drainage network system development in model

表 2 实验流域水系各级河道数目及平均长度值

Tab. 2 Number and average length of channel for each grade in model drainage systems

河道级别 测次	I		II		III		IV		V	
	$N_1$	$\bar{l}_1$	$N_2$	$\bar{l}_2$	$N_3$	$\bar{l}_3$	$N_4$	$\bar{l}_4$	$N_5$	$\bar{l}_5$
I	62~166	37.7~64.5	14~41	93.4~168.2	5~10	306.0~516.8	3	180.3~416.7	2	95.0
II	64~112	41.7~61.8	12~24	134.1~236.6	5~8	186.0~479.3	2~3	270.0~555.5	1	135.0
III	88~109	44.9~61.9	19~29	88.6~161.2	5~8	163.0~552.0	1~3	262.0~620.0		

注:  $N_i$ —河道数目,  $l_i$ —河道平均长度 (cm)

进一步分析表明,在背景流域的水系演变过程中, I、II、III 级河道的发育,河道数目先是比较少,发展到 I—3 测次,即 360 分钟时达到最大值,随后,河道数目复又减少,IV 级以上河道数目相对稳定而数目较少。河道平均长度的变化过程的情况也大体相似,开始时,各级河道具有较短的平均长度,而后逐渐达最大的平均长度,最后各级河道的平均长度又缩短。不过,各级河道达到最大平均长度所需要的发育时间是不尽相同的,除 II 级河道外,河道级别越低,所需要的发育时间较长;相反,河道级别越高,所需要的发育时间较短。

受基面第一次下降影响后,流域水系的河道级别及数目显著增多,使本来已发育成由三级别河道组成的流域系统突然成为由五个级别河道组成的流域系统,河道级别由三个级别突变为五个级别,河道的数目由 124 条增加到 138 条,河网密度增大了 11.3%;河道平均长度的发育不同于背景流域,尤其以 IV 级河道最为突出,当基面开始下降时,IV 级河道迅速伸长,达最大值后,复又缩短,其延伸的速率和幅度较之 III 级河道来得快;至于 V 级河道惟一在 II—1 测次,即基面下降后的头 120 分钟内出现,随后便不复存在(图 5),这或许与流域水系的主干河道在靠近模型出口处,发育空间受限制有关。

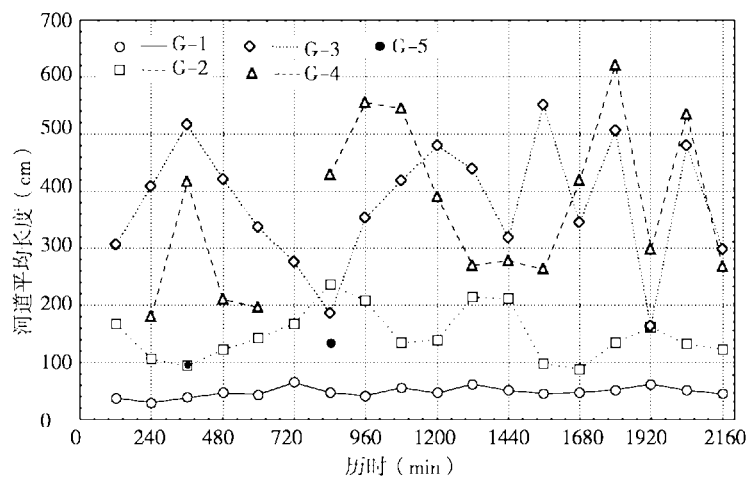


图 5 背景流域及基面下降影响下不同级别河道平均长度随时间变化

Fig. 5 Change of average channel length for Run 1, 2 and 3 with time

在基面第二次下降时,流域水系的河道级别没有改变,但河道的数目明显增加,由 113 条增加到 142 条,河网密度增大了 25.7%。所不同的是,III 级河道很快延伸达最大值

后，其平均长度时短时长，总趋势是缩短；而Ⅳ级河道达到最大长度则较迟，在达到最大长度后，与Ⅲ级河道的发育状况亦步亦趋。这与第一次基面下降后，流域水系的发育状况颇为相似。

### 3.3 水系发育的非线性特征

由三组流域水系的分形维数  $D$  值分析可知，随着时间的推移，各组水系的  $D$  值均具有最低值，他们随着时间的推移往往呈不对称的下凹型双曲线。在背景流域水系发育之初，具有中等大小的  $D$  值，发育一定时间以后，出现最小的  $D$  值，在水系发育后期，具有最大的  $D$  值（图 6），其差值范围为不到 1.5。由图 6 所示，总的来说，当流域受基面下降影响后，流域水系发育过程初、中、晚期的分形维数  $D$  值与背景流域水系发育过程同期的分形维数相对增大。当基面第一次下降时，水系分形维数 1.6~2.2；基面第二次下降后，水系分形维数 1.5~2.5。显然，分形维数的增量随着基面下降次数增加而有所变大。事实上，这正是流域能量消耗率随基面下降量增大而变大，而随着时间推移能量消耗率变小的一种反映。

### 3.4 侵蚀产沙与水系发育间非线性关系

我们曾对均质流域及不同物质组成流域中的水系发育与侵蚀产沙非线性关系进行过初步分析，认为它们均会影响水系的分形维数<sup>[31,32]</sup>。点绘背景流域及基面下降影响下流域侵蚀产沙模数与分形维数值  $D$  间关系曲线表明，两者间存在显著的非线性关系，具体表现在流域发育的不同阶段不同的关系。在背景流域发育之初，分形维数随侵蚀产沙模数减小而减小；当越过水系分形维数的临界最小值时，亦即中期阶段以后，分形维数随侵蚀产沙模数的减小而增大。分析表明，水系发育初期阶段， $D$  值随侵蚀模数的递减率绝对值，小于晚期阶段的  $D$  值随侵蚀模数递增率的绝对值（图 7）。当基面下降时，流域的势能相对增大，通过水沙输移运动加以释放，导致出现与背景流域水系类似的发育过程，在基面下降之初，分形维数随侵蚀产沙模数减小而减小；当越过中期阶段水系分形维数临界值，分形维数随侵蚀产沙模数的减小而增大。这种情况，第一次基面下降带来的影响较之第二次基面下降带来的要显著。

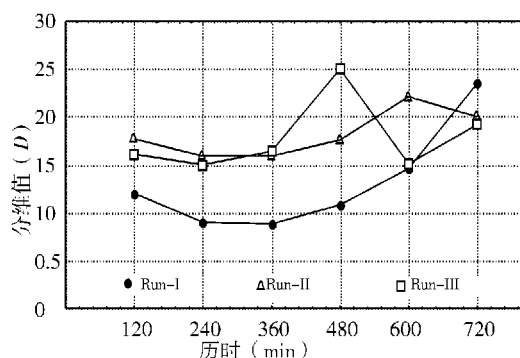


图 6 背景流域及流域受基面下降影响后水系分形维数随时间变化

Fig. 6 Change of fractal value for Run 1, 2 and 3 with time (min)

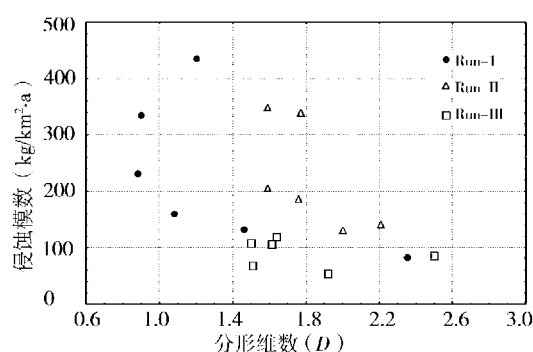


图 7 背景流域及基面下降影响下流域侵蚀模数与分形值间关系

Fig. 7 The relationship between erosion modulus and fractal value for Run 1, 2 and 3



## 4 结果与讨论

流域水系发育、侵蚀产沙及两者间的关系明显受基面下降的影响。但无论是背景实验流域,还是流域受基面下降影响后,在它们的发育过程中,河道级别越低的河道数目越多,其变化范围越大;河道级别越高的河道数目越少,变化范围越小。而不同级别河道的平均长度,当河道级别越低,河道平均长度越短,其变动范围越小;相反,河道级别越高,河道平均长度越长,其变化范围越大。

无论是背景实验流域,还是流域受基面下降影响,水系发育及产沙过程均具有非线性特征。水系分形维数是能耗率的一种量度,因为流域发育过程中,河道数目的增加及河道长度的增长、弯曲、比降变缓是水系达到最小消耗的两种不同形式。流域水系的分形维数  $D$  值,随时间呈不对称上凹型曲线。水系发育中期有最小临界值,这一临界值随下降时间的迟后而变小。

流域侵蚀产沙与水系分形维数间存在显著的非线性特征。在基面下降之初,分形维数随侵蚀产沙模数减小而减小;当越过水系分形维数的临界值,亦即中期阶段以后,分形维数随侵蚀产沙模数的减小而增大。这种情况,第一次基面下降带来的影响比第二次基面下降带来的影响要显著。

上述特征的出现,主要与基面下降导致流域势能的相对增大有关。在流域出口段,即高级河段,通过下切加深河道深度,以及通过溯源侵蚀,延长河道长度达到消耗能量,该情况与背景流域水系发育之初的情况十分相似。由于低级河道或沟道,远离流域出口地段,他们受基面的影响较小或几乎不受影响,以类似于背景流域水系发育过程的正常方式演化发育。

### 参考文献:

- [ 1 ] Schumm S A. *The Fluvial System*. Wiley, New York, 1977. 338.
- [ 2 ] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1945, **56**:275~370.
- [ 3 ] Leopold L B, Langbein W B. The concept of energy in landscape evolution. *U. S. Geol. Survey, Prof. Paper*. 1962, 500~A:20.
- [ 4 ] Langbein W B, Leopold L B. Quasi-equilibrium state in channel morphology. *Amer. J. Sci.*, 1964, **262**: 782~794.
- [ 5 ] Shreve R L. Statistical law of stream numbers. *J. Geol.*, 1966, **74**: 17~37.
- [ 6 ] Shreve R L. Infinite topologically random channel networks. *J. Geol.*, 1967, **75**:179~186.
- [ 7 ] Shreve R L. Stream length and basin areas in topologically random channel networks. *J. Geol.*, 1969, **77**:397~414.
- [ 8 ] Smart J S. Topological properties of channel networks. *Geol., Soc. Amer. Bull.*, 1969, **80**:757~774.
- [ 9 ] Smart J S. The random model in fluvial geomorphology. In: *Fluvial Geomorphology*, ed. by Marie Morisawa, *Publications in Geomorphology*, State University of New York, Binghamton, New York, 13901, 1973, 314.
- [ 10 ] Scheidegger A E. Random graph patterns of drainage basins. *Inter. Assoc. Sci. Hydro. Pub.*, 1967, **76**: 415~425.
- [ 11 ] Scheidegger A E. A stochastic model for drainage patterns into an intramontane trench. *Bulletin. Intern. Assoc. Science. Hydro.*, 1967, **12**:636~638.
- [ 12 ] La Barbera P, Rosso R. On the fractal dimension of stream networks. *Water Resources Research*, 1989, **25**(4): 735~741.

- [13] Gupta V K, Waymire E. Statistical self-similarity in river networks parameterized by elevation. *Water Resources Research*, 1989, **25**(3): 463~476.
- [14] Robert A, Roy A G. On the fractal interpretation of the mainstream length drainage area relationship. *Water Resources Research*, 1990, **26**(5): 839~842.
- [15] Mesa O J, Gupta V K. On the main channel length-area for channel networks. *Water Resource Research*, 1987, **23**(11): 2119~2122.
- [16] Ross R, Bachi B, Barbera P La. Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks. *Water Resource Research*, 1991, **27**(3): 381~387.
- [17] Tanzhou Luo. Fractal structure and properties of stream networks. *Water Resource Research*, 1992, **28**(110): 2981~2988.
- [18] Nikora V I. Fractal structures of river plan forms. *Water Resources Research*, 1991, **27**(6): 1327~1333.
- [19] 冯平, 冯焱. 河流形态特征的分维计算方法. *地理学报*, 1997, **52**(4): 324~330.
- [20] 金德生, 陈浩, 郭庆伍. 河流纵剖面分形—非线性形态特征. *地理学报*, 1997, **52**(2): 154~161.
- [21] Tarboton D G, Bras R L, Rodriguez-iturbe I A. Physical basis for drainage density. *Geomorphology*, 1992, **5**(1-2): 59~76.
- [22] 李后强, 艾南山. 分形地貌学及地貌发育的分形模型. *自然杂志*, 1992, **15**(7): 516~518.
- [23] 傅军, 丁晶, 邓育仁. 嘉陵江流域形态及流量过程分维研究. *成都科技大学学报*, 1995, (1): 1~9.
- [24] 陈树群, 钱沧海, 冯智伟. 台湾地区河川型态之碎形维度. *中国台北: 中国土木水利工程学刊*, 1995, **7**(1): 63~72.
- [25] 魏一鸣, 金菊良, 周成虎, 等. 1949—1994 年中国洪水灾害成灾面积的时序分形特征. *自然灾害学报*, 1998, **7**(1): 83~86.
- [26] 冯金良, 张稳. 滦河现代三角洲演变的几何学特征. *黄渤海海洋*, 1997, **15**(3): 22~25.
- [27] 冯金良, 张稳. 海滦河流域水系分形. *泥沙研究*, 1999, (1): 62~65.
- [28] Feng Jinliang, Zhange Wen. The evolution of the modern Luan-He River delta, north China. *Geomorphology*, 1999, **25**(3,4): 269~278.
- [29] 汪富泉. 泥沙运动及河床演变的分形特征与自组织规律研究. 四川大学博士学位论文, 1999. 106.
- [30] Roger Mousa. Is the drainage network a fractal Sierpinski space? *Water Resources Research*, 1997, **33**(10): 2399~2408.
- [31] Jin Desheng, Chen Hao, Guo Qingwu. A preliminary experimental study on non-linear relation of sediment yield to drainage network development. *International Journal of Sediment Research*, 1999, **14**(2): 9~18.
- [32] Jin Desheng, Chen Hao, Guo Qingwu. Material component to non-linear relation between sediment yield and drainage network development; a flume experimental study. *Journal of Geographical Sciences*, 2001, **11**(3): 271~381.
- [33] Schumm S A, Mosley M P, Weaver W E. *Experimental Fluvial Geomorphology*. John Wiley and Sons, 1987. 413.
- [34] Strahler A N. Dimensional analysis applied to fluvial eroded landforms. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1958, **69**: 279~300.
- [35] 金德生, 刘书楼, 郭庆伍. 应用河流地貌实验与模拟研究. 北京: 地震出版社, 1992. 98.
- [36] 金德生, 郭庆伍. 均质流域地貌发育过程实验研究. 金德生主编. 地貌实验与模拟. 北京: 地震出版社, 1995. 79~101.
- [37] 金德生, 郭庆伍. 流水地貌系统模型实验的相似性问题. 金德生主编, 地貌实验与模拟. 北京: 地震出版社, 1995. 265~268.
- [38] Strahler A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Am. Geography. Union Trans.*, 1957, **38**: 913~920.
- [39] 张捷, 包浩生. 分形理论及其在地貌学中的应用. *地理研究*, 1994, **13**(3): 104~111.
- [40] 何隆华, 赵宏. 水系的分形维数及其意义. *地理科学*, 1996, **16**(2): 124~128.
- [41] La Barbera P, Rosso R. On the fractal dimension of stream networks. *Water Resources Research*, 1989, **25**(4): 735~741.

## Influence of base level lowering on sediment yield and drainage network development: an experimental analysis

JIN De-sheng, ZHANG Ou-yang, CHEN Hao, GUO Qing-wu

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** In this paper an experimental study on influence of base level lowering on non-linear relationship between sediment yield and drainage network development has been completed in the Lab of Fluvial Geomorphology in the Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences. The area of flume drainage system is  $81.2 \text{ m}^2$ , the longitudinal gradient and cross section slope are from 0.0348 to 0.0775 and from 0.0115 to 0.038, respectively. Three experiments are a background drainage development (Run I) and drainage developments influenced by the first (Run II) and second (Run III) base level lowering, respectively. They are covered by the same model materials with a medium diameter of 0.021 mm. At the beginning of each experiment the (shaped small network is dug in the flume, an artificial rainfall equipment is a sprinkler-system composed of 7 downward nozzles, distributed by hexagon type and a given rainfall intensity is  $35.56 \text{ mm/hr. cm}^2$ . Three experiments are designed by process-response principle. Running time span for each experiment is 720 minutes.

The background experiment shows that the sediment yield process is characterized by delaying with a vibration. During network development the energy of a drainage system is dissipated by two ways, of which one is to increase the numbers of channels (rill and gully), and the other one is to enlarge the channel length. As the first base level lowering occurs the channel at the model drainage outlet is down cut and enlarged and the sediment yield process appears a complex response with double peaks at first and then decreases. When the second base level lowering occurs the phenomena was duplicated, but the influence of the second base level lowering on intensity and amplitude is smaller than that of the first base level lowering.

The fractal dimension of a drainage network is exactly an index of energy dissipation of a drainage morphological system. Change of this index with time is an unsymmetrical concave curve. Comparative result of the three experiments explains that the influence of base level lowering is reducing with the elapse of time and far away from the outlet of model drainage basin.

**Key words:** base level lowering; network development; sediment yield; nonlinear relation; experimental analysis