基于水文要素的黄土丘陵区次降雨泥沙输移比模型

王玲玲[1,2]，姚文艺[1]，王昭艳[3]，杨吉山[1]

（1. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院，河南 郑州 450003；2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室，陕西 杨凌 712100；3. 中国水利水电科学研究院，北京 100044）

摘　要：以黄土丘陵区桥沟小流域为研究对象，利用该流域不同地貌部位的野外径流场及沟道水文站网观测资料，探讨了小流域次暴雨泥沙输移比的时空变化特征。依据相关分析法，确定了影响桥沟流域次降雨泥沙输移比的主导因素。结果表明，径流侵蚀力、泥沙相对重率、降雨特性、土壤前期含水量是影响桥沟流域次降雨泥沙输移比的主导因子。采用统计回归方法，建立了黄土丘陵区桥沟流域次降雨泥沙输移比模型。

关键词：泥沙输移比；次降雨；径流侵蚀力；黄土区

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2011)05-0028-04　　**中图分类号**：TV142

Modeling Sediment Delivery Ratio of Single Rainfall Events in Hilly-Gullied Loess Region Based on Hydrologic Elements

WANG Ling-ling[1,2], YAO Wen-yi[1], WANG Zhao-yan[3], YANG Ji-shan[1]

(1. *Yellow River Institute of Hydraulic, YRCC, Zhengzhou, He'nan* 450003, *China*; 2. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100044, *China*)

Abstract: Qiaogou watershed, located in the hilly-gullied loess region, was chosen as the study area. Based on the observed data from the natural runoff plots and hydrological stations built on different landscape positions, the temporal and spatial characteristics of sediment delivery ratios(SDR) under single rainfall events were discussed. The dominant factors affecting the SDR were determined by correlation analysis. The results show that the antecedent soil moisture content, rainfall characteristics, runoff erosivity power and sediment relative bulk density were the main factors controlling the SDR in this area. Using these dominant elements, a sediment delivery ratio formula was built by nonlinear regression analysis.

Keywords: sediment delivery ratio; single rainfall; runoff erosivity power; hilly-gullied loess region

泥沙输移比是研究流域侵蚀与产沙关系的重要数据和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[1-2]。以往对流域多年平均泥沙输移比的研究较多，对次降雨泥沙输移比的研究还相对较少[3-5]，进一步深入探讨和建立次降雨条件下的泥沙输移比模型，对完善土壤侵蚀模拟体系，提高土壤侵蚀模拟精度有着重要的意义。

1　研究区概况

选择黄土丘陵区桥沟流域为研究区域。桥沟流域位于陕西省榆林市绥德县，面积为 0.45 km^2，主沟长 1.4 km，沟壑密度 5.4 km/km^2，流域年平均降雨约 350 mm。流域内有两条较大支沟，其中一支沟面积 0.069 km^2，沟长 870 m，沟道比降 4.97%，二支沟面积 0.093 km^2，沟长 805 m，沟道比降 1.15%。在一支沟、二支沟和流域出口布设径流观测站，全流域布设自记雨量站 4 个，按不同地貌部位布设大型径流场 8 个。

2　次降雨泥沙输移比定义及计算

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[6]，次降雨泥沙输移比是指某

收稿日期：2011-01-12　　修回日期：2011-03-10

资助项目：黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目“黄土丘陵区小流域次暴雨泥沙输移过程研究”(10501-235)；黄河水利科学研究院基本业务费专项“黄土高原分布式水沙模型的尺度转换研究”(JBYWZ2010-19)；水利部公益性行业科研专项“黄土高原多沙粗沙区产水产沙数学模型研究与应用”(200701035)

作者简介：王玲玲(1975—)，女(汉族)，河南省博爱县人，硕士，高工，主要从事土壤侵蚀过程及模拟研究。E-mail：wlingling99@yahoo.com.cn。

次洪水条件下的泥沙输移比,并以流域系统观测断面在降雨产流发生洪峰水位时为标志:

$$SDR = W_s / W_e \quad (1)$$

式中:SDR——泥沙输移比;W_s——流域出口控制断面的实测产沙量(t);W_e——流域内不同地貌部位的侵蚀量之和(t)。

流域出口控制断面的产沙量通过实测水文泥沙资料获取,侵蚀量的确定主要根据径流场观测资料进行外推,具体计算过程如下:

鉴于黄土丘陵区的地貌具有明显垂直地带性,可将其分为沟间地、沟谷坡和沟槽。流域侵蚀主要来自沟间地和沟谷坡,沟槽主要是泥沙输移的通道。根据桥沟流域的坡度分布,沟间地平均坡度范围为 0°～25°,沟谷坡平均坡度范围为 25°～55°,流域河槽、支槽统一划分到沟槽(>55°)。根据坡度分析结果,利用 ArcGIS 空间分析模块功能,提取桥沟流域不同地貌单元,统计各地貌单元的面积。

桥沟流域布设了不同地貌的径流观测场(峁坡、沟坡、全坡面),依据径流场资料,计算不同地貌部位的土壤侵蚀模数,以径流场观测资料确定的土壤侵蚀模数乘以不同地貌单元面积,得到不同地貌单元的侵蚀量,各个单元侵蚀量相加得到整个流域的土壤侵蚀量。

3　次降雨泥沙输移比时空特征

按照上述泥沙输移比计算方法,计算出桥沟流域不同沟道级别 13 场次降雨泥沙输移比(表 1)。

表 1　桥沟流域泥沙输移比计算结果

降雨场次	一支沟	二支沟	全流域
950717(1)	0.35	0.072	0.32
950717(2)	2.53	0.585	1.35
950901	2.62	1.089	2.02
950903	1.18	0.495	0.64
960616	0.91	0.142	0.37
960709	0.80	0.104	0.60
960714	1.95	1.084	3.32
960731	0.48	0.326	0.39
960809	1.10	0.167	0.70
970718	1.64	0.388	0.72
970728	0.72	0.329	0.73
970729	1.00	1.083	0.65
970731	0.72	0.337	0.43

从表 1 可以看出,桥沟不同尺度的最小、最大次降雨泥沙输移比一般变化于 0.3～3.3 之间,一支沟次降雨泥沙输移比平均为 1.23,二支沟为 0.48,全流域为 0.94。出现这种现象主要是因为流域系统泥沙输移比随降雨特性及洪水汇流过程中径流量和挟沙能力的大小而变化,流域系统经常处于泥沙滞留和滞留的泥沙重新被侵蚀搬运。从次降雨泥沙输移比平均值来看,桥沟流域 3 a 的次降雨泥沙输移比为 0.95,说明桥沟流域泥沙输移比在较短时间内基本达到侵蚀与产沙平衡。

4　次降雨泥沙输移比影响因子分析

4.1　土壤前期含水量的影响

土壤前期含水量是影响侵蚀与泥沙输移的重要因素。当降雨历时短时,往往沟坡与沟道先产流,由于此时侵蚀量相对较小,水流具有较大挟沙能力,使前期支流的泥沙再次被搬运,形成较大的泥沙输移比。当前期降雨丰富或降雨历时较长时,坡面侵蚀增大,坡面径流与泥沙下坡会显著加大沟坡的侵蚀量。

桥沟流域前期土壤含水量与泥沙输移比变化过程见图 1。

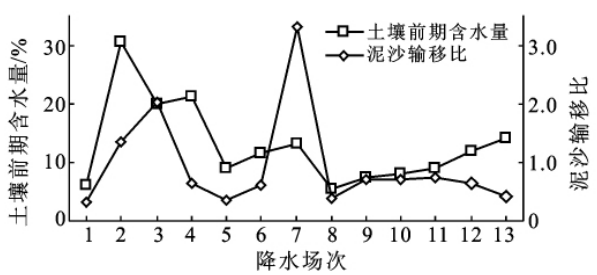


图 1　前期土壤含水量与泥沙输移比变化趋势

从图 1 可以看出,土壤前期含水量的起伏过程和次降雨泥沙输移比的起伏过程呈现相反趋势,当前期土壤含水量较大时,尽管产流量和径流挟沙能力均加大,但其对侵蚀的影响可能会超出对挟沙能力的影响,导致泥沙输移比较少。这也反映出,不同的降雨过程峰值出现的时段不同,对泥沙输移比的影响也不同。

4.2　降雨特征的影响

区域降雨是导致水土流失最为直接的因素,一定程度上也决定了流域泥沙输移比,其中降雨特性对入渗损失、径流的形成和汇流能力以及洪峰的大小均起到重要作用。

统计桥沟流域 1995—1997 年间 13 场次降雨的降雨过程和泥沙输移比计算值发现,泥沙输移比大于 1 的降雨,其降雨峰值出现在降雨的前期,而泥沙输移比小于 1 的降雨,其降雨峰值出现在降雨的后期。降雨雨峰出现的不同时刻对泥沙输移比的影响可以

采用降雨峰现系数来反映，即一场降水从开始到出现峰值所经历的时间与降雨历时的比值：

$$\eta = t_m / t_p \tag{2}$$

式中：η——峰现系数；t_m——出现降雨雨峰时的降水历时(min)；t_p——次降雨总历时(min)。峰现系数与泥沙输移比的关系见图 2。

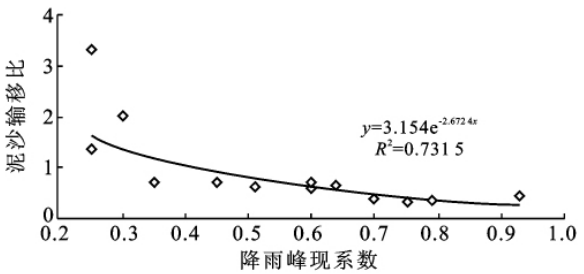


图 2 降雨峰现系数和泥沙输移比关系

4.3 洪水特征的影响

本研究采用李占斌等提出的径流侵蚀力作为泥沙运动的动力因子[7]。径流侵蚀力并不是物理学意义上的力，而是指径流侵蚀土壤及挟带泥沙的能力，反映径流量和洪峰流量在侵蚀产沙及搬运泥沙过程中的共同作用效果。参照河道水流挟沙力计算公式中的水力因子，定义径流侵蚀力 E 的计算公式为：

$$E = \frac{Q_m Q \rho}{F} \tag{3}$$

式中：E——径流侵蚀力；Q_m——洪峰流量(m^3/s)；Q——径流量(m^3)；F——流域面积(m^2)；ρ——水的密度(kg/m^3)。

应用式(3)对桥沟降雨、径流、泥沙资料进行了计算分析，点绘了径流侵蚀力与泥沙输移比关系见图 3。

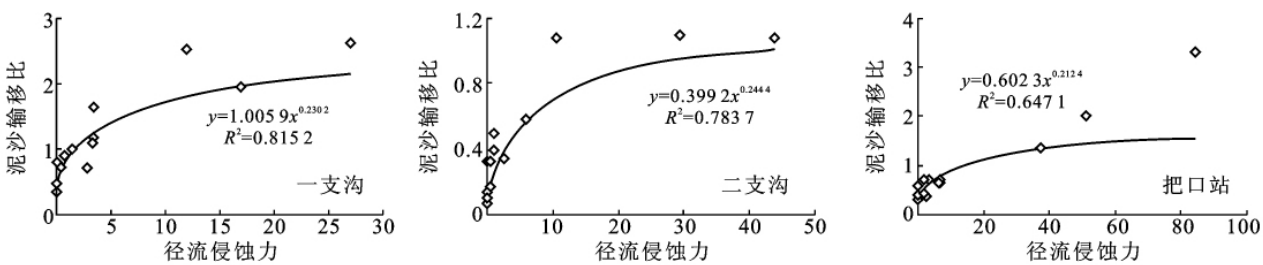


图 3 不同沟道级别径流侵蚀力与泥沙输移比关系

从图 3 可以看出，次降雨泥沙输移比随径流侵蚀力的增大而增大的趋势在不同支沟之间都比较一致。回归分析表明，径流侵蚀力与泥沙输移比之间存在较好的幂函数关系，径流侵蚀力能够在本质上反映径流侵蚀土壤和搬运泥沙的能力。

4.4 含沙量对泥沙输移比的影响

高含沙水流是黄土高原地区普遍观察到的一种水流现象[8]。高含沙水流的出现使黄土高原的侵蚀和输沙表现出许多不同于其它地区的特征。借鉴曹如轩[9]河道水流挟沙力公式中的泥沙相对重率来反映高含沙水流对泥沙输移比的影响。泥沙相对重率定义如下：

$$\gamma = \frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m} \tag{4}$$

式中：γ——泥沙相对重率；γ_m——浑水容重(kg/m^3)，$\gamma_m = 1000 + 0.622S$(S 为含沙量)；γ_s——泥沙容重(kg/m^3)。点绘泥沙相对重率和泥沙输移比的关系见图 4。

图 4 表明，次降雨的泥沙相对重率和泥沙输移比呈现相同的变化趋势，而且泥沙输移比变化的斜率远大于泥沙相对重率。说明随着含沙量增加到高含沙水流后，水流含沙量对水流输沙能力的影响大于其侵蚀作用。对泥沙相对重率和泥沙输移比进行相关分析，相关系数为 0.64，表明其可作为影响泥沙输移比的一个主导因子。

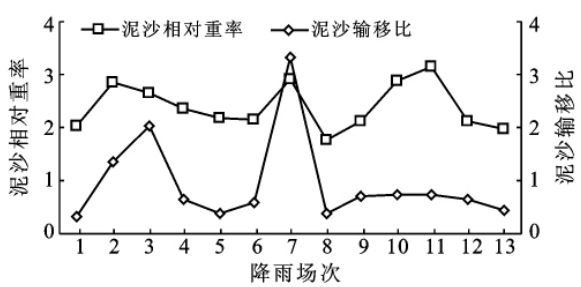


图 4 泥沙相对重率与泥沙输移比关系

4.5 流域面积对泥沙输移比的影响

关于流域面积对泥沙输移比的影响，国内外研究者普遍认为泥沙输移比是随流域面积的增大而递减的[10]。表 2 为 13 场降雨的流域面积和泥沙输移比的方差分析结果。

由表 2 可知，$p = 0.011 < 0.05$，说明在 0.05 水平下，流域面积对泥沙输移比的影响存在显著差异。图 5 表示流域面积与泥沙输移比之间的相关关系。

表 2　流域面积和泥沙输移比方差分析

样本	离差平方和	自由度	均方	F 值	P 值
组间	4.830	4	1.208	3.869	0.011
组内	10.613	34	0.312		
总和	15.443	38			

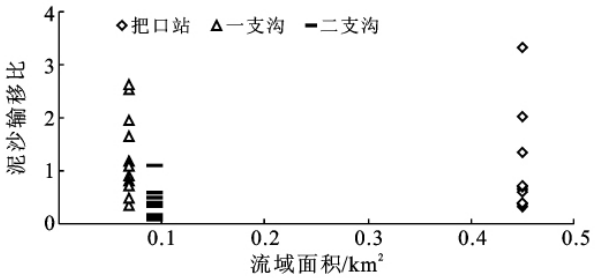


图 5　流域面积和泥沙输移比的关系

从图 5 可以看出,随着流域面积的增大,泥沙输移比总体呈减小趋势,因此,在分析洪水特征对泥沙输移比的影响中,应对流域面积有所考虑。

4.6　泥沙输移比公式的建立

选取泥沙相对重率、径流侵蚀力、降雨峰值系数作为主导因子,运用多元非线性回归方法,经过 25 次反复试算,建立桥沟流域次降雨泥沙输移比公式:

$$SDR=3.7e^{-2.9\frac{t_m}{t_\rho}}\left(\frac{Q_mQ\rho}{F}\frac{\gamma_m}{\gamma_s-\gamma_m}\right)^{0.03},\ R^2=0.82 \quad (5)$$

式中:SDR——泥沙输移比;t_m——降雨峰值发生时间(min);t_ρ——次降雨总历时(min);Q_m——洪峰流量(m^3/s);Q——径流量(m^3);F——流域面积(km^2);ρ——水的密度(kg/m^3);γ_m——浑水重率;γ_s——泥沙容重。

5　结论

(1) 从影响次降雨泥沙输移比各个因子的相关分析结果看,单个因子和泥沙输移比的相关系数并不是很高,这可能是由于影响泥沙输移比的各个因子是相互作用的,难以用单一的因子来描述泥沙输移过程。

(2) 本次研究初步揭示了影响黄土丘陵区次降雨的泥沙输移比的主导因子,建立了桥沟流域次降雨泥沙输移比计算公式。计算公式包括了泥沙运动的动力因子—径流侵蚀力,同时考虑了含沙量对泥沙输移比的影响,但在今后还需进一步开展对水蚀力学机理的研究。

[参 考 文 献]

[1] Roehl J E. Sediment source area, 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 agriculture watersheds [J]. Water Resources Bulletin, 1975(11):965-974.

[3] 蔡强国,范昊明. 泥沙输移比影响因子及其关系模型研究现状与评价[J]. 地理科学进展,2004,23(5):1-9.

[4] 刘纪根,蔡强国,张平仓. 岔巴沟流域泥沙输移比时空分异特征及影响因素[J]. 水土保持通报,2007,27(5):6-10.

[5] 袁再健,褚英敏. 四川省紫色土地区小流域次降雨泥沙输移比探讨[J]. 水土保持通报,2008,28(4):36-39.

[6] 张凤洲. 谈泥沙输移比[J]. 中国水土保持,1993,10:17-18.

[7] 李占斌,鲁克新,李鹏,等. 基于径流侵蚀功率的流域次暴雨产沙模型研究[C]//第六届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集. 郑州:黄河水利出版社,2005:54-59.

[8] 许炯心. 黄土高原的高含沙水流侵蚀研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(1):27-35.

[9] 中国水利学会泥沙专业委员会. 泥沙手册[M]. 北京:中国环境科学出版社,1992:175-184.

[10] 吴成基. 陕南河流泥沙输移比问题[J]. 地理科学,1998,18(1):39-44.