

黄丘区不同空间尺度地貌单元产沙特征 及其动力机制*

王玲玲^{1,2} 姚文艺¹ 王文龙² 杨春霞¹

(1 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

(2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 以黄土丘陵沟壑区桥沟流域为原型观测流域, 利用流域内的水文站网、不同地貌单元大型径流场等观测设施, 定量研究了黄土丘陵沟壑区不同空间尺度地貌单元产沙特征, 揭示不同空间尺度地貌单元产沙机制。结果表明, 侵蚀模数随着空间尺度的增加, 呈现出“增加-峰值-减小”的涨落变化过程。在坡面尺度, 侵蚀产沙主要与径流深有关, 径流剪切力可以较好地描述其侵蚀产沙关系, 输沙率随径流剪切力的增加而增加, 而流域尺度的侵蚀产沙不仅与径流深有关, 还与洪峰流量有关, 径流侵蚀功率可以较好地表征其侵蚀产沙关系。

关键词 空间尺度; 地貌单元; 产沙; 动力机制; 黄丘区

中图分类号 S157.1

文献标识码 A

在黄土丘陵沟壑区集水流域从分水岭至沟谷底的垂向斜坡剖面上, 沟间地与沟谷地的各种侵蚀微地貌和侵蚀方式呈现出有序的垂向排列格局^[1]。国内外学者对不同地貌部位的侵蚀产沙过程、空间分布以及水力学特性进行了不少研究^[2-7], 但多限于室内概化坡面模型试验研究。这些成果为认识坡面尺度的侵蚀产沙规律提供了重要的基础数据。然而, 由于黄土丘陵区复杂的地貌以及降水空间分布不均特征, 使得侵蚀产沙是一个多因素、多层次、多尺度的地学问题, 模拟试验条件下总结的规律和机理尚未在自然条件下得以检验。鉴于此, 本文在黄土丘陵沟壑区选择典型的自然地貌单元, 开展定位观测, 揭示自然条件下不同空间尺度地貌单元侵蚀产沙特征及其动力机制, 以期为土壤侵蚀模型的建立提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

以黄土丘陵沟壑区桥沟流域为原型观测区域, 该流域为自然封禁小流域, 人为干扰相对少。桥沟

流域面积 0.45 km², 主沟长 1.4 km, 不对称系数 0.23, 沟壑密度 5.4 km km⁻²。流域内有两条支沟, 一支沟面积为 0.069 km², 沟长为 870 m, 沟道比降为 4.97%; 二支沟面积为 0.093 km², 沟长为 805 m, 沟道比降为 1.15%。

1.2 定位观测设施

坡面尺度定位观测位于桥沟流域左岸坡面, 布设梁峁坡(HS)、沟谷坡(GS)和坡沟系统(HGS)大型径流场。梁峁坡径流场平均坡度为 22°, 倾斜坡长为 49.2 m, 平均宽度为 10 m, 径流场出口布设分水箱和径流池; 沟谷坡径流场平均坡度为 40°06', 倾斜坡长为 69.3 m, 平均宽度为 19.3 m, 径流场出口布设三角槽; 坡沟系统径流场平均坡度为 32°18', 倾斜坡长为 117 m, 平均宽度为 25.2 m, 径流场出口布设三角槽。径流场观测内容包括每次降水的产流量、产沙量、雨前雨后土壤含水量等。

流域尺度观测设施布设在桥沟流域(QW)的流域出口、一支沟(Q1)、二支沟(Q2), 在各沟口布设水文站。采用三角槽观测, 观测项目有水位、流量、含沙量、泥沙颗粒级配。

研究流域基本概况见图 1。

* 国家重点基础研究发展规划(973 计划)(2011CB403303)、水利部公益性行业专项(201201081)和黄河水利科学研究院基本业务费专项(HKY-JBYW-2010-19)资助

作者简介: 王玲玲(1975—), 女, 河南博爱人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀过程及模拟方面研究。E-mail: wlingling99@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-05-07; 收到修改稿日期: 2012-09-26

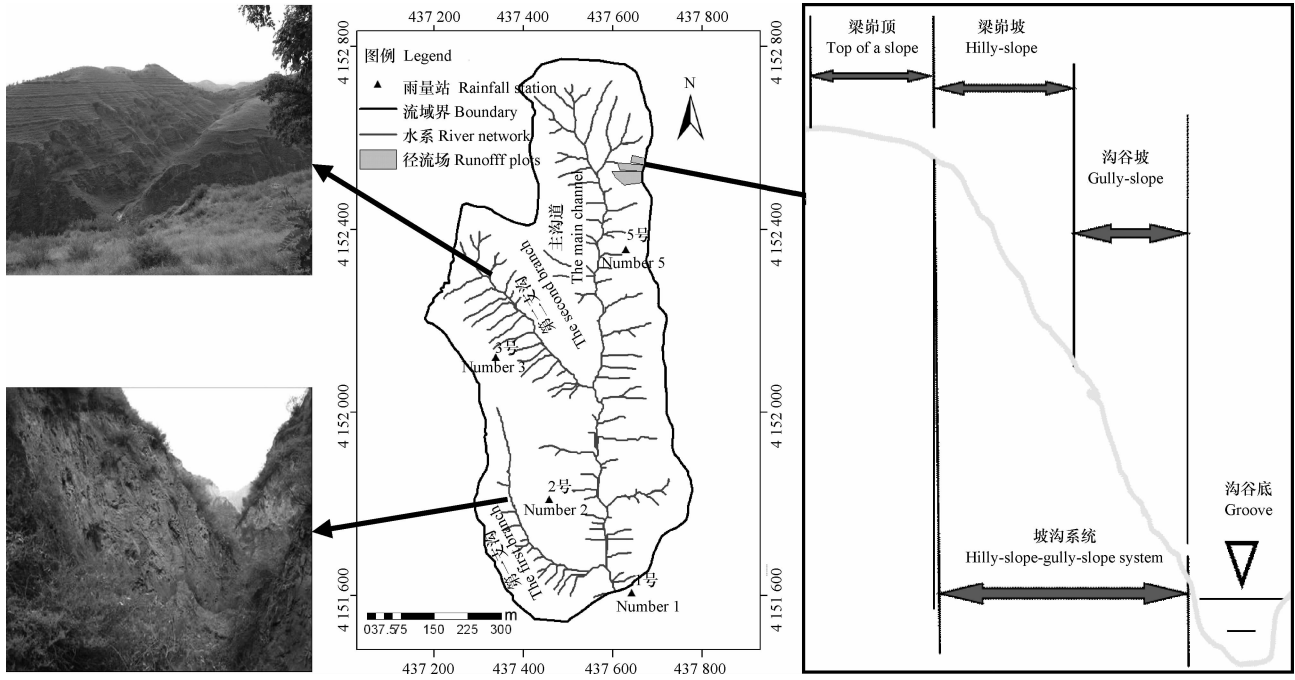


图1 研究区域概化图

Fig.1 A sketch map of the study area

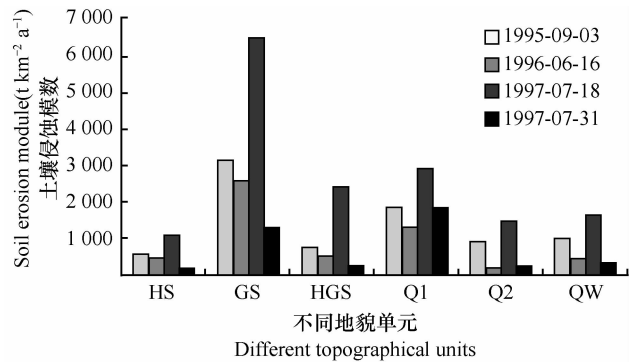
2 结果与分析

2.1 不同尺度地貌单元的产沙特征

A型降雨(降雨量多为10~30mm,降雨历时一般为30~120min)是引起土壤侵蚀的主要降水过程,选择桥沟流域具有A型特征的场次降水(1995年9月3日发生的降水,简称1995-09-03,以下同)条件下径流场、水文站观测资料,统计不同尺度地貌单元次降水侵蚀模数见图2。

从图2可以看出,侵蚀模数随着尺度的增加,基本呈单峰型分布,表现出“增加-峰值-减小”的变化过程。在坡面尺度,从梁峁坡至沟谷坡为增加趋势,在沟谷坡达到峰值;在流域尺度,随着流域尺度的增加,侵蚀模数呈减小的趋势。侵蚀模数在空间尺度上的涨落过程,反映了黄土丘陵沟壑区坡沟侵蚀产沙关系以及流域泥沙输移的特点。

对于坡面尺度,由于黄土丘陵沟壑区坡面形态具有明显的垂直分带性特征,水力侵蚀作用可划为溅蚀片蚀带-细沟侵蚀带-浅沟侵蚀带-切沟侵蚀带等。在沟谷坡,由于沟道侵蚀活跃,常发生重力侵蚀,导致沟谷坡侵蚀模数最大,这与室内模拟试验总结的规律一致^[8]。



注: HS-梁峁坡, GS-沟谷坡, HGS-沟坡系统, Q1-一支沟, Q2-二支沟, QW-全流域

Note: HS-the hilly-slope, GS- the gully-slope, HGS- the hilly-slope-gully-slope, Q1-the first branch, Q2-the second branch, QW- the whole valley

图2 不同空间尺度地貌单元侵蚀模数

Fig.2 Soil erosion modulus of different topographical units of different spatial scales

对于流域尺度,侵蚀模数随着尺度的增加,侵蚀模数减小,这说明对流域而言,坡面是产沙的主要来源,而沟道(包括支沟和干沟)是泥沙输送的通道,流域出口泥沙量的大小决定于水流挟沙能力的大小。借鉴河道水流挟沙力公式(式(1))^[9]反映流域沟道输沙的能力。

$$S_* = K(U^3/gR\omega)^m \quad (1)$$

式中, S_* 为沟道水流挟沙力, kg m^{-3} ; U 为平均流速, m s^{-1} ; R 为水力半径, m ; g 为重力加速度; ω 为床沙平均沉速, m s^{-1} ; K 为包含量纲的系数, kg m^{-3} ; m 为指数。而水流流速 $U = 1/nR^{2/3}J^{1/2}$, n 为曼宁系数, R 为水力半径, m ; J 为水力能坡。由于黄土丘陵沟壑区小流域地表水流宽浅, 可以认为, $R \approx h$, h 为水深,

m ; $J \approx \sin\theta$, θ 为地面坡度, $^\circ$ 。

由式(1)可知, 水流挟沙力与水流流速呈正相关, 而水流流速与水力能坡呈正相关。因此, 水流挟沙力均与坡度成正相关。以桥沟流域分辨率为 1 m 的 DEM 为数据源, 在 ArcGIS9.0 平台支持下, 提取桥沟流域一支沟、二支沟、全流域的坡度信息, 统计不同坡度分级所占比例见表 1。

表 1 桥沟流域尺度不同地貌单元坡度分级

Table 1 Slope rating of different topographical units in Qiao Gully

地貌单元 Topographical units	各级坡度比例 Slope rating								
	0° ~ 10°	10° ~ 18°	18° ~ 24°	24° ~ 29°	29° ~ 35°	35° ~ 42°	42° ~ 49°	49° ~ 56°	56° ~ 70°
一支沟 The first branch	5	9	9	21	21	14	12	5	4
二支沟 The second branch	15	12	14	19	15	10	7	3	5
全流域 The whole valley	19	16	14	14	10	9	6	6	6

从表 1 可以看出, 流域平均坡度随流域面积增大而减小, 桥沟流域一支沟坡度 $> 24^\circ$ 的面积占一支沟总面积的 77%, 桥沟流域二支沟坡度 $> 24^\circ$ 的面积占二支沟总面积的 59%, 而桥沟全流域坡度 $> 24^\circ$ 的面积占全流域总面积的 51%。由此可见, 一支沟坡度陡峭, 坡面水流挟沙力和沟道水流挟沙力大, 出沟口泥沙量大, 使得土壤侵蚀模数大。随着桥沟流域尺度的增大, 流域平均坡度减小, 沟道水流挟沙力减小, 侵蚀泥沙在沟道内发生沉积, 使得流域土壤侵蚀模数随着尺度的增加而减小。

2.2 坡面尺度地貌单元侵蚀动力机制

在坡面尺度, 坡面径流输沙能力是坡面侵蚀产沙的综合体现, 在目前还没有完善的坡面侵蚀输沙理论条件下, 只能借助于河流动力学及其理论来对坡面流的侵蚀产沙和输沙进行研究。Horton^[10] 最早将坡面流侵蚀作用与水流剪切力联系起来进行分析。随后一系列研究表明, 不同水流类型输沙特征与泥沙的性质、分离作用及规律、泥沙运动形式、径流水动力和径流剪切力等紧密相关。Govers 和 Rauwas^[11] 研究了径流剪切力和单位水流功率对坡面径流输沙的影响, 结果表明用水流剪切力可以预测径流搬运能力。本文依据 Govers 和 Rauwas 研究分析结果, 采用径流剪切力与坡面径流输沙率的关系作一讨论。径流剪切力是分离土壤的主要动力, 在水力学中水流剪切力用下式计算^[12]

$$\tau = \gamma RJ \quad (2)$$

式中, γ 为水流重度, $\gamma = \rho g$, ρ 为水流密度, g 为重力加速度; R 、 J 同上, $R \approx h$ 。

根据观测数据, 点绘坡面尺度不同地貌单元径流剪切力与输沙率的关系(图 3)。

从图 3 中可以看出, 在坡面尺度不同地貌单元的径流剪切力与输沙率之间呈线性关系, 拟合不同空间尺度地貌单元径流剪切力和输沙率之间的关系式如下:

$$\begin{aligned} S_{\text{梁卯坡}} &= 3.610\tau - 51.39 \\ S_{\text{沟谷坡}} &= 23.450\tau - 633.10 \\ S_{\text{坡沟系统}} &= 3.498\tau - 84.79 \end{aligned} \quad (3)$$

径流输沙率主要取决于径流侵蚀能力与地表泥沙的补给能力, 水土界面径流剪切力可以克服土粒之间的黏结力, 使得土粒疏松分散, 从而为径流侵蚀土壤提供物质来源。径流剪切力越大, 作用于土壤的有效剪切力就越多, 剥离的土壤越多, 侵蚀越严重, 径流剪切力与输沙率之间存在一定的耦合关系。对上式进行分析可知, 在不同空间尺度地貌单元存在着某一临界水流剪切力, 大于此阈值不同空间尺度地貌单元才有输沙率出现。上式变换为

$$\begin{aligned} S_{\text{梁卯坡}} &= 3.610(\tau - 14.24) \\ S_{\text{沟谷坡}} &= 23.45(\tau - 27.0) \\ S_{\text{坡沟系统}} &= 3.498(\tau - 24.23) \end{aligned} \quad (4)$$

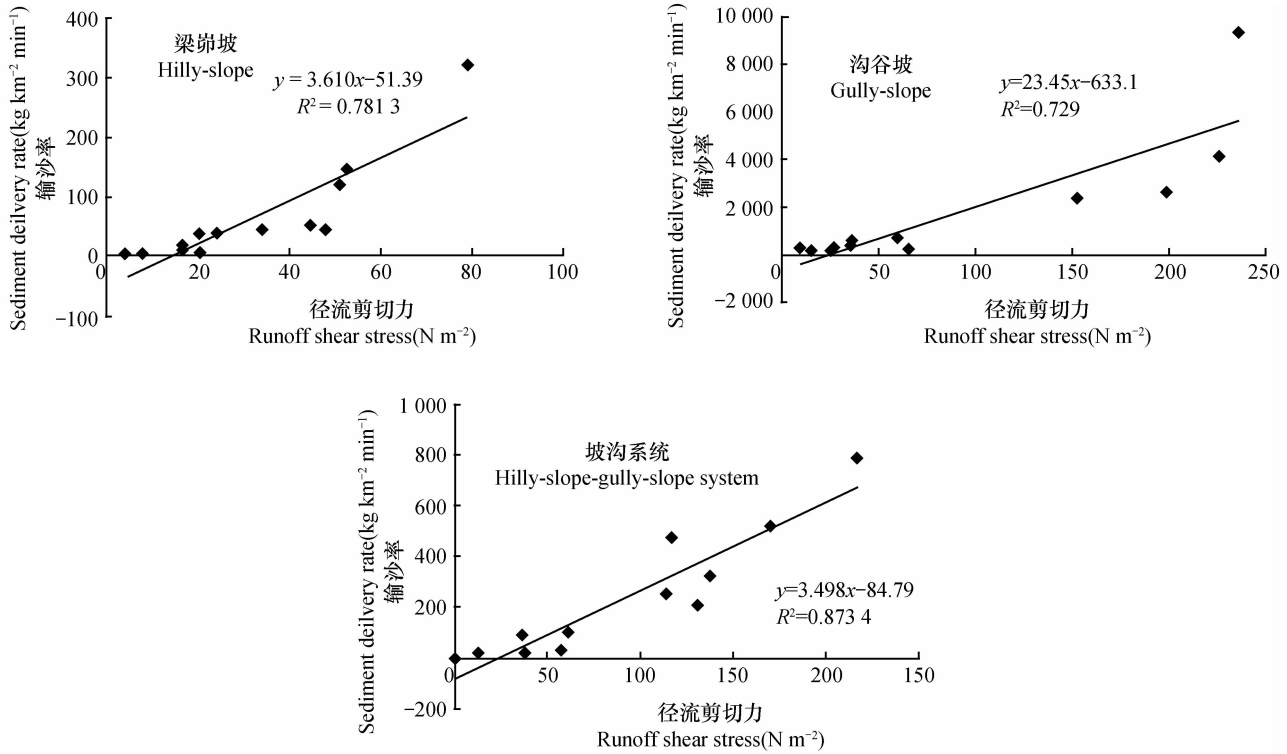


图3 坡面尺度地貌单元径流剪切力与输沙率关系图

Fig. 3 Relationship between runoff shear stress and sediment delivery rate at the slope scale

从式(4)可以看出,在梁峁坡,当径流剪切力 $\tau \geq 14.24 \text{ N m}^{-2}$,输沙率 ≥ 0 ,即 14.24 N m^{-2} 为野外观测条件下梁峁坡临界径流剪切力;在沟谷坡,当径流剪切力 $\tau \geq 27 \text{ N m}^{-2}$,输沙率 ≥ 0 ,即 27 N m^{-2} 为野外观测条件下沟谷坡临界径流剪切力;在坡沟系统 $\tau \geq 24.23 \text{ N m}^{-2}$,输沙率 ≥ 0 ,即 24.23 N m^{-2} 为野外观测条件下坡沟系统临界剪切力,远大于室内模拟试验裸地坡沟系统坡面流的临界剪切力 0.12 N m^{-2} ^[13]和室内试验条件下草被覆盖的坡面的临界剪切力 2.857 N m^{-2} ^[14]。

2.3 流域尺度地貌单元产沙动力机制

与坡面尺度相比,流域侵蚀产沙更为复杂,径流不仅是产生土壤侵蚀的动力,也是输送泥沙的唯一载体,流域内的侵蚀物质最终是与水流一起输送到流域出口的,而水流的输沙能力与水流特性和含沙量紧密相关,其输沙率是含沙量、流速和水深的函数,不同的学者提出了不同的水流输沙率公式^[9, 15]。然而,在坡度陡峭和高含沙水流的黄土高原丘陵沟壑区的极端条件下,所建立的输沙率方程

有一定局限范围。李占斌等^[16]针对黄土高原高含沙水流特征,提出了基于径流深和洪峰流量两个流域次暴雨洪水特征的径流侵蚀功率,计算流域次降雨产沙:

$$\begin{aligned} E &= Q_m H \\ H &= \frac{Q}{F} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, E 为径流侵蚀功率, kg m s^{-1} ; Q_m 为洪峰流量, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$; Q 为洪水总量, m^3 ; F 为流域面积, m^2 。

依据野外观测资料点绘径流侵蚀功率与输沙率之间的关系(图4)。从图中可以看出,二者之间呈密切的幂函数关系,即随着径流侵蚀功率的增加,径流输沙率增加,由幂函数的指数小于1可知,径流侵蚀力达到某值,输沙率变化缓慢,逐渐趋向于一恒定值,这是黄土丘陵区常出现高含沙水流的典型特征,当水流进入高含沙水流后,形成独特的水流流体,使得水流挟沙力表现出许多特殊的性质,只要较小的水流强度即可保持输沙平衡^[17]。

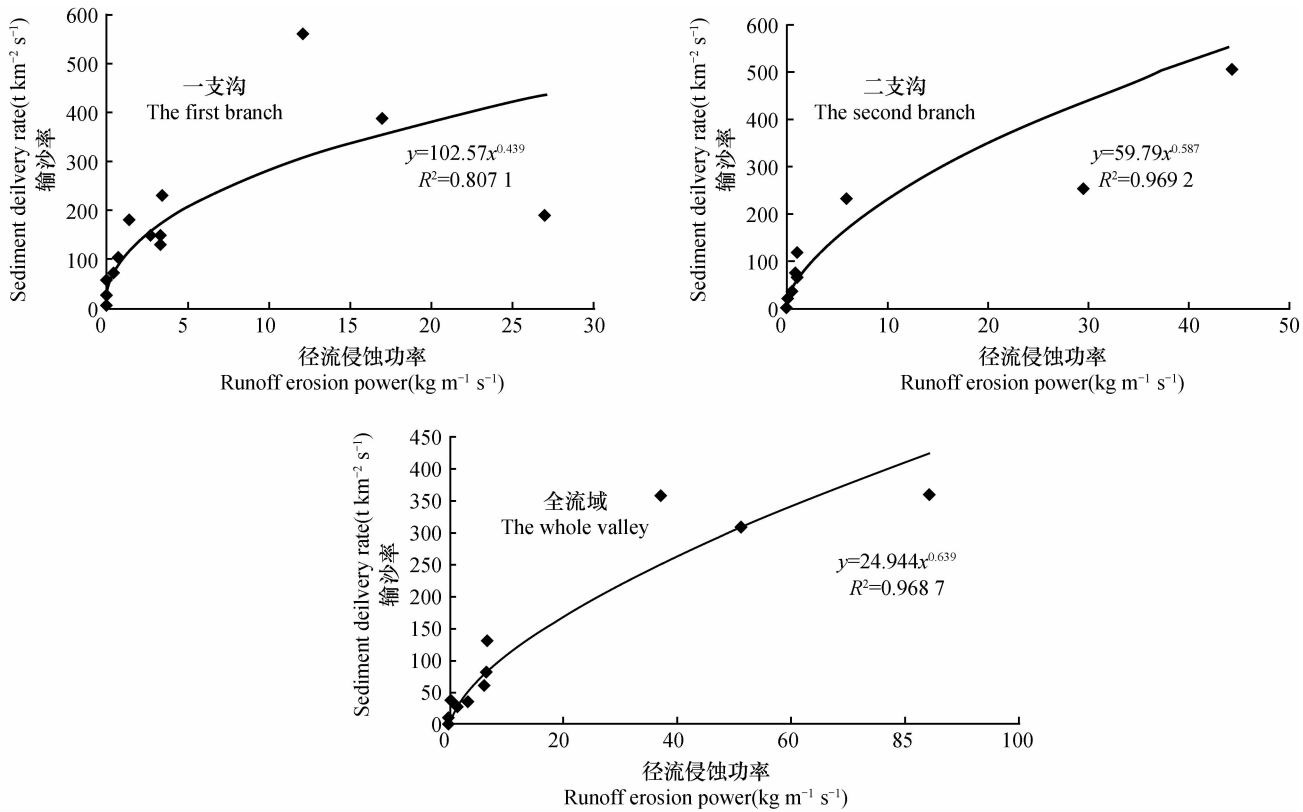


图4 流域尺度不同地貌单元径流侵蚀功率与输沙率关系

Fig. 4 Relationship between runoff erosion power and sediment delivery rate at the watershed scale

3 结论

1) 侵蚀模数随着尺度的增加,呈现出“增加-峰值-减小”的变化过程,这种起伏变化过程,反映了黄土丘陵沟壑区坡沟侵蚀产沙关系以及流域泥沙输移的特点。即沟谷坡和坡沟系统是流域的主要产沙部位,沟道是泥沙的输送通道。

2) 在坡面尺度上,径流剪切力和坡面输沙率存在着明显的线性关系,能较好地描述坡面尺度侵蚀产沙关系。而且,野外观测条件下坡沟系统径流临界剪切力,远大于室内模拟试验裸地坡沟系统和草被覆盖坡面流的临界剪切力。

3) 在流域尺度,侵蚀产沙不仅取决于地表径流深,还要取决于洪峰流量,径流侵蚀功率能较好地描述流域尺度侵蚀产沙关系,径流侵蚀功率和流域输沙率之间呈密切的幂函数关系。

本文仅在现有的观测条件下对不同空间尺度地貌单元的侵蚀产沙特征进行了一定的探讨。今后,还需要深入研究不同地貌单元之间泥沙的输送及互馈关系。

参考文献

- [1] 胡世雄, 靳长兴. 坡面动力侵蚀过程的实验研究进展. 地理科学进展, 1999, 18(2): 103—110. Hu S X, Jin C X. The recent development of experiment on hillslope erosion processed (In Chinese). *Process in Geography*, 1999, 18(2): 103—110
- [2] 郑粉莉, 康绍忠. 黄土坡面不同侵蚀带侵蚀产沙关系及其机理. 地理学报, 1998, 53(5): 422—428. Zheng F L, Kang S Z. Erosion and sediment yield in different zones of Loess slopes (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(5): 422—428
- [3] 肖培青, 郑粉莉, 姚文艺. 坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征研究. 水科学进展, 2009, 20(2): 236—240. Xiao P Q, Zheng F L, Yao W Y. Flow pattern and hydraulic parameter characteristics in hillslope-gullyslope system (In Chinese). *Advances in Water Science*, 2009, 20(2): 236—240
- [4] 王文龙, 雷阿林, 李占斌, 等. 黄土区坡面侵蚀时空分布与上坡来水作用的实验研究. 水利学报, 2004(5): 25—32. Wang W L, Lei A L, Li Z B, et al. Experimental study on spatial and temporal distribution of erosion on Loess slope (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(5): 25—32
- [5] 丁文峰, 李勉, 张平仓, 等. 坡沟系统侵蚀产沙特征模拟试验研究. 农业工程学报, 2006, 22(3): 10—14. Ding W F, Li M, Zhang P C, et al. Experimental study on the sediment yield characteristics in slope-gully system (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(3): 10—14

- [6] 丁文峰, 李勉, 姚文艺, 等. 坡沟侵蚀产沙关系的模拟试验研究. 土壤学报, 2008, 45(1): 32—39. Ding W F, Li M, Zhang P C, et al. Simulation of sediment yielding in relation to slope and gully (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(1): 32—39
- [7] 陈浩. 黄土丘陵沟壑区流域系统侵蚀与产沙关系. 地理学报, 2000, 55(3): 354—363. Chen H. Relationship between erosion and sediment yield in drainage basins of Loess Gully-Hilly area (In Chinese). *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(3): 354—363
- [8] 王文龙, 雷阿林, 李占斌, 等. 黄土区不同地貌部位径流泥沙空间分布试验研究. 农业工程学报, 2003, 19(4): 40—44. Wang W L, Lei A L, Li Z B, et al. Spatial distribution of runoff and sediment on the different topography position of vertical belts in loess region of hilly (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(4): 40—44
- [9] 王兴奎. 河流动力学基础. 北京: 中国水利水电出版社, 1961. Wang X K. *Fundamental river mechanics* (In Chinese). Beijing: China WaterPower Press, 1961
- [10] Horton R E. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1945, 56: 275—370
- [11] Govers G, Rauwas G. Transporting capacity of overland flow on plane and irregular beds. *Earth Surface Process and Landform*, 1986, 11(5): 515—524
- [12] 张耀先, 丁新求. 水力学. 郑州: 黄河水利出版社, 2002. Zhang Y X, Ding X Q. *Hydraulics* (In Chinese). Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2002
- [13] 肖培青, 郑粉莉, 姚文艺. 坡沟系统侵蚀产沙及其耦合关系研究. 泥沙研究, 2007(2): 30—35. Xiao P Q, Zheng F L, Yao W Y. Study on the sediment yield and coupling mechanism of slope-gully system (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2007(2): 30—35
- [14] 肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究. 水利学报, 2011, 42(2): 232—237. Xiao P Q, Yao W Y, Shen Z Z, et al. Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(2): 232—237
- [15] 陈元深. 均匀沙推移质输沙率的统计分析. 武汉大学学报: 工学版, 1986, 6: 1—8. Chen Y S. Statistical analysis on bed-load function for uniform particles (In Chinese). *Engineering Journal of Wuhan University*, 1986(6): 1—8
- [16] 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//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. Li Z B, Lu K X, Li P, et al. Study on the soil erosion model for rainstorm based on runoff erosion power//The sixth national basic theory of sedimentation research symposium (In Chinese). Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2005: 54—59
- [17] 许炯心. 黄土高原的高含沙水流侵蚀研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 27—35. Xu J X. Erosion and sediment yield of hyperconcentrated flows on Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1999, 5(1): 27—35

CHARACTERISTICS AND HYDRODYNAMIC MECHANISM OF SEDIMENT YIELD IN DIFFERENT TOPOGRAPHICAL UNITS OF DIFFERENT SPATIAL SCALES IN LOESS HILLY-GULLY REGION

Wang Lingling^{1,2} Yao Wenyi¹ Wang Wenlong² Yang Chunxia¹

(1 Institute of Yellow River Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

(2 College of Natural Resources and Environment, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, shaanxi 712100, China)

Abstract Characteristics and hydrodynamic mechanism of sediment yield in different topographical units of different scales in Loess hilly-gully region were studied using Qiaogou Watershed in that region as prototype for observation and making use of the observation facilities therein including three hydrological stations and three large-scaled field runoff plots, which located in different topographical units. Results show that the soil erosion modulus displayed a trend of “rising-peaking-declining” with the escalation in spatial scale. At the slope scale, sediment yield was mainly related to depth of runoff. The relationship could be well described by runoff shear stress, with which sediment delivery rate increased. At the watershed scale, sediment yield was related not only to runoff depth but also to peak flood flow. Sediment delivery rate was a power function of the runoff erosion power at the watershed scale.

Key words Spatial scale; Topographical unit; Sediment yield; Hydrodynamic mechanism; the Loess Hilly-Gully region