

黄土高原沟槽侵蚀与泥沙输移监测方法初探

王 飞, 杨勤科, 李 锐, 张晓萍  
(中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘 要: 沟槽是径流与输沙通道和侵蚀主体, 沟槽侵蚀监测对揭示水土流失规律和进行流域产沙模拟有重要意义。在对黄土高原相关研究结果分析的基础上, 对沟槽侵蚀进行了初步确定。同时对与沟槽侵蚀关系密切的泥沙输移比进行了分析, 并总结出沟槽侵蚀与泥沙输移比监测和估算的沟道特征监测法、坡面产沙—出口站泥沙比较法、稀土元素示踪法、坝库泥沙还原法和经验公式拟合法等方法。  
关键词: 沟槽侵蚀; 泥沙输移比; 监测方法; 水土保持  
中图分类号: S 157 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409( 2004) 02-0087-03

Groove Erosion in Loess Plateau and the Monitoring Methods  
of Groove Erosion and Sediment Delivery Ratio

WANG Fei, YANG Qin-ke, LI Rui, ZHANG Xiao-ping  
(Institute of Soil And Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, Shaanxi China)

**Abstract:** Groove is the channel of sediment delivery and the main body of soil erosion. Monitoring of groove erosion could not only help to know the soil erosion rules, but be very useful for the production of sediment at small watershed and regional scales. Based on some researches in the Loess Plateau, the groove erosion is described, and the meaning and usage of sediment delivery ratio are discussed. Several general monitoring and estimation methods of groove erosion and sediment delivery ratio are put forward.  
**Key words:** groove erosion; sediment delivery ratio; monitoring method; soil and water conservation

黄土高原小流域侵蚀作用垂直分带包括沟间地侵蚀、沟谷地侵蚀和沟槽侵蚀与重力侵蚀三类<sup>[1]</sup>, 目前的大量研究主要集中在沟间地和沟谷地侵蚀方面, 主要为梁峁坡、谷坡侵蚀等, 对沟槽侵蚀的研究较为薄弱。沟槽侵蚀研究对揭示黄土高原土壤侵蚀规律和提高流域产沙模拟精度等很有帮助, 尤其可以促进对侵蚀定量研究中的重要参数—泥沙输移比的确定。本文在对沟槽侵蚀和泥沙输移比讨论的基础上, 提出沟道侵蚀与泥沙输移比监测方法, 作为水土保持监测、模拟和预报等研究的参考。

1 沟槽侵蚀特点与研究意义

1.1 沟槽侵蚀的含义与特点

沟槽是小流域径流和泥沙输移的集中通道, 黄土高原小流域沟坡与梁峁坡集中汇水形成暴流, 会产生沟槽侵蚀, 可以认为, 沟槽大小和面积明显受径流量影响, 但笔者尚未看到其确切定义或在形态上的划分方法。  
黄土高原现代强烈抬升区, 一般相对高差为 300 ~ 500 m, 而且水道级别越高, 其纵比降越大, 输送泥沙的能力就越

强<sup>[2]</sup>, 此处所说的纵比降, 一般认为是沟道比降, 但实质上就是沟槽的比降。  
在很多研究中, 并没有明确提出是沟道还是沟槽, 但是从地貌发育的角度看, 沟槽侵蚀和沟坡侵蚀密不可分。据研究, 黄土地区输沙量与流域产沙量基本一致, 含沙量过程线从坡面到干沟, 其峰值基本保持较高数值, 说明泥沙在沟道中运行的过程中, 不但很少发生淤积, 而且由于沟道的侵蚀, 输沙量还会增加<sup>[3]</sup>, 此处所说的沟道侵蚀, 实质上就是沟槽侵蚀。可以这样认为, 沟道侵蚀包括沟坡侵蚀和沟槽侵蚀, 而沟槽侵蚀较侧重小流域整体汇水产生的冲刷过程。  
沟道侵蚀一般可以分为沟道溯源侵蚀和沟道下切侵蚀, 前者指沟头向前延伸, 使沟道向塬梁峁等正地形单元扩展的过程, 后者指沟道变深的过程。一般来说, 在沟道侵蚀剧烈的地区, 沟头延伸速度较快, 沟道下切也较为剧烈, 其形态多呈深“V”型。从目前研究看, 更宜把沟道下切侵蚀作为沟槽侵蚀。  
1.2 沟槽侵蚀研究意义  
由于沟槽同时作为输沙通道和侵蚀主体, 其研究对揭示

① 收稿日期: 2004-02-25  
作者简介: 王飞(1971-), 男, 陕西户县人, 助理研究员, 博士研究生, 从事区域水土保持与环境研究, 已经发表论文 10 多篇。

水土流失规律和进行流域产沙模拟有重要意义。从侵蚀规律看, 沟槽的流量和能量非常集中, 含沙量大, 含沙径流在运动中稳定性极差, 加之所在区域地质特征、沟槽形态等问题, 径流挟沙能力、侵蚀能力和侵蚀方式等目前尚未有明确认识; 进而, 沟槽在地貌上为沟道的一部分, 沟槽与沟道侵蚀发育过程需要探讨; 从基本研究与观测角度看, 沟槽的侵蚀—堆积过程定量观测及其与地质地貌、降水、土壤等影响因素的关系还缺乏研究, 可以认为, 沟槽侵蚀本身的科学问题还有待进一步探讨。

沟槽侵蚀在区域和小流域产沙模拟中应用较多, 一种是把沟槽侵蚀速率作为研究对象考虑, 如 80 年代中期, 陈国祥等研究区域按照自然水系将流域分为若干流域单元, 又根据流域地形地貌和侵蚀产沙垂直分带规律, 将每个单元划分为梁峁坡、沟谷坡、和沟槽等 3 个侵蚀产沙区, 通过径流模型和侵蚀产沙模型建立了小流域侵蚀产沙模型。对沟槽侵蚀速率存在侵蚀功率与单位床面水流的实际能量相等的假设<sup>[4]</sup>; 一种是通过考虑沟槽侵蚀的泥沙输移比作为土壤侵蚀模数确定和尺度转换的参数, 进行水土流失定量研究。

## 2 泥沙输移比的含义与作用

### 2.1 泥沙输移比含义

泥沙输移比一般定义为: 流域某一段面实测输沙量与断面以上流域侵蚀产沙总量之比, 根据悬浮理论, 可以证明黄河中游黄土丘陵沟壑区中小流域输移比为 1 左右<sup>[3]</sup>, 而后唐金丽、牟金泽等对其含义在时间、泥沙粒级等方面作了进一步的界定<sup>[2,3]</sup>。影响泥沙输移比的因素很多, 主要有地质构造单元与新构造运动、地貌单元、地表物质组成、流域径流特性、流域面积大小和人类活动因素等, 具有明显的区域特征<sup>[2,3,5,6]</sup>。

### 2.2 泥沙输移比研究的作用

泥沙输移比研究主要有三种作用, 即确定流域产沙量、水土流失尺度转换和小流域或更大尺度的土壤侵蚀模拟<sup>[7]</sup>。根据中华人民共和国行业标准土壤侵蚀分类分级标准 (SL190- 96, 水利部水土保持司主编, 水利部批准, 1997 年 5 月 1 日) 和水蚀侵蚀模数的确定方法 (附录 B), 确定侵蚀模数时不能直接引用河流输沙模数, 水蚀侵蚀模数的确定方法之一可以“根据省、地《水文手册》年输沙模数, 用泥沙输移比进行推算”; 可见泥沙输移比是确定流域产沙量的基本方法之一。

不同空间尺度的泥沙观测、实验数据在相互转化时, 通过泥沙输移比, 可以计算小尺度土壤侵蚀量在区域等较大尺度河流泥沙的影响, 也可以按照河流泥沙含量推算小尺度实际产沙量, 在一些地区还可以估算河道侵蚀—堆积状况。如 Ferro 在研究泥沙运输过程时, 把盆地区分为不同的形态单元, 用流域手册公布的泥沙平衡方程探求盆地和各形态区的泥沙输移比的联系, 进而提出用于形态校正的评价系数, 模拟区域尺度泥沙运输过程<sup>[8]</sup>。

小流域或更大尺度的土壤侵蚀物理过程模拟在沟道汇水产沙中, 必须考虑泥沙输移比, 才可以有效提高精度。陈国

祥等通过径流模型和侵蚀产沙模型建立了小流域侵蚀产沙模型, 对全流域计算时, 如果主沟道存在明显冲淤变化, 可以把单元出口泥沙演算到总出口断面, 若沟道或者河道内基岩出露, 或者虽然不是基岩出露, 但是沉积物较粗, 可以认为泥沙输移比为 1<sup>[9]</sup>。同样, 蔡强国等基于侵蚀垂直分异规律, 通过坡面、沟坡和沟道三个子模型构成小流域侵蚀产沙过程模型, 在研究沟道子模型时, 也通过计算泥沙输移比来揭示流域侵蚀淤产沙的定量关系<sup>[10]</sup>。

## 3 沟槽侵蚀与泥沙输移比监测与估算

沟槽侵蚀与泥沙输移比监测一般可以采用沟道特征监测法、坡面产沙—出口站泥沙比较法、稀土元素示踪法等, 对泥沙输移比还有坝库泥沙还原法和经验公式拟合法等。

### 3.1 沟道特征监测法

该方法可以用于自然沟槽与河道, 也可以用于有淤地坝和水库的沟道与河道。沟道特征监测一般通过测量沟道深度、沟道淤积状况、出露地层等, 判断沟槽侵蚀量, 进而估算泥沙输移比。

一是通过标杆等固定标志测量沟槽起伏状况。在没有淤地坝的沟道, 一般在沟坡下方布设不同观测基点, 如标杆等, 每隔一定时间测量周边地表高度变化, 通过容重, 估算泥沙输移比。有淤地坝的沟道, 必须在每个坝的不同部位布设标杆, 定期测量标杆掩埋或者出露高度, 估算土壤侵蚀或者堆积状况。

该方法需要在区域内均匀布置观测点 (一般按一定密度的空间网格均匀布置), 确定合理的样本数 (样本数要能够满足精度要求, 能够代表研究区域真值的平均值的最少样本数), 在一定的时间间隔的起止时间分别精确测量各个观测点的高程值, 确定在此时间段内各个观测点高程的降低值, 利用统计学的方法求得区域的平均土壤侵蚀厚度, 再计算其侵蚀模数<sup>[11]</sup>。该方法为直接观测, 简单实用, 在坡面侵蚀中也可以应用<sup>[12]</sup>。

二是通过调查沟道剖面形态及其沉积物特征, 计算一定时间的冲淤平衡。如果河道为基岩, 泥沙输移为 1; 当河床或沟口堆积物都是细粒的, 说明沉积物没有完全被流水搬运, 其输移比不等于 1; 如果一条河流或者沟道断面面积增加, 说明是沉积的, 反之, 为冲刷区<sup>[2]</sup>。该方法定量程度较差。

### 3.2 坡面产沙—出口站泥沙比较法

通过计算或者监测坡面产沙和流域出口控制站泥沙资料, 根据沟道泥沙平衡原理, 沟槽沉积泥沙量为出口泥沙与上游来沙之差, 此值若为负, 说明沟槽存在沉积过程, 泥沙输移比小于 1; 若为 0, 说明沟槽侵蚀—堆积平衡, 泥沙输移比为 1; 若为正, 沟槽侵蚀量大于堆积量, 泥沙输移比大于 1, 并可以通过泥沙数量计算沟槽侵蚀量。

对坝库等沟道措施地流域, 可以采用不同流域比较法监测和估计, 即通过选择一些初始时期地质地貌、降水、土壤和面积相似的自然小流域, 其中一些后来修建了淤地坝, 可以通过比较不同密度和坝地面积的小流域的产水、产沙数量与过程, 估算淤地坝面积和数量对泥沙输移比的影响程度。

### 3.3 地球化学方法

该方法根据人工施放的与土壤结合稳定的示踪剂含量确定不同部位的泥沙来源和数量,如稀土元素示踪法是通过施放多种作为示踪剂的稀土元素,经过一定的侵蚀时间(如一次暴雨)后,在特定的位置采集侵蚀泥沙,利用中子活化分析技术测定其中 REE 浓度,用以测量任何一给定坡段的侵蚀和沉积量,所选取的稀土元素应具有土壤背景值低、实验时施加量少、容易识别和探测且不易被植物吸收等特征,La、Ce、Nd、Sm、Eu、Dy、Yb 是应用较多的几种示踪剂<sup>[10]</sup>,该方法在测量沟槽侵蚀时,需要对沟槽中的土壤进行标定。

### 3.4 坝库泥沙还原法估算泥沙输移比

对一些有一定观测时间而且存在淤地坝建设的流域通过时间对比,可以估算淤地坝建设对泥沙输移比的影响。其中包括两种方法,一是根据各年降水、径流、泥沙资料与坝高、淤地坝面积和控制面积等资料进行拟合,二是根据不同年份淤地坝泥沙淤积数量和径流流量与泥沙量,通过沉积层进行年份划分,将坝地泥沙淤积还原到各个年份,推算泥沙输移比。

### 3.5 经验公式拟合法估算泥沙输移比

该方法机理性较差,但在一些地区可以采用。如牟金泽、孟庆枚依据河流动力学基本理论<sup>[9]</sup>,通过对黄河中游黄土丘陵区大理河流域水沙资料分析,可以得到下面公式:

$$D \cdot R = 1.29 + 1.37 \ln Rc - 0.025 \ln A$$

式中:  $Rc$  为沟壑密度,  $\text{km}/\text{km}^2$ ;  $A$  —— 流域面积,  $\text{km}^2$ , 范围为  $0.18 \sim 3\,900 \text{ km}^2$ ,  $Rc$  为  $0.78 \sim 1.06 \text{ km}/\text{km}^2$ 。

蔡强国等基于侵蚀垂直分异规律建立了小流域侵蚀产沙过程模型,在研究沟道子模型时,试图通过计算泥沙输移参考文献:

[1] 陈永宗. 黄土高原地区的土壤侵蚀[A]. 见: 孟庆枚. 黄土高原水土保持[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996. 148– 177.

[2] 唐克丽, 熊贵枢, 梁季阳, 等. 黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. 79– 88.

[3] 牟金泽, 姚文艺. 水土流失与泥沙输移[A]. 见: 孟庆枚. 黄土高原水土保持[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996. 178– 212.

[4] 陈国祥, 谢树楠, 汤立群. 黄土高原地区流域侵蚀产沙模型研究[A]. 见: 孟庆枚. 黄土高原水土保持[C]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996. 213– 229.

[5] 牟金泽, 孟庆枚. 论流域产沙量计算中的泥沙输移[J]. 泥沙研究, 1982, 1(2): 60– 65.

[6] 陈永宗. 黄土高原沟道流域产沙过程的初步分析[J]. 地理研究, 1983, 2(3): 35– 46.

[7] 王飞, 李锐, 杨勤科. 土壤侵蚀研究的尺度转换[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 9– 12.

[8] Ferro, V, Minacapilli, M. Sediment delivery processes at basin scale[J]. Hydrological Sciences Journal, 1995, 40(6): 703– 718.

[9] 蔡强国, 陆兆熊, 王贵平. 黄土丘陵沟壑区典型小流域侵蚀产沙过程模型[J]. 地理学报, 1996, 51(2): 108– 117.

[10] 唐小明, 李长安. 土壤侵蚀速率研究方法综述[J]. 地球科学进展, 1999, 14(3): 274– 278.

[11] 卜兆宏, 刘绍清. 土壤流失量及其参数实测的新方法[J]. 土壤学报, 1995, 32(2): 210– 220.

比来揭示流域侵蚀淤产沙的定量关系。对羊道沟小流域泥沙输移比根据各种影响因素进行多元回归分析拟合, 优化得到表征泥沙输移比与降雨量、径流系数、最大含沙径流量和无量纲雨型因子的关系, 在无法测量最大含沙量与径流系数时, 通过降雨量、降雨历时、平均雨强和无量纲雨型因子拟合泥沙输移比, 精度较前者低<sup>[9]</sup>。

## 4 结 语

沟槽是小流域径流和泥沙输移的集中通道, 黄土高原小流域沟坡与梁峁坡集中汇水形成暴发, 会产生沟槽侵蚀, 常规所说的沟道侵蚀, 实质上就是沟槽侵蚀。可以认为, 沟道侵蚀包括沟坡侵蚀和沟槽侵蚀, 而沟槽侵蚀较侧重小流域整体汇水产生的冲刷过程。从目前研究看, 更宜把沟道下切侵蚀作为沟槽侵蚀。

沟槽同时作为输沙通道和侵蚀主体, 其研究对揭示水土流失规律和进行流域产沙模拟有重要意义。从侵蚀规律看, 可以进行沟槽侵蚀机理、沟槽与沟道侵蚀发育过程和沟槽侵蚀—堆积过程定量观测等。在区域和小流域产沙模拟中, 常常把沟槽侵蚀作为重要组分加以考虑。

泥沙输移比在确定流域产沙量、水土流失尺度转换和小流域或更大尺度的土壤侵蚀模拟研究中作用很大, 与沟槽侵蚀关系非常密切。

沟槽侵蚀与泥沙输移比监测一般可以采用沟道特征监测法、坡面产沙—出口站泥沙比较法、稀土元素示踪法等, 对泥沙输移比还有坝库泥沙还原法和经验公式拟合法等。应该根据不同研究区和研究需要, 选择适当的监测方法, 以提高土壤侵蚀监测和水土流失定量模拟精度。

《水土保持研究》再次入选《中文核心期刊要目总览》

由北京大学图书馆《中文核心期刊要目总览》2004 年版编委会编印的《中文核心期刊要目总览》2004 年版(即第四版)定于 2004 年 7 月出版,《水土保持研究》被确定为农业基础科学类核心期刊(详情见封四)。