

# 岔巴沟流域泥沙输移比时空分异特征及影响因素

刘纪根<sup>1</sup>, 蔡强国<sup>2</sup>, 张平仓<sup>1</sup>

(1 长江科学院 水土保持研究所, 湖北 武汉 430010; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘 要:** 本文以团山沟单元小流域作为流域系统产沙的源地, 将其它中小流域输沙模数与单元小流域侵蚀模数之比定义为泥沙输移比, 系统的研究了岔巴沟流域次暴雨泥沙输移比的时空变化特征及降水水文影响因子和地貌形态因子的综合影响。研究发现, 从长远来看, 流域系统的侵蚀与产沙可达到平衡, 但就次降雨或年度而言, 流域系统经常处于泥沙滞留和滞留的泥沙重新侵蚀搬运的状态。降雨量、径流系数、降雨时间、水流平均含沙量能很好的表达岔巴沟各流域次暴雨泥沙输移比, 在考虑地貌形态因子的影响后, 得到了岔巴沟流域次暴雨泥沙输移比的降水水文因子与地貌形态因子关系的综合表达式。

**关键词:** 泥沙输移比; 次暴雨; 地貌形态因子; 降水水文因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2007)05-0006-05

中图分类号: P333.4

## Temporal and Spatial Variations of Sediment Delivery Ratio and Its Influencing Factors in Chabagou Watershed

LIU Ji-gen<sup>1</sup>, CAI Qiang-guo<sup>2</sup>, ZHANG Ping-cang<sup>1</sup>

(1. Department of Soil and Water Conservation, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, Hubei 430010, China;

2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Tuanshangou unit watershed was selected to be the sediment yield source. The ratio of transported sediment modulus from a medium or small watershed to erosion modulus of the unit watershed was defined as sediment delivery ratio. Temporal and spatial variations of sediment delivery ratio from a single rainstorm and integrated effects of rainfall hydrological factors and topography factors were studied systematically. Results showed that from a long-term perspective, soil erosion and sediment yield of watersheds may reach a balance, but from a single rainstorm or one year perspective, watersheds were characterized by alternative deposition, erosion and transportation of sediment. Rainfall, runoff coefficient, rainfall duration and average sediment content in runoff can well express sediment delivery ratio for a single rainstorm in Chabagou watershed. After topographic factors were incorporated, an integrated expression of rainfall hydrological factors and topographic factors was founded for sediment delivery ratio from a single rainstorm in Chabagou watershed.

**Keywords:** sediment delivery ratio; single rainstorm; geomorphologic factors; rainfall hydrological factor

泥沙输移比是反映流域侵蚀泥沙输移能力的指标, 历来受到各国学者的重视<sup>[1-3]</sup>。在我国泥沙输移比的研究直到 20 世纪 70 年代后期才有人注意到。首先开创这个问题研究的是龚时扬、熊贵枢<sup>[4]</sup>, 后来陆续开展了关于这方面的研究<sup>[5-7]</sup>。但以往的研究只是考虑环境因素与流域面积对流域泥沙输移比的影响。关于降雨与水文因素对泥沙输移比的影响研究还不够<sup>[7-9]</sup>。

泥沙输移比的空间分异规律, 在次暴雨条件下不同流域尺度的侵蚀与产沙关系, 侵蚀、输移和沉积的变化特征, 及暴雨洪水对泥沙输移比的影响和作用机理等, 尚缺乏深入的量化研究。

本文以岔巴沟流域实测水文资料为依据, 拟对岔巴沟流域影响次暴雨泥沙输移比的降水水文因子和地貌形态因子以及泥沙输移比的时空分异特征作一探讨。

收稿日期: 2005-12-13 修回日期: 2007-03-25

基金项目: 长江科学院博士科研启动金; 国家自然科学基金“流域侵蚀产沙过程中的尺度转换及模型研究”(40271075); 中国科学院知识创新工程重要方向项目“水蚀预报模型研究”, 中科院地理科学与资源研究所知识创新工程项目(CXI0G-A00-05-02)资助

作者简介: 刘纪根(1975-), 男(汉族), 湖北省汉川县人, 博士, 主要从事流域侵蚀产沙方面的研究。E-mail: Jigenliu@163.com。

## 1 研究区概况

子洲径流站位于陕西省子洲县内大理河的一级支流岔巴沟上,于1958年建站,1969年撤消。岔巴沟流域面积为205 km<sup>2</sup>,沟内先后设立了9个水文站,40多个雨量站和3处径流场。岔巴沟是大理河的一条支沟,曹坪站以上集水面积187 km<sup>2</sup>,沟道长度24.1 km,流域平均宽度7.22 km,沟道密度1.05 km/km<sup>2</sup>,流域形状基本对称。1959—1969年的实测资料表明,多年平均降水量480 mm,降水季节分配不均匀,70%集中在6—9月,且多为强度大,历时短的暴雨,实测最大降雨强度达3.5 mm/min,年平均温度约8℃,最高气温38℃,最低气温-27℃,霜冻期约半年。流域平均侵蚀模数22 200 t/(km<sup>2</sup>·a),最大侵蚀模数达71 100 t/(km<sup>2</sup>·a),最小亦为2 110 t/(km<sup>2</sup>·a)。该流域土壤侵蚀特点:沟谷发育,黄土层疏松,颗粒细小,粘结性差。坡面与沟谷极易产生泥沙,且沟道汇流输沙畅通;坡度陡峭,暴雨强度大,洪水来势猛,导致坡面漫流与沟道汇流的挟沙能力皆很大。气候干燥,植被稀疏,地表土层缺乏保护;坡地耕种不尽合理,加剧了水土流失。

## 2 次暴雨泥沙输移比计算

泥沙输移比是指流域某一断面的输沙量与断面

以上流域总侵蚀量之比:

$$S_{DR} = \frac{Y}{T} \quad (1)$$

式中:  $S_{DR}$ ——泥沙输移比;  $Y$ ——流域出口控制断面的实测产沙量;  $T$ ——出口控制断面以上流域总侵蚀量。

确定泥沙输移比,首先要确定流域的侵蚀量。国外的研究方法大多都是以USLE或改进的USLE来计算分流域或网格的泥沙侵蚀量。而目前在国内,研究泥沙输移比最大的困难在于缺乏可计算流域侵蚀量的实用公式。牟金泽等人根据黄土丘陵沟壑区侵蚀产沙的特点<sup>[5]</sup>,把单元沟道小流域(<1.0 km<sup>2</sup>)作为流域系统泥沙的产源地,将其它中小流域输沙模数与单元小流域侵蚀模数之比定义为泥沙输移比。本文以团山沟(0.18 km<sup>2</sup>)作为单元小流域,经过回归分析确定了径流深与侵蚀产沙模数有显著的相关关系:

$$M_s = 714.28 H - 132.42 \\ R^2 = 0.99 \quad (n = 25) \quad (2)$$

式中:  $M_s$ ——输沙模数(t/km<sup>2</sup>);  $H$ ——径流深(mm)。将其它中、小流域的径流深(大于1 mm)代入(2)式,得到各中、小流域次暴雨侵蚀产沙模数,各次暴雨的输沙模数与之比值,即为次暴雨下的泥沙输移比(见表1)。

表1 岔巴沟流域次暴雨泥沙输移比

测站名称	控制流域面积/km <sup>2</sup>	泥沙输移比	数据年限	流域状况
蛇家沟	4.26	0.45~1.29	1960—1969	支沟
驼耳巷沟	5.74	0.33~1.20	1960—1967	支沟
三川口	21.00	0.29~1.54	1959—1969	支沟
西庄	49.00	0.49~1.54	1959—1967	干沟
杜家沟岔	96.10	0.51~1.63	1959—1967	干沟
曹坪	187.00	0.53~1.40	1959—1969	干沟

## 3 泥沙输移比的时空变化特征

从岔巴沟流域系统多年次降雨泥沙输移比的分布可以看出(表1),次降雨泥沙输移比有相当大的变幅,不同流域尺度上的次降雨泥沙输移比一般变化于0.3~1.6之间。对于一定尺度的流域,从多年平均来看,泥沙输移比是一个比较稳定的值。龚时暘<sup>[4]</sup>(1980)等人认为黄土丘陵沟壑区不论大中小流域,多年平均泥沙输移比约为1。从岔巴沟流域不同年度年泥沙输移比(表2)来看,多年平均泥沙输移比接近

于1,侵蚀与输沙基本达到平衡,这与前人的分析相吻合。但年度之间却存在相当大的变幅,这主要受降雨特性和暴雨洪水空间分布特征的影响。从长远来看,流域系统的侵蚀与输沙达到平衡,但就次降雨或年度而言,流域系统经常处于泥沙滞留和滞留的泥沙重新侵蚀搬运的情况。前期滞留的泥沙会因下次暴雨行洪能力增强及较强挟沙水流重新搬运,而形成泥沙输移比大于1。

不同流域的年泥沙输移比在时间分布上基本同步。1959年的泥沙输移比都较大,而在1960年、

1961 年则变小。到 1962 年,1963 年又增大。1964 年和 1965 年则又变小。1966 年和 1967 年又变大,出现一种交替变化的特征。不同流域的年泥沙输移比和多年泥沙输移比在空间分布上没有什么规律。

这可能受降雨径流特性和暴雨洪水在整个流域空间分布的影响。例如,短历时的暴雨与较长历时暴雨的暴雨中心在流域中的位置改变都会影响暴雨洪水的能量与侵蚀产沙能力的变化。

表 2 不同年度年平均泥沙输移比

年份	蛇家沟	驼耳巷沟	三川口	西庄	杜家沟岔	曹坪
1959	—	—	1.40	0.98	0.94	1.12
1960	0.89	0.48	0.66	0.75	0.81	0.82
1961	0.67	0.50	0.86	0.96	0.90	0.90
1962	0.81	1.07	1.04	1.14	0.99	1.00
1963	0.91	1.20	1.02	1.11	1.08	1.17
1964	0.91	0.85	0.91	0.84	0.81	0.93
1965	—	0.80	0.44	0.74	0.88	0.76
1966	0.87	0.91	1.03	1.12	1.11	1.08
1967	0.83	1.06	0.98	1.10	1.07	1.00
1968	0.88	—	1.07	—	—	1.09
1969	0.87	—	0.99	—	—	1.03
多年平均	0.85	0.86	0.95	0.97	0.95	0.99

#### 4 次暴雨泥沙输移比影响因子分析

影响泥沙输移比的因素错综复杂,归纳起来主要有以下三方面<sup>[10-12]</sup>:(1)地貌及环境因子,如流域大小、形态及沟道特征;(2)侵蚀物质的粒径与土壤质地结构、植被、土地利用状况;(3)降水及水文因素。以往的研究多注重地貌形态特征与泥沙输移比的关系,其中,流域面积则是主要的考虑因素。因为,在某种程度上讲,在区域的范围内,流域面积的大小间接地反映了地形起伏,沟道比降的变化。牟金泽<sup>[5]</sup>(1982)在分析黄土丘陵沟壑区大理河流域的泥沙输移比与流域面积和沟道密度等因素后,得如下泥沙输移比计算式:

$$S_{DR} = 1.29 + 1.37 \ln R_c - 0.025 \ln A \quad (3)$$

式中: $S_{DR}$ ——泥沙输移比; $R_c$ ——沟道密度(km/km<sup>2</sup>); $A$ ——流域面积(km<sup>2</sup>)。

就次降雨而言,在特定的流域,地貌与下垫面条件基本上可视为常量,而影响次降雨泥沙输移比的因素主要是降雨径流特性和暴雨洪水在整个流域空间上侵蚀、输移和沉积的能量变化,以及泥沙特性对水流挟沙能力的影响等。蔡强国<sup>[7]</sup>在羊道沟就影响泥沙输移比的降雨、径流、泥沙及雨型等 11 个因素进行相关分析后,通过不同拟合,比较,优化得到一个表征

泥沙输移比( $S_{DR}$ )与降雨量( $R$ )、径流系数( $C$ )、最大水流含沙量( $S_m$ )、无量纲雨型因子( $E_a/E$ )关系的幂指数回归方程:

$$S_{DR} = 0.0277 R^{-0.29} C^{0.10} S_m^{0.59} (E_a/E)^{0.44} \quad (4)$$

以上只是分别就地貌形态因子与降水水文因子对泥沙输移比的影响单独作了研究,但是暴雨洪水是侵蚀与产沙的动力,地貌形态特征则是影响洪水动力的转化条件,这两因素往往是交互在一起对泥沙输移比产生影响的,这两种因素怎样影响泥沙输移比却不得而知。陈浩在考虑了水力与地貌特征的影响后<sup>[9]</sup>,得到了大理河流域系统不同流域尺度多年平均泥沙输移比的预报模型:

$$D_r = 0.657 A^{-0.014} G_m^{0.962} H^{0.152} \quad (5)$$

式中: $D_r$ ——多年平均泥沙输移比; $A$ ——流域面积(km<sup>2</sup>); $G_m$ ——沟道密度(km/km<sup>2</sup>); $H$ ——多年平均径流深(mm)。

曹文洪<sup>[10]</sup>通过岔巴沟、韭园沟、南小河沟、赵家川和党家川等流域的 36 次暴雨洪水泥沙输移比的资料,建立了次暴雨泥沙输移比的计算式:

$$S_{DR} = 0.486 A^{-0.08} J^{0.0788} h^{0.0915} T^{0.213} \quad (6)$$

式中: $S_{DR}$ ——泥沙输移比; $A$ ——流域面积(km<sup>2</sup>); $J$ ——主沟比降(%); $h$ ——一次暴雨径流深(mm); $T$ ——一次暴雨历时(h)。

上述两人综合考虑了影响泥沙输移比的降水水文因素和地貌形态因子,但建立的泥沙输移比计算式考虑因素不够全面,物理意义不够明确。

我们对有可能影响泥沙输移比的降雨、径流、泥沙等因素进行了相关分析,得到岔巴沟各流域影响次暴雨泥沙输移比的相关因子如表3。

表3 岔巴沟流域次暴雨泥沙输移比相关因子

蛇家沟	驼耳巷沟	三川口	西庄	杜家沟岔	曹坪
洪峰流量*	洪峰流量*	平均雨深-*	平均雨深-*	平均雨深-**	洪水历时-*
洪峰流量模数*	洪峰流量模数*	径流系数*	平均含沙量**	径流系数*	平均雨深-*
平均含沙量**	平均雨深-*	平均含沙量**	降雨历时-**	平均含沙量**	径流系数*
降雨历时-*	径流系数**	降雨历时-**	降雨量-**	降雨历时-**	平均流量模数*
降雨量-*	平均流量模数*			降雨量-**	平均含沙量*
	平均含沙量**				降雨历时-*
					降雨量-*

注: \* 为显著相关; \*\* 为极显著相关; - \* 为负显著相关; - \*\* 为负极显著相关。

从表3可以看出,不同流域尺度影响次暴雨泥沙输移比的降水水文因子各不相同,这主要是因为受流域地形地貌与其它环境因素的影响。但不同流域尺度次暴雨泥沙输移比相关因子表明,随着流域尺度的变化,次暴雨泥沙输移比的影响因子也在发生变化。在较小流域(<10 km<sup>2</sup>),影响泥沙输移比的因子主要是洪峰流量、径流系数、平均含沙量、降雨量、降雨历时;在中小流域(10~100 km<sup>2</sup>),影响泥沙输移比的主要因素是平均雨深、径流系数、平均含沙量、降雨量、降雨历时;在中大流域(>100 km<sup>2</sup>),影响泥沙输移比的因子除了包括中小流域的影响因素外,洪水历时、平均流量模数也成为影响泥沙输移比的两个关键因素。

6个流域的次暴雨泥沙输移比与水流平均含沙量均显著相关。说明水流平均含沙量越高,水流挟带泥沙的能力越强,因此泥沙输移比较大。其次,降雨历时、降雨量也是影响泥沙输移比的重要因素,它们与泥沙输移比负相关。说明短历时暴雨泥沙输移比较大,而降雨历时或降雨量较大时泥沙输移比则较小。这是因为短历时暴雨往往是沟坡与沟道先产流。由于此时侵蚀量相对较小,所以水流具有较大的挟沙能力,使前期滞留的泥沙再次被搬运,形成较大的泥沙输移比。

当降雨历时较长或降雨量较大时,有利于坡面侵蚀。坡面径流与泥沙均下沟坡,显著地加大沟坡的侵蚀量,使水流挟沙能力达到饱和,并引起泥沙在沟道滞留,导致泥沙输移比减小。径流系数也是影响泥沙输移比的重要因素,它反映了径流的能量特性,一般来说,径流系数越大,泥沙输移比越大。通过分析比较得到不同流域表征泥沙输移比(S<sub>DR</sub>)与降雨量(R)、径流系数(C)、降雨时间(T)、水流平均含沙量

(S<sub>m</sub>)关系的幂指数回归方程:

(1) 蛇家沟

$$S_{DR} = 0.002742C^{0.0887} S_m^{0.959} T^{-0.0601} R^{-0.00275}$$

$$r = 0.978, \quad n = 21$$

(2) 驼耳巷沟

$$S_{DR} = 0.005534C^{0.0356} S_m^{0.829} T^{-0.02235} R^{-0.0488}$$

$$r = 0.987, \quad n = 20$$

(3) 三川口

$$S_{DR} = 0.002028C^{0.0409} S_m^{1.011} T^{-0.007} R^{-0.0754}$$

$$r = 0.988, \quad n = 24$$

(4) 西庄

$$S_{DR} = 0.005433C^{0.01205} S_m^{0.849} T^{-0.0126} R^{-0.105}$$

$$r = 0.936, \quad n = 34$$

(5) 杜家沟岔

$$S_{DR} = 0.001884C^{0.0343} S_m^{0.992} T^{-0.028} R^{-0.0168}$$

$$r = 0.948, \quad n = 37$$

(6) 曹坪

$$S_{DR} = 0.001219C^{0.0186} S_m^{1.043} T^{-0.0153} R^{-0.00496}$$

$$r = 0.947, \quad n = 41$$

式中: S<sub>DR</sub>——泥沙输移比(无量纲); C——径流系数(%); S<sub>m</sub>——水流平均含沙量(m<sup>3</sup>/S); T——降雨历时(h); R——降雨量(mm)。其复相关系数都在0.9以上,说明降雨量(R)、径流系数(C)、降雨时间(T)、水流平均含沙量(S<sub>m</sub>)能很好地表达各流域次暴雨泥沙输移比。但是4个因子的组合力度及方式却不同,这主要与各流域的地貌及环境因子有关。为了综合考虑所有因素的影响,我们在上述分析的基础上,考虑了流域面积(A)与沟壑密度(G<sub>m</sub>)的影响,得到岔巴沟流域次暴雨泥沙输移比总的回归方程:

$$S_{DR} = 0.165 + 0.00134S_m - 0.00237T - 0.00126R + 0.00119C - 4.09 \times 10^{-5}A + 0.01933G_m$$

$$r = 0.941, \quad n = 177 \quad (7)$$

式中:  $A$ ——流域面积 ( $\text{km}^2$ );  $G_m$ ——沟壑密度 ( $\text{km}/\text{km}^2$ ); 其它与上面相同。

式(7)的结构表明,在降雨洪水特征一定的情况下,泥沙输移比随流域面积的增大而减小,但却随沟道密度的增大而增加,这一结果与牟金泽等人的分析相同。同时,在流域一定的情况下,泥沙输移比随泥沙含量的增加而增加,随降雨历时、降雨量的增大而减小,随径流系数的增大而增大,与上面的分析符合。公式(7)物理意义明确,综合考虑了次暴雨泥沙输移比的降雨水文因子和流域地貌环境特性的影响,具有较强的研究价值。

## 5 结语

(1) 本文以团山沟作为单元小流域,经过回归分析确定了径流深与侵蚀产沙模数有显著的相关关系,将其它中、小流域的径流深(大于 1 mm)代入,得到各中、小流域次暴雨侵蚀产沙模数,各次暴雨的输沙模数与之比较,即为次暴雨下的泥沙输移比。用此种方法计算次暴雨泥沙输移比虽然没有进行论证,但用它计算的次暴雨泥沙输移比确实反映了岔巴沟流域泥沙输移的一些特征,同时影响次暴雨泥沙输移比的因素也得到了很好的体现,具有一定的研究意义。

(2) 通过对岔巴沟次暴雨泥沙输移比时空变化特征的分析,次降雨泥沙输移比有相当大的变幅,不同流域尺度上的次降雨泥沙输移比一般变化于 0.3~1.6 之间。从多年平均来看,多年平均泥沙输移比接近于 1,侵蚀产沙与输沙基本可达到平衡。但就次降雨或年度而言,流域系统经常处于泥沙滞留和滞留的泥沙重新侵蚀搬运的情况。

(3) 通过对可能影响泥沙输移比的降雨、径流、泥沙等因素进行相关分析,得到岔巴沟各流域影响次暴雨泥沙输移比的相关因子,分析比较后得到不同流域表征泥沙输移比( $S_{DR}$ )与降雨量( $R$ )、径流系数( $C$ )、降雨时间( $T$ )、水流平均含沙量( $S_m$ )关系的幂指

数回归方程。在考虑地貌形态因子的影响后,得到岔巴沟流域次暴雨泥沙输移比的降水水文因子与地貌形态因子的综合表达式。

## [参 考 文 献]

- [1] Roehl J E. Sediment source areas, delivery ratios and influencing morphological factors[C]. Publication 59. International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, England, 1962. 202—213.
- [2] Williams J R. Sediment routing for agricultural watersheds[J]. Water Resources Bulletin, 1975(11):965—974.
- [3] Walling D E. The sediment delivery problem[J]. Journal of Hydrology, 1983, 65(1):209—237.
- [4] 龚时晒,熊贵枢. 黄河泥沙来源和输移[C]. 见:河流泥沙国际学术论文会议论文集. 北京:光华出版社,1980. 43—52.
- [5] 牟金泽,孟庆牧. 论流域产沙量计算中的泥沙输移比[J]. 泥沙研究,1982,1(2):223—230.
- [6] 景可. 黄土高原输移比研究[C]. 见:黄河粗泥沙来源及侵蚀产沙机理研究文集. 北京:气象出版社,1989.
- [7] 蔡强国,陈浩,马绍嘉,等. 黄土丘陵沟壑区羊道沟小流域次降雨泥沙输移比研究[C]. 见:黄河流域环境演变与水沙运行规律研究文集. 北京:地质出版社,1991. 105—113.
- [8] Novotny V. Delivery of suspended sediment and pollutants from nonpoint sources during overland flow[J]. Water Resources Bull, 1980(11):965—974.
- [9] 陈浩. 降雨径流对大理河流域系统泥沙输移比的影响[J]. 水土保持学报,2000,14(5):19—27.
- [10] 曹文洪,张启舜,姜乃森. 黄土地区一次暴雨产沙数学模型的研究[J]. 泥沙研究,1993(1):1—13.
- [11] 张光科,刘东,方铎. 山区流域泥沙输移比计算公式[J]. 四川科技大学学报,1996,94(6):85—90.
- [12] 王协康,敖汝庄,喻国量,等. 泥沙输移比问题的分析研究[J]. 四川水力发电,1999,18(2):16—20,67.