

坡面径流类型对侵蚀产沙及水沙传递关系的影响

张乐涛^{1,2}, 李占斌^{1,3*}, 王杉杉^{1,2}

(1. 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, 杨凌 712100;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048)

摘要: 降雨-径流格局对土壤侵蚀过程具有重要影响, 以团山沟七号全坡面径流场 1961—1969 年间 65 次径流事件的径流泥沙数据为基础, 选取历时、径流深和径流变率为径流过程的特征指标, 采用 K 均值聚类和判别分析相结合的方法, 将坡面径流划分为 5 种类型。其中, A 型径流具有超长历时、低变率、小径流的特点, 是较为特殊的类型, B、C 型径流具有中长历时、中高变率、大径流的特点, D 型径流具有短历时、低变率、小径流的特点, 是最为普遍的类型。E 型径流具有中历时、中变率、中径流的特点。不同径流类型下的输沙模数、平均含沙量及最大含沙量由大到小依次为: C>B>E>D>A, B、E、C 型径流应是坡面径流调控的重点。不同径流类型输沙模数的差异主要来源于径流量(深)的变化, 相同径流量(深)条件下, 不同径流类型输沙模数的差异主要来源于由径流历时和径流变率所引起的水沙传递关系的改变; 与 A 型径流相比, 其作用使 D、E、B、C 型径流的输沙模数相对增大 7.9、6.3、4.8 和 4.5 倍, 增大倍数随径流量(深)的增加呈逐渐减小趋势。通过构建包含主要径流特征指标的动力参数 ζ , 对不同径流类型及径流阶段的径流-泥沙传递关系进行数学描述, 其最优回归关系均符合 $S = a \ln \zeta + b$ 的一般形式, 能合理解释不同径流类型及不同径流阶段含沙量变化的主要驱动因素。研究结果可为坡面径流类型划分、水沙传递关系构建、全面评估坡面径流调控系统的水土保持意义、进一步丰富坡面径流调控理论的内涵提供一定的参考。

关键词: 径流; 坡面; 调控; 径流类型, 全坡面, 侵蚀产沙, 径流调控, 水沙传递关系

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.018

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-20-0124-08

张乐涛, 李占斌, 王杉杉. 坡面径流类型对侵蚀产沙及水沙传递关系的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 124—131. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.018 http://www.tcsae.org

Zhang Letao, Li Zhanbin, Wang Shanshan. Impact of runoff regimes on sediment yield and sediment flow behavior at slope scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 124—131. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.20.018 http://www.tcsae.org

0 引言

降雨-径流格局与侵蚀产沙过程间的关系是土壤侵蚀规律研究中的基本关系之一。有效辨识这一基本关系对于深入认识水力侵蚀的主要动力来源及其侵蚀产沙过程, 完善不同尺度侵蚀防护措施设计并促进水土保持措施防护效益的综合评估具有重要的理论指导意义^[1-7]。坡面径流作为水力侵蚀的基本侵蚀营力、动力传输纽带和泥沙输移载体, 是造成水土流失的主导因子^[8-10]。水土保持措施对径流时空格局与过程的调节作用及其侵蚀产沙效应是小流域水土保持措施优化配置的重要依据, 而水力侵蚀的控制亦应以坡面径流调控为基本导向^[8,9]。近年来, 坡面径流调控的水沙效应及其减蚀机理^[11-12]、水土保持治理措施配置及其减水减沙效益评价^[13-14]等方面的研究广为关注, 研究集中于降雨条件下不同水土保持措施对坡面、流域径流及输沙调节作用的分析。然而, 由于未能系统揭示不同径流类型对侵蚀产沙过程及水沙传

递关系的影响, 目前尚不能明确水土保持措施的水沙调控效益对径流时空分配格局间的响应关系, 限制了对水土保持措施治理效益的全面认识和综合评估。

在干旱半干旱的黄土高原地区, 因地下水埋深较大, 水土流失综合治理措施虽能减少流域径流量^[15], 却难以调节径流的年内分配。同时, 鉴于该区土壤侵蚀的特殊性, 往往是一次大暴雨所引起的侵蚀量占年侵蚀总量的 60% 甚至 90% 以上^[16], 因而凸显了调节次洪水过程的时空尺度效应的重要性, 而雨洪侵蚀条件下水沙传递关系的研究往往也忽略了不同径流类型的调节作用^[7,17]。因此, 侵蚀产沙过程对不同径流类型的响应关系亟需进一步澄清。黄土高原丘陵沟壑区独特的侵蚀环境造就了大量典型的次暴雨洪水侵蚀事件, 解析不同径流类型下的水沙过程有助于进一步阐明径流调控的水土保持意义, 为全面评估径流调控在水土保持工作中的地位与作用提供理论依据。

岔巴沟小流域由于具备不同尺度序列的坡面径流场和嵌套流域的水文测站、长时间序列的实测水文泥沙及气象资料完备等条件, 在丘陵沟壑区水沙关系及其变化、流域模型构建等方面的研究具有重要影响^[18-19]。本文以该区团山沟典型全坡面径流场(七号径流场)为研究对象, 以 1961—1969 年间的实测水文泥沙资料为基础, 试图分析次降雨条件下坡面尺度的径流类型及其侵蚀产沙效应, 以期为进一步丰富径流调控理论的内涵和促进水

收稿日期: 2015-08-03 修订日期: 2015-09-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330858)

作者简介: 张乐涛, 男, 山东临沂人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。杨凌 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, 712100. Email: letao_20062006@126.com

*通信作者: 李占斌, 男, 河南镇平人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。杨凌 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, 712100. Email: zbli@ms.iswc.ac.cn

土流失综合防治措施的优化配置、提升水土流失治理水平提供有益启示。

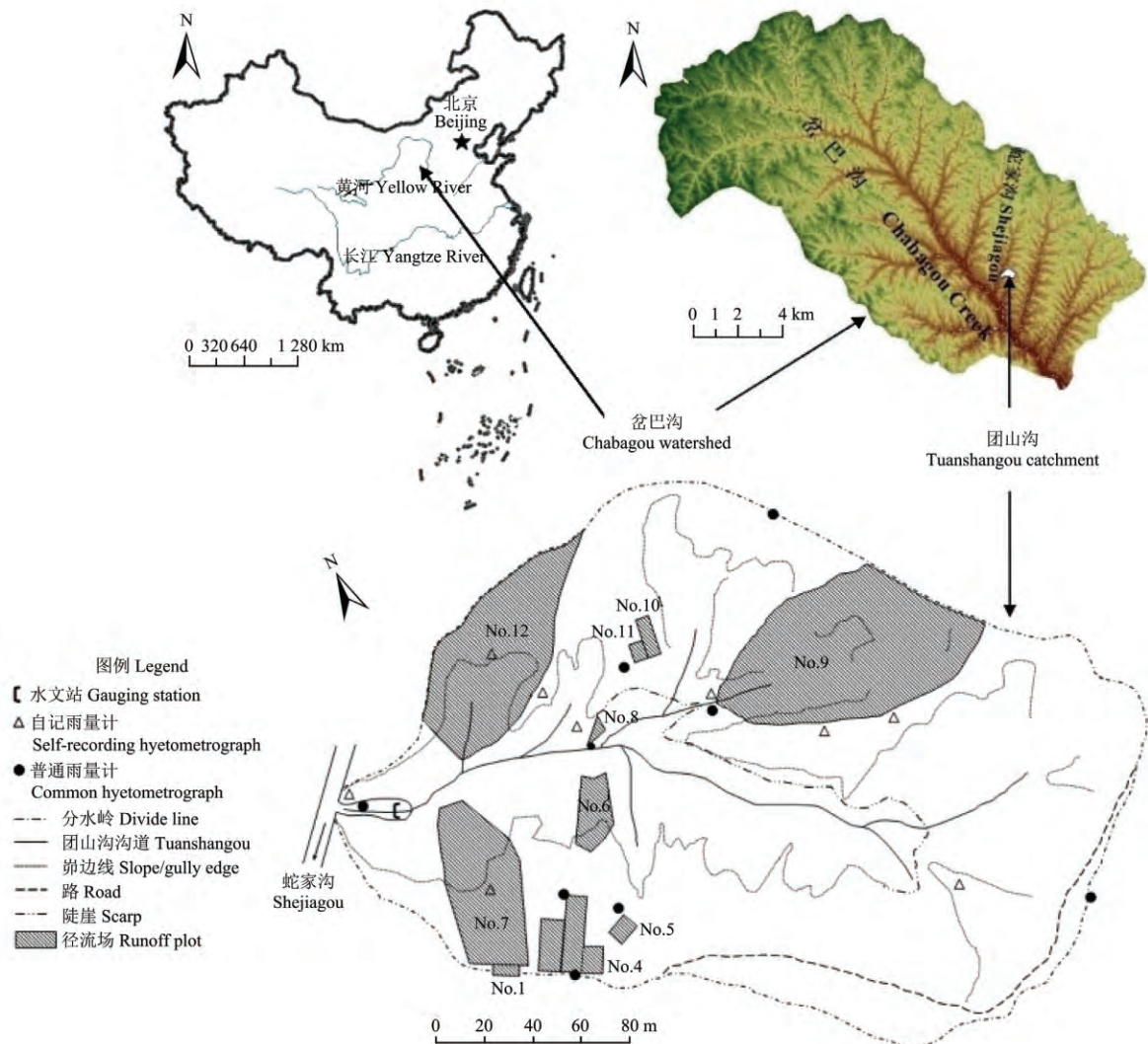
1 研究区概况

子洲径流实验站位于陕西省子洲县境内，始建于 1958 年，于 1969 年撤站。岔巴沟流域位于黄土丘陵沟壑区，37°31'N, 109°47'E, 流域面积 205 km², 海拔高度 900~1 100 m。该区属于半干旱区，1959—1969 年多年平均降水量 480 mm，降雨年内分配极不均匀，70%集中在 6—9 月，多为短历时的高强度暴雨，最大降雨强度为 3.5 mm/min。径流年内分配极不均匀，62%集中于 7—9 月，年平均温度约 8℃，最高气温 38℃，最低气温-27℃，霜冻期约半年。

团山沟集水区位于蛇家沟流域左岸，37°41'N, 109°58'E, 长度 0.63 km, 面积 0.18 km², 比降 135‰, 海

拔高度 950~1 070 m。集水区内共布设 12 个径流场，面积变化范围为 30~17 200 m²，坡度变化范围为 9°~60°，分布于崩顶、崩坡和沟坡等地段，涵盖顺直坡、全坡面等几种坡形。集水区出口处设有水文观测站，主要监测时间 1961—1969 年。本区土壤以黄土母质发育的黄绵土为主，土壤颗粒中粉粒含量高达 60%以上，黏粒含量仅占 5%~8%，有机质含量极低，极易造成侵蚀。区内主要种植谷子、绿豆、马铃薯、苜蓿、高粱等农作物。

团山沟七号径流场为全坡面径流场，长 126 m，宽 45.5 m，囊括条地（19°）、崩坡（24°）和沟坡（60°）3 种主要地貌，土壤类型为黄绵土。总面积（水平投影）因径流场历经几次变更而略有不同，1961 年为 4 650 m²，平均坡度 46°；1962—1964 年为 4 080 m²（1962 年为 4 084 m²），平均坡度 27°；1965—1969 年为 5 740 m²，平均坡度 32°。研究区地理位置及团山沟径流场基本情况如图 1 所示。



注：No.1-12 为坡面径流场编号。
Note: No.1-12 is the identifier of each numbered runoff plot.

图 1 研究区及团山沟径流场地理位置
Fig.1 Location of study area and runoff plots in Tuanshangou Catchment

2 数据来源与研究方法

团山沟七号全坡面径流场 1961—1969 年水文泥沙数据来源于黄河水利委员会子洲径流实验站水文实验资料

(1959—1969 年)。由自记雨量计记录降雨过程，测流建筑物为三角测流槽，详细观测径流过程，所有水沙数据，包括水位、流量、含沙量和输沙量等的测量及采样和实验分析均严格按照国际标准进行^[20]。

团山沟七号径流场 1961—1969 年间共记录 65 次径流过程, 分析径流类型时选用记录的全部径流事件; 分析径流类型对次径流过程水沙关系的影响时, 剔除产沙模数为零并筛选输沙模数 $>1 \text{ t/km}^2$ 的径流侵蚀事件, 以尽可能增加样本数量。团山沟无水土保持措施, 属非治理区, 具有植被覆盖率低的典型旱地农业特征。多年统计结果表明, 尽管种植作物不同, 次径流事件的平均含沙量并无较大变化^[21]。因此, 认为在施测期间 (1961—1969 年) 种植作物和种植方式对坡面产流能力及含沙量的影响是一致的^[21-22], 其作用在本文中亦暂忽略不计。

以径流历时 (T), 最大流量 (q_p), 径流量 (深, H), 平均流量 (q_m), 径流变率 (最大流量与平均流量的比值, RPM) 等指标反映次径流过程的径流特征; 以输沙模数 (M_s), 平均含沙量 (S_m) 和最大含沙量 (S_{max}) 反映次径流侵蚀过程的输沙特征, 对径流-输沙关系进行相关分析。在此基础上, 根据次径流特征综合利用聚类分析、判别分析、方差分析等方法划分不同的径流类型, 分析不同径流类型下的侵蚀产沙特征。最后, 通过回归分析, 利用上述几种径流特征指标的某种组合形式构建水沙关系, 以描述不同径流类型下的含沙量过程, 并解析不同径流侵蚀产沙过程的形成原因。使用 SPSS18.0 进行聚类分析、相关分析和回归分析过程。

3 结果与分析

3.1 坡面次径流过程及侵蚀产沙特征

统计结果 (表 1) 表明, 1961—1969 年间, 全坡面径流事件历时一般较短, 平均径流历时 31.5 min。其中, 历时不超过 40 min 的径流事件 52 次, 占全部径流事件的 80%; 历时超过 60 min 的径流事件共 7 次, 仅占全部径流事件的 10.8%, 其中 2 次径流事件的历时超过 120 min。全坡面的径流事件最大流量较大, 最大流量的平均值为 $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$ 。其中, 最大流量超过 $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ 的径流事件 37 次, 占全部径流事件的 56.9%。最大流量超过 $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$ 的径流事件 15 次, 其中的 9 次最大流量超过 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 。径流深的变化范围为 $0.004 \sim 24.4 \text{ mm}$, 平均为 3.5 mm ; 径流变率最小为 1.3, 最大为 13.5, 平均为 4.3, 径流变率小于 2 的径流事件 12 次, 占全部径流事件的 18.5%; 径流变率的变异系数为 0.62, 表明坡面径流的流量过程具有普遍的非均匀性, 是该区坡面径流过程的基本特征之一。

次径流侵蚀过程的平均含沙量变化范围为 $11 \sim 935.5 \text{ kg/m}^3$, 平均为 481.6 kg/m^3 ; 最大含沙量变化范围为 $12.9 \sim 1120 \text{ kg/m}^3$, 平均为 601.5 kg/m^3 ; 输沙模数变化范围为 $0.05 \sim 17598 \text{ t/km}^2$, 平均为 574 t/km^2 。与径流历时、落水历时、径流变率、平均含沙量和最大含沙量相比, 涨水历时、洪峰流量、径流深、平均流量、输沙模数的变异系数明显较高, 表明径流侵蚀输沙的变化特征受坡面不同径流过程的驱动。

表 2 的结果显示, M_s 与 H 、 q_p 、 q_m 、 T 均显著相关, 表明 H 、 q_p 、 q_m 、 T 均是影响坡面侵蚀产沙过程的重要因素, 其中, M_s 与 H 的相关性数最大, 为 0.99。 S_m 、 S_{max}

与 RPM、 q_m 、 q_p 、 H 、 T 均显著相关, 其中, S_m 、 S_{max} 与 RPM 的相关性系数最大, 分别为 0.62 和 0.61。

表 1 团山沟 7 号径流场 1961—1969 年径流事件统计特征
Table 1 Statistics of runoff events from No.7 runoff plot at Tuanshangou Catchment during 1961-1969

参数 Parameter	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Std. Error	变异系数 Coefficient of variation
T/min	2	170	31.5	28.95	0.92
T_p/min	1	164	12.5	23.91	1.92
T_r/min	1	69	18.3	14.95	0.82
$q_p/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.00004	0.274	0.04	0.06	1.59
H/mm	0.004	24.4	3.5	6.07	1.72
$q_m/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	0.00003	0.048	0.007	0.01	1.54
RPM	1.3	13.5	4.3	2.66	0.62
$M_s/(\text{t} \cdot \text{km}^{-2})$	0.05	17598	2659	4590.22	1.73
$S_m/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	11	935.5	481.6	297.86	0.62
$S_{max}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	12.9	1120	601.5	336.58	0.56

注: T 、 T_p 、 T_r 、 q_p 、 H 、 q_m 、RPM、 M_s 、 S_m 、 S_{max} 分别表示径流历时、涨水历时、落水历时、最大流量、径流深、平均流量、径流变率、输沙模数、平均含沙量和最大含沙量。下同。

Note: T , T_p , T_r , q_p , H , q_m , RPM, M_s , S_m , S_{max} represent runoff duration, Time-to-Peak, time duration of recession, peak discharge, runoff depth, mean discharge, ratio of peak discharge to mean discharge (flow variability), area-specific sediment yield, mean suspended sediment concentration and maximum suspended sediment concentration, respectively. The same as below.

表 2 团山沟七号径流场径流特征与输沙特征变量的皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson correlations between feature variables related to runoff and suspended sediment delivery for No.7 runoff plot at Tuanshangou Catchment

	T	q_p	H	q_m	RPM	M_s	S_m	S_{max}
T	1							
q_p	0.39**	1						
H	0.53**	0.91**	1					
q_m	0.29*	0.95**	0.86**	1				
RPM	0.49**	0.53**	0.45**	0.36**	1			
M_s	0.51**	0.92**	0.99**	0.89**	0.44**	1		
S_m	0.31*	0.58**	0.52**	0.60**	0.62**	0.55**	1	
S_{max}	0.32**	0.49**	0.45**	0.50**	0.61**	0.47**	0.97**	1

注: *表示在 0.05 水平上显著 (双尾), **表示在 0.01 水平上显著 (双尾)。下同。

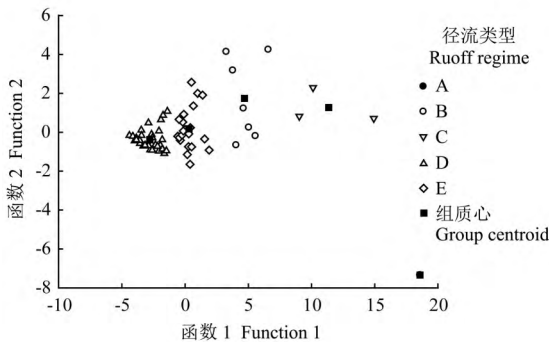
Note: * Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed). ** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed). The same as below.

反映径流特征的指标中, q_p 与 q_m 、 H 、RPM 显著相关; 其中, q_p 与 q_m 、 H 的相关系数均在 0.9 以上, 其所反映的径流信息有所重叠, 在一定的条件下可以相互替代。同时, 鉴于 M_s 与 H 的关系最为密切, 将 H 作为坡面产汇流综合信息的表征, 其反映了下垫面产汇流条件对降雨再分配的综合效应和分配效率。 S_m 、 S_{max} 与 RPM 密切相关, 表明 RPM 可以表征坡面径流潜在侵蚀能力和径流挟沙力的变化, 反映了坡面径流与下垫面条件相互作用所产生的“自我调节”作用, 是对坡面径流的二次分配及其作用效率的综合反映。因此, 筛选 RPM 作为反映坡面径流过程的典型指标。RPM 愈接近 1, 表明坡面径流过程愈均匀, 径流的二次分配效率愈高; 反之, RPM 值愈大, 径流的二次分配效率愈低。就较长时间尺度而言,

对于同一坡面，径流过程的 RPM 值应愈来愈趋于在某一取值范围内波动，反映坡面地表形态等地貌特征对径流过程的调节范围。表 2 的结果表明， T 同时也对上述各项指标产生重要影响。因此，选取 T 、 H 和 RPM 3 个指标综合表征坡面径流过程。

3.2 全坡面径流类型

以 65 场次径流事件为统计样本，以 T 、 H 和 RPM 作为分类变量对径流事件进行系统聚类和 K 均聚类分析。经反复试错和结果检验，综合选择 K 均值聚类分析和判别分析进行分类。聚类结果见图 2。全部径流事件被划分为 5 类（表 3），显著性水平 $P < 0.001$ ，不同类型的判别函数散点图均较为聚集，表明分类结果较为合理。



注：A，超长历时、低变率、小径流；B，中长历时、中变率、大径流；C，长历时、高变率、大径流；D，短历时、低变率、小径流；E，中历时、中变率、中径流

Note: Regime A with super-long duration, low flow variability (the ratio of peak discharge to mean discharge), and minor total discharge (a particular regime); Regime B with relative long duration, medium flow variability, and large total discharge; Regime C with long duration, high flow variability, and large total discharge; Regime D with short duration, low flow variability, and minor total discharge of high frequency; Regime E with medium duration, medium flow variability, and medium total discharge.

图 2 径流类型判别分析结果

Fig.2 Result of discriminant analysis on runoff regimes

表 3 不同径流类型的主要统计特征

Table 3 Main statistical features of different runoff regimes

径流类型/事件数 Runoff regime/ Number	主要统计特征 main statistical features						
	T	T_p	T_r	q_p	H	q_m	RPM
A/1	170	164	6	0.0004	0.27	0.0001	2.87
B/7	58	18	40	0.1391	13.77	0.0220	6.28
C/3	104	56	48	0.1196	17.08	0.0152	9.14
D/33	14	5	8	0.0079	0.42	0.0021	2.71
E/21	34	10	24	0.0475	3.26	0.0087	5.50

在 5 种径流类型中，A 型径流历时最长，事件数、 q_p 及 H 最小，具有超长历时、低变率、小径流的特点，是较为特殊的径流类型。B 型径流由中长历时、中变率、大径流的径流事件组成。C 型径流具有长历时、高变率、大径流的特点。D 型径流发生频次最多，占全部径流事件的 50.8%，具有短历时、低变率、小径流的特点，是最为普遍的径流类型。E 型径流各项径流特征的平均值与全部径流事件的平均值最为接近，主要由中历时、中变率、中径流的径流事件组成。

各径流类型累计径流深分别占全部径流事件总径流

深的 0.1%、41.9%、22.3%、6% 和 29.7%，表明 B、E、C 是主要的全坡面径流类型。各径流类型主要径流特征值由大到小依次为： $T, A > C > B > E > D$ ； $H, C > B > E > D > A$ ；RPM, $C > B > E > A > D$ 。

3.3 不同类型径流的侵蚀输沙特征

单因素方差分析表明，径流类型对径流的主要输沙特征均具有重要影响，显著性水平为 $P < 0.001$ 。各径流类型累计输沙量分别占全部径流事件总输沙量的 0.0%、40.1%、24%、5.6% 和 30.3%，表明 B、E、C 型径流对全坡面的侵蚀输沙贡献最大。其中，尤以 B、C 型径流为甚，以占 15.4% 的事件贡献了 64.1% 的输沙量，是坡面径流侵蚀的主要驱动力。

不同径流类型下输沙模数、平均含沙量及最大含沙量由大到小依次为： $C > B > E > D > A$ 。除 A 型径流外，其变化趋势均与各径流类型主要径流特征的变化趋势一致，表明全坡面径流的侵蚀输沙能力受径流类型的影响。中长历时、中高变率、大径流的径流事件（C、B 型径流）具有最大的侵蚀输沙能力，中历时、中变率、中径流的径流事件（E 型径流）侵蚀产沙能力居中，短历时、低变率、小径流的径流事件（D 型径流）侵蚀产沙能力次之，超长历时、低变率、小径流的径流事件（A 型特殊径流事件）侵蚀产沙能力最小（表 4）。

表 4 不同径流类型的输沙特征

Table 4 Characteristics of sediment transport driven by different runoff regimes

径流类型 Runoff regime	M_s	S_m	S_{max}
A	25.9	96.6	241
B	9 879	707	835
C	12 765	738	884
D	287	304	414
E	2 547	658	786

方差分析表明，径流类型对输沙模数的效应量为 64.7%，是影响坡面径流侵蚀输沙的重要因素。径流量（深）反映了坡面产汇流的综合结果，是坡面侵蚀输沙动力的总来源，其直观表象是形成了与之相应的坡面泥沙总输出；径流历时和径流变率则反映坡面径流过程的波动性，深刻影响径流侵蚀动力随时间的分配格局，改变径流挟沙力，造成水沙关系的改变，进而形成不同的含沙量过程。因此，径流类型对坡面径流侵蚀输沙的作用应当至少由两部分构成，即径流量（深）的作用和水沙关系的作用。

图 3 给出了不同径流类型下输沙模数与径流深间的回归关系。直线的斜率表征单位径流深单位面积上的侵蚀产沙能力。不同径流类型单位径流深单位面积上的侵蚀产沙能力大小依次为 $D > E > C > B$ 。以 B 型径流为基准，其余类型与 B 型径流相比，在相同径流量（深）条件下的输沙模数差值 ΔM_s ，即为该类型径流在该径流量（深）条件下由水沙关系改变所引起的输沙量变化。以 D 型径流为例， $\Delta M_s = 220H - 210$ ，当径流深为 6.5 mm 时， $\Delta M_s = 1220$ ，即径流深为 6.5 mm 时，将 D 型径流调节为

B 型径流的过程中, 由于水沙关系的改变使输沙模数下降了 1 220 t/km² (实际差别为 1 355 t/km²)。

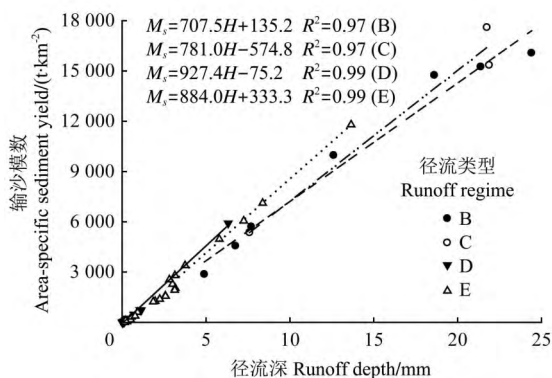


图 3 不同类型径流事件输沙模数与径流深关系

Fig.3 Area-specific sediment yield plotted as a linear function of runoff depth under different regimes

为确定相同径流量(深)条件下, 不同类型径流输沙量间的定量关系, 筛选 24 次输沙模数大于 1 t/km² 的径流事件进行不同径流类型间的对比分析。为增加重复次数, 从中筛选了 12 个对比组。其中, E 型与 D 型对比组 6 个, E 型与 B 型对比组 3 个, C 型与 B 型对比组 2 个, D 型与 A 型对比组 1 个。参与对比的平均径流深为 0.2~23.2 mm, 变异系数为 0.01~0.11, 以 A 型径流为基准, 分别计算不同径流类型在径流量(深)相同条件下的相对输沙模数。

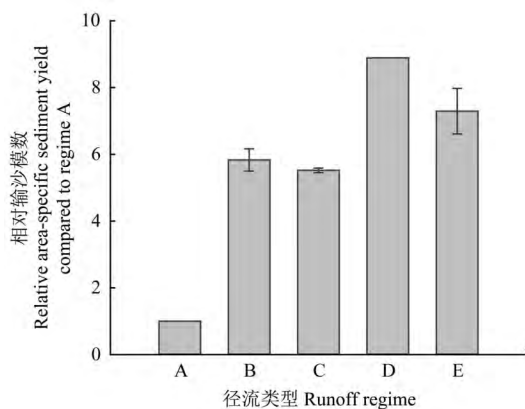


图 4 不同类型径流事件的相对输沙模数

Fig.4 Relative area-specific sediment yield under different runoff regimes

相同径流量(深)条件下, 不同径流类型驱动的输沙模数之比(平均值)为 D: E: B: C: A = 8.9: 7.3: 5.8: 5.5: 1 (图 4), 与图 3 给出的直线斜率大小顺序近似一致。与不同径流类型的径流历时之比相反(径流历时比依次为 1: 2.4: 4.1: 7.4: 12.1), 表明坡面径流量(深)相同的条件下, 径流历时越长, 径流输沙能力越小。

图 5 (S_R 表示不同径流类型输沙模数与 A 型径流输沙模数的比值)给出的结果表明随着径流量(深)的增加, 水沙传递关系改变对增加输沙模数的贡献呈减弱趋势, 意味着随着径流量(深)的增大, 输沙模数的差异越来越多的来源于径流量(深)的作用, 径流量(深)对输沙过程的作用相对增强。

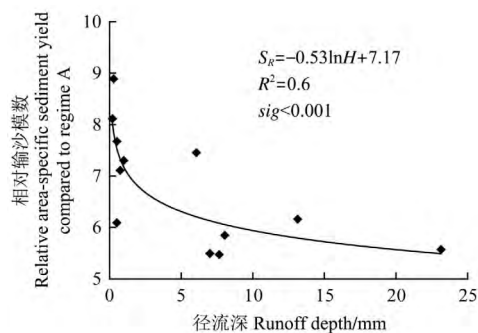


图 5 相对输沙模数随径流深的变化

Fig.5 The relationship of relative area-specific sediment yield to runoff depth

在产生的上述结果中, 径流事件发生期间的坡面下垫面条件(如土壤容重、含水率及糙率等)的变化固然起到重要作用, 而径流自身的侵蚀能量或动力特征及其在径流-泥沙传递过程中的重要作用亦不容忽视。径流势能转化为动能的过程中, 不同径流类型的流量过程影响了能量的转化速率及效率, 改变了径流侵蚀能量与坡面泥沙间的作用关系。正确理解径流类型对坡面径流输沙不同贡献的内在原因, 势必要建立流量过程与能量或动力间的联系, 深入探讨不同径流类型对坡面径流-泥沙传递关系的影响。

3.4 不同径流类型下的水沙传递关系

坡面径流含沙量的变化是坡面径流产沙过程和输沙过程综合作用的结果, 径流-泥沙传递关系的有效辨识是构建合理的侵蚀产沙预测及预报模型的基本前提。为合理确定不同径流类型下的水沙传递关系, 选取与前述径流特征相关的过程指标, 进行多元逐步回归分析, 对不同径流类型下的含沙量过程进行数学描述。

假定坡面径流泥沙过程观测的时间间隔为 Δt , 以 q 表示坡面流量过程, 坡面径流场面积为 A , 则观测时段内坡面平均径流深:

$$h = \frac{q\Delta t}{A} \quad (1)$$

$$\text{次径流事件平均径流深 } H = \frac{\sum q\Delta t}{A} = \sum h \quad (2)$$

根据径流侵蚀功率理论^[23], 针对次径流事件作如下定义:

$$\text{径流侵蚀功率 } E = q_p \cdot H = q_p \cdot \sum h \quad (3)$$

$$\text{流量过程之于最大流量的变率 } \lambda = \frac{q}{q_p} \quad (4)$$

$$\text{流量过程之于平均流量的变率 } \lambda_0 = \frac{q}{q_m} \quad (5)$$

$$\text{则, } \frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{q_p}{q_m} = RPM \quad (6)$$

$$\text{有效径流侵蚀功率 } P = \lambda \cdot E = q \cdot H \quad (7)$$

$$\text{平均径流侵蚀功率 } W = \frac{E}{RPM} = q_m \cdot H \quad (8)$$

式中: h 、 H 表示径流深, m; λ 、 λ_0 、 RPM 均表示径流变率, 无量纲; E 、 P 、 W 表示径流侵蚀的作用功率, m⁴/s。

根据式 (3)、(7)、(8)，如下指标用以反映次径流事件径流侵蚀力的变化。

$$\varepsilon = q_p \cdot h \quad (9)$$

$$p = q \cdot h \quad (10)$$

$$\omega = q_m \cdot h \quad (11)$$

式中： ε 、 p 、 ω 反映次径流事件径流侵蚀作用功率随径流过程的变化， m^4/s 。

选择上述 q 、 h 、 λ 、 λ_0 、 ε 、 p 、 ω 等单一或复合指标，进行多元逐步回归分析，建立不同径流类型下次径流事件含沙量 S 与径流侵蚀动力 ζ 间的回归关系。

表 5 表明，针对不同类型下的次径流过程，表征水沙传递关系的动力参数 ζ 分别包含径流深、流量或二者组合的指标，其最优回归关系均符合 $S = a \ln \zeta + b$ 的一般形式，可决系数均 R^2 均在 0.5 以上，显著性水平为 $P < 0.001$ 。径流量（深）表征了坡面径流的累加效应（径流量增加，产沙量增大），流量则表征径流的瞬时作用强度（流量增大，径流挟沙力增加），二者的组合指标的不同指数则表征二者对输沙作用的贡献比例。因此，含沙量过程是坡面径流综合性作用与时效性作用相结合产生的结果，也体现出坡面径流过程阶段性与连续性的统一。

其中，B 型径流的含沙量过程主要受径流量（深）驱动，C 型径流的含沙量过程主要受平均径流侵蚀功率驱动（对于次径流事件，因平均流量相同，仍主要受径流深驱动），D、E 型径流的含沙量过程受径流变率及径流侵蚀功率的共同影响（对于次径流事件，因最大流量相同，径流深与流量的贡献比例为 2:1，径流深的作用仍占主导地位）。表明 B、C 型径流产沙能力大（径流量大），径流挟沙能力的作用被径流量的作用所掩盖（流量的指数为 0）；而 D、E 型径流产沙能力较小，径流挟沙力有限，反倒凸显径流变率在输沙过程中的作用。在径流量相同的情况下，不同径流类型在理论上具有相同的产沙

能力，而由于 E 型径流历时短，相对增强了径流的输沙能力，造成输沙模数的增大；C 型径流历时长，输沙过程受制于径流的产沙能力，径流变率虽大，但对输沙过程不起决定性作用，输沙模数相对减小。因此，径流历时的显著差异改变了坡面径流产沙作用与输沙作用的对比关系，造成上述输沙模数的不同。

从不同径流阶段看，尽管动力参数构成指标有所不同，其不同径流阶段对含沙量的作用规律未发生变化，其最优回归关系依然符合 $S = a \ln \zeta + b$ 的一般形式，可决系数 R^2 均在 0.5 以上，显著性水平为 $P < 0.001$ 。随着径流阶段由涨水段转向落水段，径流深与流量的作用对比发生变化。径流深的驱动作用集中于涨水段，流量及径流变率的作用集中于落水段，意味着涨水段是主要的产沙过程，而落水段是主要的输沙过程。表明坡面径流的含沙量过程是一次侵蚀、多次搬运的结果。

在涨水段，B 型径流的含沙量过程主要受径流深驱动；C 型径流主要受径流侵蚀功率驱动；D、E 型则受径流变率和径流侵蚀功率的双重驱动，径流变率（增大）呈现正面作用（指数为正）。在落水段，B 型径流的含沙量过程受径流变率和径流侵蚀功率的双重影响；C、D、E 型径流则主要受径流变率和流量的双重影响，径流变率（减小）的作用也转向负面（指数为负）。由于低含沙水流运动能耗较低，径流能量主要用于土壤颗粒分离，涨水段泥沙输移过程主要受制于径流的分离能力，径流变率促进了含沙量的增大，形成涨水段含沙量陡涨的特点。随着含沙量进一步增大，能效系数增大，在 400 kg/m^3 左右达至最大^[24]；进入高含沙水流范畴后，能效系数降低，落水段泥沙输移过程主要取决于径流的搬运能力。由于阻力减小，较小的能耗即可维持高含沙水流的运动，径流变率抑制了含沙量的降低，加之涨水段径流量的后续效应（分别表现为参数中径流深、平均流量和最大流量等指标，其指数为正），输沙过程变的平稳，形成落水段含沙量缓落的特点。

表 5 不同径流类型下的水沙响应关系

Table 5 Flow-sediment relationships under different runoff regimes

径流类型 Runoff regime	综合 Combined		涨水段 Rising limb		落水段 Recession limb	
	参数结构 Parameter structure	水沙响应关系 Flow-sediment relationship	参数结构 Parameter structure	水沙响应关系 Flow-sediment relationship	参数结构 Parameter structure	水沙响应关系 Flow-sediment relationship
B	$\zeta = h$	$S = 96.2 \ln \zeta + 1431$ ($R^2=0.73$, $n=108$, $sig < 0.001$)	$\zeta = h$	$S = 91.7 \ln \zeta + 1375$ ($R^2=0.72$, $n=52$, $sig < 0.001$)	$\zeta = \lambda^2 \varepsilon = q^2 \cdot h \cdot q_p^{-1}$	$S = 31.6 \ln \zeta + 1114$ ($R^2=0.74$, $n=56$, $sig < 0.001$)
C	$\zeta = \omega = q_m \cdot h$	$S = 115.7 \ln \zeta + 2101$ ($R^2=0.65$, $n=82$, $sig < 0.001$)	$\zeta = p = qh$	$S = 74.2 \ln \zeta + 1523$ ($R^2=0.75$, $n=57$, $sig < 0.001$)	$\zeta = \lambda_0^{-2} q^3 = q \cdot q_m^2$	$S = 50.6 \ln \zeta + 1391$ ($R^2=0.69$, $n=25$, $sig < 0.001$)
D	$\zeta = \lambda \varepsilon^2 = q \cdot h^2 \cdot q_p$	$S = 34.6 \ln \zeta + 1576$ ($R^2=0.5$, $n=134$, $sig < 0.001$)	$\zeta = \lambda \cdot p^2 = q^3 \cdot h^2 \cdot q_p^{-1}$	$S = 30.8 \ln \zeta + 1477$ ($R^2=0.52$, $n=77$, $sig < 0.001$)	$\zeta = \lambda^{-1} q^2 = q \cdot q_p$	$S = 88 \ln \zeta + 1517$ ($R^2=0.68$, $n=57$, $sig < 0.001$)
E	$\zeta = \lambda \varepsilon^2 = q \cdot h^2 \cdot q_p$	$S = 38.1 \ln \zeta + 1625$ ($R^2=0.63$, $n=192$, $sig < 0.001$)	$\zeta = \lambda \cdot \varepsilon^2 = q \cdot h^2 \cdot q_p$	$S = 40.9 \ln \zeta + 1672$ ($R^2=0.69$, $n=87$, $sig < 0.001$)	$\zeta = \lambda^{-1} \cdot q^3 = q^2 \cdot q_p$	$S = 49.3 \ln \zeta + 1308$ ($R^2=0.66$, $n=105$, $sig < 0.001$)

4 结论与讨论

1) 径流历时、径流深及径流变率可用以描述全坡面径流的基本特征。团山沟七号全坡面径流场 1961—1969 年间 65 次径流事件按以上 3 个指标可划分为 5 种不同类型。其中，超长历时、低变率、小径流的 A 型径流是极为特殊的一类，仅包含 1 次径流事件；短历时、低变率、

小径流的 D 型径流最为普遍，而中长历时、中高变率、大径流的径流类型（B、C 型径流）与中历时、中变率、中径流的 E 型径流贡献了坡面累积径流深的 93.9%，最主要的全坡面径流类型。

2) 径流类型显著影响坡面径流侵蚀输沙特征，不同径流类型下的输沙模数、平均含沙量及最大含沙量由大到小依次为：C>B>E>D>A，B、E、C 型径流对全坡

面的侵蚀输沙贡献最大,为坡面径流侵蚀的主要驱动力,是坡面径流调控的重点。

3) 径流类型通过影响水沙关系,调节了坡面的泥沙输出。径流深相同的条件下,不同径流类型间输沙模数的相对大小为: $D:E:B:C:A = 8.9:7.3:5.8:5.5:1$,与不同径流类型的径流历时之比相反。表明坡面径流过程的“自我调节”作用对坡面侵蚀输沙量具有重要影响。坡面水土保持措施的水沙调控效益评估亦应考虑调控系统所产生的间接效应,即由径流历时延长引起径流-泥沙传递关系的改变所产生的侵蚀输沙效应。

4) 表征水沙传递关系的动力参数 ξ 分别包含径流深、流量、径流变率或不同组合的指标,对于不同径流类型及不同径流阶段,其最优回归关系均符合 $S = aIn\xi + b$ 的一般形式,可决系数 R^2 均在 0.5 以上,显著性水平为 $P < 0.001$ 。不同指标对产沙过程和输沙过程作用的对比变化,形成了不同径流类型下的含沙量过程。对于 C、D、E 三种径流类型,基于流量(包括瞬时流量、平均流量、最大流量和径流变率)和径流深的不同侵蚀功率指标(有效径流侵蚀功率、平均径流侵蚀功率和径流侵蚀功率)能够反映径流量的累加效应及流量的瞬时作用强度,在描述径流-泥沙传递关系方面具有一定的优势。

[参 考 文 献]

- [1] Wei Wei, Chen Liding, Fu Bojie, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J]. Journal of Hydrology, 2007, 335(3-4): 247-258.
- [2] 秦伟, 左长清, 晏清洪, 等. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 124-132.
Qin Wei, Zuo Changqing, Yan Qinghong, et al. Regularity of individual rainfall soil erosion in bare slope land of red soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(2): 124-132. (in Chinese with English abstract)
- [3] 晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 169-175.
Yan Qinghong, Yuan Cuiping, Lei Tingwu, et al. Effect of rainstorm patterns and soil erosion control practices on soil and water loss in small watershed on loess plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 169-175. (in Chinese with English abstract)
- [4] Peng Tao, Wang Shijie. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China[J]. Catena, 2012, 90(1): 53-62.
- [5] An Juan, Zheng Fen Li, Han Yong. Effects of Rainstorm Patterns on Runoff and Sediment Yield Processes[J]. Soil Science, 2014, 179(6): 293-303.
- [6] Truman C C, Strickland T C, Potter T L, et al. Variable rainfall intensity and tillage effects on runoff, sediment, and carbon losses from a loamy sand under simulated rainfall[J]. J Environ Qual, 2007, 36(5): 1495-1502.
- [7] Li Zhan-Bin, Li Peng, Han Jiangang, et al. Sediment flow behavior in agro-watersheds of the purple soil region in China under different storm types and spatial scales[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105(2): 285-291.
- [8] 赵西宁, 吴普特, 黄俊, 等. 黄土高原降雨径流调控利用应用基础研究评述[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(1): 32-38.
Zhao Xining, Wu Pute, Huang Jun, et al. Review of applied basis research on regulation and utilization of rainfall runoff in Loess Plateau of China[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(1): 32-38. (in Chinese with English abstract)
- [9] 郭廷辅, 段巧甫. 径流调控理论是水土保持的精髓--四论水土保持的特殊性[J]. 中国水土保持, 2001(11): 1-5.
Tingfu Guo, Qiaofu Duan. The theory of runoff regulation and control is the quintessence of soil and water conservation[J]. 2001, (11): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [10] Foster G R, Lombardi F, Moldenhauer W C. Evaluation of rainfall-runoff erosivity factors for individual storms[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 25(1): 124-129.
- [11] 吴淑芳, 吴普特, 原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 14-19.
Wu Shufang, Wu Pute, Yuan Lifeng. Hydraulic characteristics of sheet flow with slope runoff regulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 14-19. (in Chinese with English abstract)
- [12] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究[J]. 水利学报, 2010, 41(7): 870-875.
Wu Shufang, Wu Pute, Song Weixiu, et al. Study on the outflow processes of slope regulated by works and its effects on overland flow and sediment reduction[J]. Shui Li Xue Bao, 2010, 41(7): 870-875. (in Chinese with English abstract)
- [13] 和继军, 蔡强国, 方海燕, 等. 张家口地区水土保持措施空间配置效应评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 69-75.
He Jijun, Cai Qianguo, Fang Haiyan, et al. Effect evaluation of spatial allocation of water and soil conservation measures in Zhangjiakou area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(10): 69-75. (in Chinese with English abstract)
- [14] 袁希平, 雷廷武. 水土保持措施及其减水减沙效益分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 296-300.
Yuan Xiping, Lei Tingwu. Soil and water conservation measures and their benefits in runoff and sediment reductions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(2): 296-300. (in Chinese with English abstract)
- [15] 高照良, 付艳玲, 张建军, 等. 近50年黄河中游流域水沙过程及对退耕的响应[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 99-105.
Gao Zhaoliang, Fu Yanling, Zhang Jianjun, et al. Responses of streamflow and sediment load to vegetation restoration in catchments on the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(6): 99-105. (in Chinese with English abstract)
- [16] 周佩华. 黄土侵蚀机理探讨[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 40-46.
Zhou Peihua. Discussion on Mechanism of Loess Erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1997, 4(5): 40-46. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李占斌, 符素华, 靳顶. 流域降雨侵蚀产沙过程水沙传递关系研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(4): 45-50.
Li Zhanbin, Fu Suhua, Jin Ding. Study on Transference relationship from runoff discharge to sediment discharge in rainfall erosion sediment yield processes of watershed[J].

- 1997, 3(4): 45—50. (in Chinese with English abstract)
- [18] 周玲微, 雷廷武, 武阳. 岔巴沟流域次暴雨产流无量纲模型[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 54—60.
Zhou Lingwei, Lei Tingwu, Wu Yang. Event-based dimensionless models for runoff of Chabagou watersheds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 54—60. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张霞, 李鹏, 李占斌, 等. 黄土高原丘陵沟壑区临界地貌侵蚀产沙特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 129—143.
Zhang Xia, Li Peng, Li Zhanbin, et al. Characteristics of erosion and sediment yield under critical landform in hill-gully area of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(4): 129—143. (in Chinese with English abstract)
- [20] Xu Jiongxin. Erosion caused by hyperconcentrated flow on the Loess Plateau of China[J]. Catena, 1999, 36(1): 1—19.
- [21] Zheng Mingguo, Li Runkui, He Jijun. Sediment concentrations in run-off varying with spatial scale in an agricultural subwatershed of the Chinese Loess Plateau[J]. Hydrological Processes, 2015. DOI: 10.1002/hyp.10576.
- [22] 方海燕, 蔡强国, 李秋艳. 黄土丘陵沟壑区坡面产流能力及影响因素研究[J]. 地理研究, 2009, 28(3): 583—591.
Fang Haiyan, Cai Qiangguo, Li Qiuyan. Study on the runoff generation capacity of slope surface and its influencing factors in a hilly loess region on the Loess Plateau[J]. Geographical Research, 2009, 28(3): 583—591. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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, 2005[C].
Li Zhanbin, Lu Kexin, Li Peng, et al. Prediction of Watershed Sediment Transport for Single Rainstorm Based on Runoff Erosion Power, 2005[C]. (in Chinese with English abstract)
- [24] Shu Anping, Liu Qingquan, Yi Yujun, et al. Characteristics of energy dissipation in hyperconcentrated flows[J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23(4): 387—397.

Impact of runoff regimes on sediment yield and sediment flow behavior at slope scale

Zhang Letao^{1,2}, Li Zhanbin^{1,3*}, Wang Shanshan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry-land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The process of soil erosion is significantly impacted by rainfall-runoff pattern. To investigate the impact of runoff regimes on sediment yield and sediment flow behavior at slope scale, runoff and sediment data was collected and analyzed based on 65 individual runoff events from No.7 runoff plot at entire slope scale at Tuanshangou Catchment. Runoff process was characterized by runoff duration (T), runoff depth (H) and the ratio of peak discharge to mean discharge (flow variability, RPM) based on correlation analysis. Combined method of K-mean clustering, discriminant analysis as well as One-Way ANOVA was utilized to classify the runoff regimes. To quantify the relative impact of different runoff regimes on sediment yield from the same runoff amount (depth), 12 comparative groups were selected to conduct comparative analysis. Furthermore, dynamic indexes termed ζ were constructed with the method of multiple stepwise regression based on main indexes of runoff characteristics to depict the flow sediment behavior under different runoff regimes and runoff phases (rising limb and recession limb). The results showed that the runoff at entire slope scale could be classified into five regimes: Regime A with super-long duration, low flow variability, and minor total discharge (a particular regime); Regime B with relative long duration, medium flow variability, and large total discharge; Regime C with long duration, high flow variability, and large total discharge; Regime D with short duration, low flow variability, and minor total discharge of high frequency; Regime E with medium duration, medium flow variability, and medium total discharge. Area-specific sediment yield, mean suspended sediment concentration and maximum suspended sediment concentration showed great difference between different runoff regimes, which ranked in the order of $C > B > E > D > A$. This indicated that regime B, E, and C should be paid more attention to conduct runoff regulation. The difference of area-specific sediment yield between different regimes mainly derived from the variations in runoff amount (depth); and yet, the effect of altered flow-sediment relationship on area-specific sediment yield was masked. From another perspective, the difference of area-specific sediment yield originated from different regimes with the same runoff amount (depth) mainly derived from the variations in flow sediment behavior. Driven by the variations in sediment flow behavior, in comparison with regime A, the relative area-specific sediment yield from regime D, E, B and C were increased by 7.9 times, 6.3 times, 4.8 times and 4.5 times, respectively. In addition, the increase ratio decreased with the increase in runoff amount (depth). The optimum regression equation between suspended sediment concentration (S) and dynamic parameters (ζ) based on main runoff characteristics obeyed the function form of $S = a \ln \zeta + b$ ($R^2 > 0.5$, $sig < 0.001$), which can interpret the main driving factors resulting in variations in sediment concentration under different runoff regimes and runoff phases. In conclusion, the results may provide some evidence for runoff pattern classification, construction of flow-sediment relationship, overall evaluation on the benefit of runoff regulation system at slope scale, as well as the further enrichment of the theory of slope runoff regulation.

Key words: runoff; slope; regulation; runoff regime; entire slope; soil erosion and sediment yield; runoff regulation; sediment flow behavior