

# 长江上游川中紫色土丘陵区小流域 泥沙输移比空间尺度效应研究

高旭彪<sup>1</sup>, 孙厚才<sup>2</sup>, 赵永军<sup>1</sup>, 高照良<sup>3</sup>

(1. 水利部 水土保持监测中心, 北京 100053; 2. 长江科学院 水土保持研究所, 湖北 武汉 430010;

3. 西北农林科技大学 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 应用分形理论空间尺度效应原理, 采用<sup>137</sup>Cs 同位素示踪法测定小流域多年平均侵蚀模数和调查紫色土丘陵区不同小流域多年平均淤积模数的方法, 探讨了泥沙输移比与小流域集雨面积的关系, 得出了长江上游川中紫色土丘陵区小流域泥沙输移比空间尺度效应泥沙输移比(SDR)统计模型。经验证, 该模型可用于估算紫色土丘陵区资料短缺小流域的输移比和产沙量。

**关键词:** 分形理论; 紫色土; 自相似原理; 输移比

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)06-0130-04

中图分类号: S157

## Sediment Delivery Ratio and Spatial Scale Effect of Small Watershed in the Hilly Area of Central Sichuan Province

GAO Xu-biao<sup>1</sup>, SUN Hou-cai<sup>2</sup>, ZHAO Yong-jun<sup>1</sup>, GAO Zhao-liang<sup>3</sup>

(1. Monitoring Centre of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China;

2. Yangtze River Scientific Institute, Wuhan, Hubei 430010, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Northwest A & University, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** According to the basic principles of fractal theory and spatial scale effect, Cesium-137 isotope tracer technique was used to measure annually averaged soil erosion modulus of small watershed in the hilly area with purple soil in Central Sichuan Province. Moreover, annually averaged deposition modulus of different small watersheds was investigated. The relation of sediment delivery ratio to rainwater collection area of small watershed was discussed. The statistical model of the relation between sediment delivery ratio and spatial scale effect of small watershed was constructed. The model can be used to estimate sediment delivery ratio and sediment yield of small data-lacked watershed in the hilly area with purple soil.

**Keywords:** fractal theory; purple soil; self-similar principle; sediment delivery ratio

长江上游川中紫色土丘陵区地理位置为经度 107.97°, 纬度 31.75°, 是三峡库区的主要产沙源之一。该区有不少县(市)被国务院列为水土流失重点治理县(市)。在以小流域为单元的水土流失治理工作中, 小流域治理的规划设计及治理后减沙效益的评价均需要对小流域的地面侵蚀量、泥沙输移量进行定量评价和预报。通常小流域的输沙量通过水文泥沙测站监测资料获得, 但由于种种原因, 在许多地区没有水文泥沙测站。利用长江流域的地形资料, 应用分

形理论的自相似原理, 探讨泥沙输移比与小流域集雨面积的关系, 可获得泥沙输移比统计模型。分形理论<sup>[1]</sup>的主要内容是研究一些具有自相似性(self-similar)的不规则现象, 自相似性是指局部与整体在形态、功能和信息方面具有统计意义上的相似性, 自相似性在自然界中也是到处存在的, 如地表的起伏、海岸线的弯曲、水系的结构等<sup>[2]</sup>。分形理论创始于 20 世纪 70 年代初期, 其发展大致经历了 3 个阶段: 第 1 阶段是从 1967—1981 年, 即分形的产生和起步阶段;

收稿日期: 2007-05-20 修回日期: 2007-10-08

资助项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-444); 西北农林科技大学拔尖人才支持计划项目和自然科学基金项目(50779063)资助

作者简介: 高旭彪(1961—), 男(汉族), 山西省临县人, 高级工程师, 多年从事土壤侵蚀、水土流失防治技术研究和开发建设项目水土保持技术管理工作。E-mail: gaouxubiao@126.com。

从 1981—1987 年为分形发展的第 2 阶段,大批的数学、物理、化学、生物、材料科学和地质等学科的学者们都进入了“分形”研究领域,新颖的分形概念与传统科学的结合促进了整个学科领域的发展,同时也促进了“分形”自身的发展;从 1988 年至今,“分形”进入了第 3 个发展阶段,在这段时间里,分形应用到了小流域地面侵蚀量的研究<sup>[3]</sup>。本文采用分形理论来分析和定量评价长江上游川中紫色土丘陵区小流域泥沙输移比空间尺度效应,得出该区小流域泥沙输移比空间尺度效应统计模型,该模型可用于估算紫色土丘陵区资料短缺小流域的输移比和产沙量。

## 1 研究材料与方法

### 1.1 研究区概况

川中紫色土丘陵区地处亚热带季风性湿润气候区,年降水量大于 1 000 mm,是长江上游的强侵蚀区,该区出露的地层主要为中生界侏罗系中上统的紫红色泥岩和砂岩,其中遂宁组岩层出露齐全,占全区面积的绝大部分,区内地质构造简单,岩层近水平向展布,泥岩和砂岩呈不等厚互层,紫色泥岩风化成土即为紫色土,其中以遂宁组泥岩残积母质发育的紫色土侵蚀最为严重。该区为浅丘宽谷的丘陵地貌,地形起伏和缓,区内流域为典型的农业流域,以坡耕地和荒草坡为主,土壤侵蚀类型主要为面蚀,因此,可以采用<sup>137</sup>Cs 同位素示踪法测定小流域地面侵蚀多年平均侵蚀模数。

### 1.2 研究材料与方法

研究区多年平均侵蚀模数测定试验取样点属遂宁土质,共取坡耕地剖面样 3 组、荒草坡 3 组,背景值 1 组,取样时以薄壁钢筒取土器垂直坡面打入土层,取土深度 15~20 cm,取出后柱状样每隔 5 cm 分层测试<sup>137</sup>Cs 浓度并进行颗粒分析。将试验数据代入式

(1)可计算出各样点的多年平均侵蚀模数<sup>[5]</sup>,测试结果及多年平均侵蚀模数

$$\bar{M} = \frac{A_t(A_{t_0} - A_t)}{A_{t_0} \cdot C_0 \cdot t} \times 1000 \quad (1)$$

式中: $\bar{M}$ ——坡面取样点多年平均侵蚀模数(t/km<sup>2</sup>·a); $A_t$ ——取样时样点土壤剖面<sup>137</sup>Cs 剩余含量(Bq/m<sup>2</sup>); $C_0$ ——样点土壤表层<sup>137</sup>Cs 浓度(Bq/kg); $A_{t_0}$ ——测区<sup>137</sup>Cs 背景值(Bq/m<sup>2</sup>); $t$ ——取样时间与<sup>137</sup>Cs 降落的峰值年相距年数(a)。

研究区泥沙淤积模数是根据紫色土丘陵区小流域库塘淤积调查数据,将不同小流域的多年平均淤积模数视为各自的多年平均输沙模数 $\bar{Y}$ [t/(km<sup>2</sup>·a)],并将不同流域面积的输沙模数 $\bar{Y}$ 与单元小流域的年平均侵蚀模数 $\bar{Q}$ 之比定义为各自的输移比。

## 2 结果与分析

小流域泥沙输移比反映了流域内泥沙的输移程度,是连接流域地面侵蚀与河流输沙的纽带,因而泥沙输移比的求取是流域产沙量计算或用实测资料估算地面侵蚀量中的关键问题之一。目前,在我国求取小流域泥沙输移比的最大困难在于缺乏计算总侵蚀量的适用公式<sup>[4]</sup>,其次对于紫色土丘陵区大多数小流域而言,由于未设泥沙测站,因而缺乏小流域输沙量数据。

本文根据紫色土丘陵区的实际情况,采用<sup>137</sup>Cs 同位素示踪法测定小流域地面侵蚀多年平均侵蚀模数,利用单元小流域作为泥沙的产源地,而将该区域不同集雨面积的库塘淤积模数视为各自的输沙模数,由此求取该地区小流域泥沙输移比。

### 2.1 研究区多年平均侵蚀模数

由公式(1)计算出各样点的多年平均侵蚀模数如表 1 所示。

表 1 样点<sup>137</sup>Cs 实测计算值

样号	坡耕地 1	坡耕地 2	坡耕地 3	荒草地 1	荒草地 2	荒草地 3
坡度	5°	15°	25°	34°	46°	<10°
占同类比率/%	33	32	35	—	—	—
$A_t/(Bq \cdot m^{-2})$	254.57	224.66	150.12	172.95	348.48	375.39
$C_0/(Bq \cdot kg^{-1})$	1.87	1.32	0.62	1.44	2.02	3.22
$Q/(t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1})$	4 323.80	5 484.70	8 083.10	3 969.60	5 227.70	3 484.10

注:①试验区的<sup>137</sup>Cs 背景值为 2 300 Bq/m<sup>2</sup>, $t=28$  a。②坡耕地所占侵蚀权重为 88%,荒草地所占侵蚀权重为 12%。

荒草坡除丘顶外,坡度均很陡,实际当中很难划分出其坡度分区和比例,故取 3 个样点的侵蚀模数的平均值  $4\ 277.1\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  作为该地的多年平均侵蚀模数。根据表 1 结果和研究区坡度分布情况,用面积加权法计算出该区小流域坡耕地多年平均侵蚀模数为  $5\ 803(\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

## 2.2 研究区泥沙淤积模数

表 2 是紫色土丘陵区小流域面积及库塘淤积调查数据,根据前面所述方法计算小流域的输移比结果如表 2 所示。

一般认为,输移比受流域面积、地质地貌、土壤特性、土地利用和水土保持措施等多种因素影响,因而

使得流域的侵蚀—泥沙输移系统显得较为复杂。但对川中紫色土丘陵区的小流域而言,由于它们的地形地貌、土壤特性相同、土地利用、土壤侵蚀类型及分布、水土保持措施等大体相同,因而输移比主要受流域面积影响,事实上流域面积不仅代表了流域的许多水文因素,而且本身与其它形态参数如流域河网密度、平均坡度等有关。国内外的研究也表明,在同一岩性、地形地貌的地区,流域面积是输移比的最主要变量。如 Robinson<sup>[9]</sup> 统计出流域的输移比与流域面积的 0.2 次幂成反比;余剑如、史立人<sup>[10]</sup> 也认为长江上游一般存在着随流域面积增大输移比逐渐减少的趋势。

表 2 紫色土丘陵区小流域输沙模数及输移比

流域面积 $A/\text{km}^2$	输沙模数 $\bar{Y}/$ $(\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	输移比 $R_{SD}$	流域面积 $A/\text{km}^2$	多年平均输沙模数 $\bar{Y}/(\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	输移比 $R_{SD}$
0.010	5 815	1.00	0.98	3 857	0.66
0.016	5 552	0.96	1.20	3 113	0.54
0.017	5 044	0.87	1.20	3 379	0.58
0.020	5 600	0.97	1.50	1 945	0.34
0.020	5 930	1.02	3.00	2 872	0.49
0.027	4 455	0.77	3.20	2 579	0.44
0.030	4 760	0.82	6.70	2 238	0.39
0.030	4 396	0.76	22.90	1 784	0.31
0.033	4 834	0.83	32.50	1 730	0.30
0.040	4 150	0.72	33.20	1 318	0.23
0.120	4 041	0.70	35.50	1 406	0.24

注: ①库塘淤积统计年限最短系列大于 15 a; ②输沙模数即淤积模数按淤积总量除以流域面积并除以相应的淤积年数; ③库塘淤积资料来源于四川省水保办<sup>[6]</sup>,南充县水保办<sup>[7]</sup>,蓬溪县水保办<sup>[8]</sup>。

## 2.3 小流域泥沙输移分形特征

任何流域总是由次一级支流组成,次一级支流又是由更小一级的支流组成,这种层层镶嵌的结构特征对小流域也不例外。将小流域内次一级支流的小流域放大考察时,其几何形态、结构、功能与原流域具有自相似性。例如,一个小流域从地面侵蚀到河流输沙整个过程中泥沙的运行规律与更小一级小流域并无本质差别,只是量上有所不同,即随着观测尺度(如流域面积)的变化其某种功能(如输沙模数或输移比)也同步发生变化。

显然对于一个具体小流域,只研究并求取其出口处的一个输沙模数或一个输移比并不能表征小流域内部结构特征,只有把握了小流域内各种规律的次级

小流域输沙模数或输移比随观测尺度(流域面积)变化而变化的规律时,各个层次的小流域的泥沙输移特性便充分表现出来,这一规律正好可以用分维来定量描述。

将表 2 中小流域的流域面积  $A$  作为观测尺度,其输沙模数  $\bar{Y}_m$  和输移比  $R_{SD}$  作为相应的量度值,将它们分别点在双对数坐标上(如图 1 所示),其关系近似直线关系。将图 1 曲线拟合其分维关系式分别为

$$\bar{Y} = 2\ 859A^{-0.16} \quad R^2 = 0.92 \quad (2)$$

$$R_{SD} = 0.49A^{-0.16} \quad R^2 = 0.92 \quad (3)$$

式中:  $A$ ——小流域集雨面积( $\text{km}^2$ );  $\bar{Y}, R_{SD}$ ——小流域多年平均输沙模数( $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )和输移比。

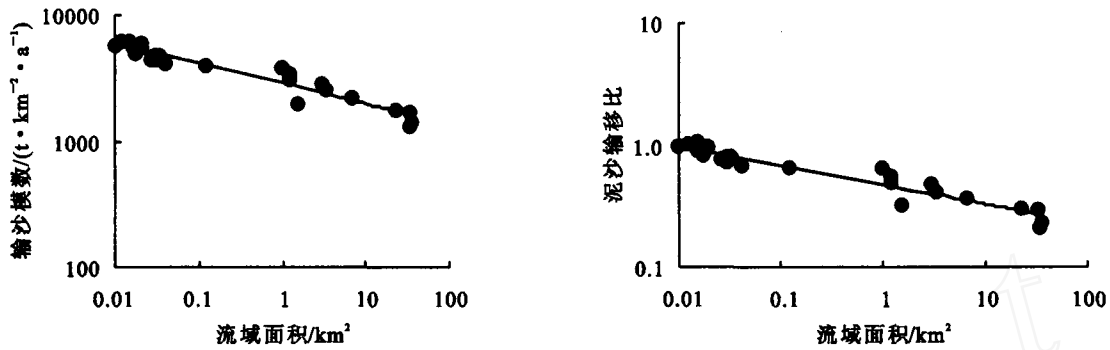


图 1 输移比、输沙模数与流域面积的关系

由此可见,紫色土丘陵区小流域的泥沙输移具有分形特征。其拟合关系式可用于不同规模小流域的 $\bar{Y}$ 和 $R_{SD}$ 值。同时结合具体小流域的河道划分可计算该小流域的产沙量 $\bar{Y}$ 和归槽率 $\eta$ ,计算式如下:

小流域产沙量(多年平均值):  $\bar{Y} = 2859 \sum_{i=1}^n A_i^{0.842}$

小流域泥沙归槽率:  $\eta = 0.49 (\sum_{i=1}^n A_i^{0.842}) / A$

式中:  $A$ ——小流域集雨面积( $\text{km}^2$ );  $A_i$ ——小流域槽床以外的各支流的集雨面积( $\text{km}^2$ );  $n$ ——小流域以外的支流总数。

虽然如此,但上述规律有一定的范围限制,流域规模(即集雨面积)太大时,由于雨量等因素的空间分布不均匀,从而导致自相似性消失。有关研究的资料表明<sup>[9]</sup>,小流域集雨面积大于  $500 \text{ km}^2$  时,降雨空间

分布均匀的假设不能够成立。由此可见,用公式(2)和公式(3)估算 $\bar{Y}$ 和 $R_{SD}$ 时,以流域面积小于  $500 \text{ km}^2$  为宜。

### 3 结果与讨论

泥沙输移比的问题,是流域产沙量计算或用实测输沙资料估算流域地面侵蚀中的关键问题之一,国内外研究者普遍认为泥沙输移比是随流域面积增大而递减的<sup>[4,9-10]</sup>。不少学者针对特定地区的研究,计算了不同规模小流域的泥沙输移比<sup>[4,9]</sup>(表 3)。

本文对这些结果进行了统计分析,结果表明,泥沙输移比与流域面积均呈幂函数的反比关系(表 3),即均符合分形的标准定义,这表明小流域泥沙输移过程确具分形特征。

表 3 不同研究者的研究结果对照

											$\text{km}^2$
Robinson <sup>[6]</sup>	流域面积	0.1	0.5	1.0	5	10	50	100	200	500	$R_{SD} = 0.35A^{-0.211}$
	输移比	0.53	0.39	0.35	0.27	0.24	0.15	0.12	0.11	0.99	
牟金泽 <sup>[5]</sup> (黄土区)	流域面积	0.18	4.26	21.0	807	3893	—	—	—	—	$R_{SD} = 0.95A^{-0.023}$
	输移比	1.00	0.94	0.86	0.80	0.83	—	—	—	—	
本文(紫色 土丘陵区)	流域面积	0.01	0.1	0.5	1.0	5	10	50	100	500	$R_{SD} = 0.47A^{-0.158}$
	输移比	1.00	0.66	0.51	0.47	0.36	0.32	0.25	0.22	0.17	

由此可以构造出通用的小流域泥沙输移比模型

$$R_{SD} = R_{SD1} \times A^{-D}$$

式中:  $R_{SD1}$ ——该岩性区面积为  $1 \text{ km}^2$  的单元小流域的泥沙输移比;其余同前。

$R_{SD1}$ 与小流域侵蚀物质的颗粒级配、坡面特性、耕作措施等有关,可体现泥沙的归槽率,其值越大表明侵蚀产物颗粒越细,坡面拦截泥沙量越少,归槽率越高,反之亦然。如黄土区  $R_{SD1} = 0.95$ 。说明黄土地区小流域泥沙归槽率较高,而紫色土区  $R_{SD1} = 0.47$ ,则表明其泥沙归槽率低的特征。泥沙输移的分维数  $D$  与流域的河道特性、水系组成及水利水保工

程措施等有关<sup>[11]</sup>,可体现泥沙的运移率。 $D$  越大,输移比随流域面积增大而迅速减小,表明河道淤积和水利工程拦沙效益明显。

此外,小流域泥沙输移比及分维数的大小受流域面积、地质地貌、土壤特性、土地利用和水土保持措施等多种因素影响,因而使得流域的侵蚀—泥沙输移系统显得较为复杂。但对川中紫色土丘陵区的小流域而言,由于它们的地形地貌、土壤特性相同、土地利用、土壤侵蚀类型及分布、水土保持措施等大体相同,因而输移比主要受流域面积影响。

(下转第 151 页)

合公路实际的各类报告与表格形式,为公路工程环境及水土保持监理工作的顺利实施提供依据与指导。

### 3.4 管理办法和工作制度的制定

在执行国家环境保护政策、法规的基础上,应根据具体项目的特点、环境影响评价及水土保持方案的内容,制定相应的管理办法和实施细则。环境及水土保持监理的工作制度可参考工程监理的体系制定,主要可包括工作记录制度、报告制度、文件通知制度、环境及水保例会制度。

## 4 公路工程水土保持监理制度实施的主要内容

公路工程水土保持监理的主要内容是在工程建设期严格实施水保方案,包括在项目建设区和直接影响区监理承包商是否按水保设计进行工程弃渣处理,防护,渣场整治和植被恢复;监理在料场、施工区等开挖面进行的各项开挖、回填、爆破、清场等活动所控制的范围及所采取的临时防护措施;监理临时占地的清理及植被恢复工作;监理移民安置区建设对水土流失的影响;监理各项水土保持措施的施工质量等。同时,严格按照工程监理的有关法规,执行“三控两管一协调”,在项目建设阶段执行水土保持三同时制度、投资控制、质量控制、合同管理、信息管理和组织协调。此外,水土保持监理工程师要审核施工单位的水土保持质量体系,审核施工单位的水土保持质量目标和管理体系,审核施工单位的水土保持技术条件和技术力量,审核工程施工组织设计中有关新增的水土流失问题,审核水土保持工程中的材料、设备等的质量,协助

业主处理水土保持工程质量及事故的有关事宜,协助水行政主管部门进行工程竣工验收等<sup>[8]</sup>。

## 5 结语

随着公路建设的飞速发展,公路水土保持及环境监理工作的逐步完善,水土保持监理工作最终会完全融入公路工程监理工作体系之中。实行水土保持监理对保障交通建设项目的顺利进行意义重大,需要在实践中不断摸索,不断改进。水土保持监理制度的实施有利于完善水土保持方面的法律、法规,有利于保证项目区国家和人民生命财产的安全,有利于实现生态环境建设的可持续发展。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 周富春. 山区公路工程建设期水土流失量的预测模式[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(5):27—29.
  - [2] 沈丽. 关于高速公路工程环境监理的思考[J]. 交通标准化, 2004(12):16—18.
  - [3] 聂新跃. 浅析公路工程施工监理[J]. 交通世界, 2006(8):63—64.
  - [4] 王婧. 浅议公路工程监理制的发展与完善[J]. 工程建设与档案, 2005, 19(5):483—484.
  - [5] 卢林果, 曹丽娜. 浅议高速公路环境监理程序及队伍建设问题[J]. 山西建筑, 2006, 32(5):194—195.
  - [6] 邵社刚, 叶慧海. 公路环境监理实施方案的编制[J]. 中国交通建设监理, 2006(5):28—30.
  - [7] 李继超. 公路环境监理试点工作中存在的问题及其运作模式[J]. 交通环保, 2005, 26(1):47—48.
  - [8] 王璞. 试论开发建设项目水土保持工程监理制度的实施[J]. 吉林水利, 2003(1):38—40.
- 
- (上接第133页)
- 通过对比分析认为,小流域泥沙输移过程具有分形特征,采用分形理论空间尺度效应原理,分析观测尺度(流域面积)变化时小流域输沙模数和输移比的变化规律,统计出相应的模型。认为该模型能用于估算资料短缺小流域多年平均输沙模数和输移比。同时说明不同岩性区不同水系中的小流域泥沙输移分维值的差异是客观存在的。
- [ 参 考 文 献 ]
- [1] 汤一波,金忠清. 分形理论在紊流力学中的应用[J]. 河海科技进展, 1992(3):11—13.
  - [2] 陈永宗,景可,蔡强国,等. 黄上高原现代侵蚀与治理[M]. 北京:科学出版社, 1988.
  - [3] 洪时中,洪时明. 地学领域中的分维研究[J]. 大自然探索, 1988(2):33—35.
  - [4] 牟金泽,孟庆枚. 论流域产沙量计算中的泥沙输移比[J]. 泥沙研究, 1982(2):19—22.
  - [5] 李青云,孙厚才,熊官卿,等. 川中紫色土丘陵区小流域地面侵蚀量的确定[C]. 第一届全国环境岩土工程与土工合成材料技术研讨会论文集,浙江大学出版社, 2002:380—384.
  - [6] 四川省水土保持办公室. 四川琼江流域水土流失综合调查报告[R]. 1983.
  - [7] 四川省南充县水保办. 向允县水土保持综合治理规划报告[R]. 1988.
  - [8] 四川省蓬溪县水保办. 蓬溪县水土保持规划报告[R]. 1988.
  - [9] Robinson A R. Sediment Yield as a Function of Upstream Erosion[M]. SSSA Special Publ. 1979.
  - [10] 余剑如,史立人. 长江下游的地面侵蚀与河流泥沙[J]. 水土保持通报, 1991, 11(1):23—26.
  - [11] 刘毅等. 重点产沙区及人类活动对三峡水库来水来沙条件的影响研究报告[R]. 长江委水文测验研究所, 1990.