

坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征研究

肖培青^{1,2}, 郑粉莉^{2,3}, 姚文艺¹

(1. 黄河水利科学研究院水利部黄河泥沙重点实验室, 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. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 利用变坡度坡沟系统概化模型和人工模拟降雨试验, 定量分析了在 60、90 和 130 mm/h 降雨强度下坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征。结果表明, 上方汇水和降雨强度的增大使坡沟系统水流雷诺数和弗劳德数呈明显增大, 水流流态由缓流演变为急流, 坡面水流阻力系数明显减小, 从而使坡沟侵蚀产沙量显著增大。

关键词: 坡沟系统; 坡面径流; 径流流态; 水力学参数; 模拟降雨

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2009)02-0236-05

坡沟侵蚀产沙关系的研究源于 20 世纪 50 年代治坡为主还是治沟为主的争论, 其实质反映了侵蚀规律研究的薄弱。随着坡沟系统土壤侵蚀研究的逐渐深入和小流域水土流失治理经验的积累, 在坡沟系统侵蚀过程研究方面取得了一些研究成果^[1~4]。但由于黄土高原坡沟系统的复杂性和室内外试验条件的限制, 已有的研究对于坡沟系统侵蚀产沙关系的定性或经验性描述较多, 坡沟系统水流水力学特征及其与侵蚀产沙量关系的研究甚少。目前已有的研究成果也仅仅是在实验条件下利用径流冲刷槽试验对坡沟水流水力学参数特征进行描述, 而没有考虑上方汇流及其降雨打击力对坡沟水流水力学参数特性的影响^[5,6]。鉴于此, 本文采用变坡度坡沟系统概化模型和人工模拟降雨试验相结合的办法, 研究坡沟系统水流水力学参数变化特征。

1 试验设计与方法

试验在中国科学院水利部水土保持研究所安塞试验站进行, 试验模型以黄土丘陵沟壑区梁峁坡面(分水岭至沟缘线的梁坡)与沟坡(沟缘线至坡脚线)组成的具有完整集水区特征的坡沟系统为原型, 依据黄土丘陵坡度分级、代表性小流域地面坡度组成以及土壤侵蚀方式垂直分带规律等, 设计了模型的坡段数和各坡段的地面坡度, 建立了坡沟系统概化模型。试验模型由概化的梁坡和沟坡系统两部分组成, 其中梁坡水平投影长 7.0 m, 分为 4 个坡段, 沟坡水平投影长 5.0 m。模型宽 3.0 m, 底座高度 0.8 m, 最高处达 6.0 m, 空间形态如图 1 所示。试验模型各坡段的坡度和坡长, 以及代表地类和主要侵蚀方式如表 1 所示。根据以往调查结果和野外大型坡沟径流场地形特征分析^[7], 坡沟系统梁坡坡度在 5°~20°, 沟坡坡度在 35° 的发生频度最大, 梁坡坡面和沟坡坡面面积比例大致控制在 1.4:1.0。因此, 试验所建的坡沟系统概化模型可以基本代表黄土高原丘陵沟壑区第二副区梁坡和坡沟的实际比例关系。

试验用土为陕北安塞(黄土高原)的黄绵土, 填土时不研磨, 不过筛, 保持土的自然结构状态, 采取分层填土法。试验所用降雨设备为侧喷式单喷头的人工降雨机。由于试验模型较大, 试验时采用 3 组降雨机组合进行对喷, 降雨机喷头距地面距离 7.5 m, 喷头上喷高度为 1.5 m, 即雨滴降落到水平地面的垂直高度为 9.0 m。试验设计 3 种降雨强度为 60、90 和 130 mm/h, 降雨的均匀性分别达到 86%、87% 和 92%。试验分沟坡有汇水和无汇水两种情形进行组合试验, 研究 3 种不同降雨强度下坡沟系统的坡面径流流态及水力学参数特征, 每场降雨历时控制为 60 min。当沟坡系统不接受梁坡汇流时, 放置一个具有一定倾斜角度的 U 形断面截留槽在梁坡和

收稿日期: 2008-01-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2007CB407201); 西北农林科技大学创新团队建设计划资助项目(01140202); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金资助项目(10501-209)

作者简介: 肖培青(1972-), 女, 河南卫辉人, 工程师, 博士, 主要从事土壤侵蚀过程研究。E-mail: peiqingxiao@163.com

沟坡系统中间,使来自梁坡的径流泥沙通过截留槽输出,不进入沟坡,这样可分别采集梁坡和沟坡的径流泥沙样。设计的U形断面截留槽长度3m,宽度和高度均为50cm。试验过程中,当不放置截留槽时,梁坡汇流直接进入沟坡,形成完整的坡沟系统,研究梁坡汇流情况下坡沟系统的侵蚀方式演变(片蚀—细沟侵蚀—发育活跃期小切沟侵蚀)及其侵蚀产沙过程。为了完整模拟坡沟系统侵蚀方式演变过程及其对应的水力学参数特征的变化,根据降雨强度的变化连续降雨试验2~3次(即后一次降雨试验是在前一次降雨试验形成的侵蚀形态的基础上进行),使坡面从片蚀演变到细沟侵蚀再最后演变到稳定阶段的切沟侵蚀。确定坡面切沟侵蚀发育处于稳定阶段,是以试验土槽沿坡长方向大部分切沟沟槽下切至试验土槽底部沙层时为准。试验过程中用染色剂法测定了坡面径流平均流速,整个试验坡面分为5段,即断面1、断面2、断面3、断面4、断面5(图1),分别在每个断面上、中、下3处测定断面流速,然后求该断面的平均流速。在测定流速的同时,用测尺和数码相机相结合动态监测沟蚀的形态变化过程(宽度、深度和长度)。

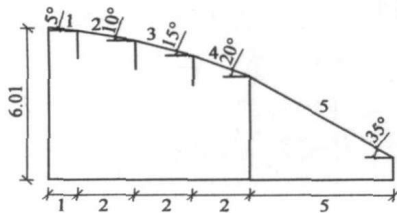


图1 坡沟系统流速测量断面划分示意图(m)

Fig. 1 Schematic of hillslope-gully system

表1 坡沟系统模型的坡段划分与代表意义

空间部位	坡段序号	代表地类	坡度 / (°)	水平投影 / m	主要侵蚀方式
	1	上	5	1	溅蚀、片蚀
沟缘线以上	2	梁坡 中	10	2	片蚀、细沟 坡面侵蚀
	3		15	2	
	4		20	2	
沟缘线以下	5	沟坡	35	5	小切沟、重力侵蚀 沟蚀

2 试验结果与分析

降雨产生的径流具有能量会对坡面土壤产生剥离、输移和沉积作用,伴随此作用的是径流水力学要素。在降雨和径流侵蚀力的作用下,随着降雨时间的延续,坡面侵蚀形态不断发生变化,从而使坡面水流的水力学特性在侵蚀过程中也不断发生变化。坡沟系统侵蚀过程中,水流水力学参数及其流态变化将对侵蚀过程产生重要影响。径流深、过水断面宽、径流平均流速、雷诺数、弗劳德数及阻力系数等水力要素是反映水流动力学特征的主要指标,其中,过水断面宽和径流平均流速是最基本的两个要素,可以通过在试验过程进行测量得到,雷诺数、弗劳德数及阻力系数等其它指标均可以应用相应的明渠水力学公式通过这两个指标进行计算^[8]。通过对径流雷诺数和弗劳德数的计算,可以知道径流是层流还是紊流,是急流还是缓流。一般来说,急流、紊流由于径流本身的紊动作用强,对坡面的剥蚀能力和对土粒的输移能力都较强,故侵蚀力强。缓流、层流则相反。因此通过了解坡面径流的水力学参数变化特征可以从一定程度上了解坡面土壤侵蚀状况。

2.1 雷诺数变化特征

坡沟系统侵蚀过程是一个随时间不断发展变化的过程,不同降雨强度和坡面汇流条件下坡沟系统不同断面的平均径流雷诺数如表2所示。在降雨强度为60 mm/h和90 mm/h时,断面1在沟坡无汇流时雷诺数变化于324~459,有汇流时雷诺数变化于388~497,表明断面1的雷诺数均小于500,坡面水流为层流状态。而坡沟系统其它断面在既定的雨强下,雷诺数均大于500,坡沟水流皆为紊流状态。坡沟系统不同断面有汇流时的雷诺数较无汇流时的雷诺数明显增大,说明坡面汇流后,坡沟系统水流的紊动性增加,从而使侵蚀产沙量增大。当降雨强度由60 mm/h增加90 mm/h,再增加到130 mm/h时,有、无汇流时,坡沟系统各断面的水流皆为紊流,不同断面雷诺数随着降雨强度的增大呈增大趋势。在降雨强度和坡面汇流的共同影响下,坡沟系统各断面的水流雷诺数明显增大。雷诺数是水流流速和水力半径的函数,其值的增大,也就是水力侵蚀能力和搬运能力的增大,因而导致坡沟系统侵蚀产沙量的迅速增大。

表2 不同断面的雷诺数变化特征

Table 2 Reynolds numbers of flow on hillslope-gullyslope system

雨强 /(mm h ⁻¹)	场次	沟坡不接受汇流					沟坡接受汇流				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
60	1	456	633	914	791	616	473	761	1068	931	787
	2	324	516	710	596	519	388	733	897	624	735
	3	402	654	829	787	530	428	717	932	894	808
90	1	426	884	951	1034	751	476	966	1061	1182	1140
	2	459	647	659	624	600	497	766	801	769	937
130	1	546	1092	1088	1012	874	684	1178	1203	1133	922
	2	589	944	914	837	800	752	1005	997	921	802

表2中还可以看出,在相同降雨强度下雷诺数受降雨场次的影响,而降雨场次增加的实质是侵蚀方式的演变。在降雨强度为60 mm/h时,坡沟系统不同断面的雷诺数在第2场降雨时较第1场降雨呈减少的趋势,而第3场降雨时,雷诺数又出现了明显增加的趋势。在降雨强度为90和130 mm/h时,除断面1外,不同断面的雷诺数在第2场降雨时较第1场降雨均呈减少的趋势。出现这种现象的原因是在雨强为60 mm/h时,坡沟系统进行第2场降雨时沟蚀发育活跃,沟蚀出现明显的加宽和下切过程,试验过程中观测到此阶段沟蚀崩塌过程占主导地位,沟道宽度明显增加,径流水深相对减小,雷诺数呈减小趋势。而进行第3场降雨时,由于沟蚀发育过程趋于相对稳定,径流平均流速较第2场降雨增大,因而雷诺数出现了增大的趋势。而在降雨强度为90和130 mm/h时,断面1沿程出现断续的小冲刷坑,使雷诺数随着降雨场次的增加出现了略增加的趋势,而其它各断面在较大雨强时,沟道内径流侧蚀作用增强,流速增大和水深减小的对比结果,导致了雷诺数减小的现象。

2.2 弗劳德数变化特征

径流弗劳德数是表征径流急缓的指标,坡面汇流和降雨强度对整个坡沟系统各段面的径流弗劳德数产生重要影响。从表3可见,当降雨强度为60和90 mm/h时,随着坡面汇流和降雨场次的增加,梁坡不同断面的径流流态由缓流演变为急流状态。沟坡(断面5)无论在坡面有、无汇流条件下,不同降雨场次的各断面径流弗劳德数均大于1,属于急流状态,且有随降雨强度增大逐渐增大的趋势。这主要是由于径流在从坡上向坡下流动过程中,流速不断增大,在径流重力和惯性力的对比关系中,径流惯性力占有的比重越来越大有关,径流在流动过程中惯性力的增大意味着径流扰动土体的能量增大,反映在侵蚀产沙方面侵蚀产沙量的增大。

表3还可以看出,在相同降雨强度下弗劳德数随着降雨场次的增加呈增加的趋势;但在雨强为60 mm/h进行第3场降雨时,各断面的弗劳德数出现了减小到增大的跳跃现象,说明弗劳德数的变化受到了沟蚀发育过程的影响,断面1主要以溅蚀为主受到降雨侵蚀力的作用,从梁坡到坡脚的其它断面,由于沟道内跌坎的突然形成,径流水深增大,出现了个别弗劳德数减小的现象;由于径流自坡上向坡下的汇集作用,径流流速增大,又出现了弗劳德数增大的现象。

表3 不同断面弗劳德数变化特征

Table 3 Froud numbers of flow on hillslope-gullyslope system

雨强 /(mm h ⁻¹)	场次	沟坡不接受汇流					沟坡接受汇流				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
60	1	0.39	0.39	0.58	0.80	1.28	0.41	0.62	0.71	1.02	1.31
	2	0.92	0.98	0.93	1.27	1.67	1.13	1.13	1.11	1.52	1.85
	3	1.30	1.14	1.12	1.17	1.80	1.62	1.39	1.32	1.41	1.87
90	1	0.86	0.93	0.98	1.13	1.26	1.20	1.07	1.22	1.24	1.46
	2	1.14	1.26	1.33	1.45	1.77	1.46	1.28	1.64	1.85	1.90
130	1	1.18	1.07	1.14	1.33	1.73	1.43	1.10	1.41	1.57	2.24
	2	1.29	1.21	1.41	1.75	2.14	1.55	1.32	1.76	2.04	2.99

2.3 阻力系数变化特征

坡面流阻力是指水流在沿坡流动过程中所受到的来自水土界面的摩擦力的阻滞作用和水流内部质点紊动所

产生的阻碍水流运动的力的总称。阻力系数 f 是径流流态、床面粗糙程度、断面特性、水流密度、雨滴直径和水流表面张力系数等因素的综合体现。

根据坡面径流降雨试验实测和计算资料,梁坡汇流进入沟坡系统后,不同断面水流阻力系数呈减小的趋势,且随降雨强度的增大和降雨场次的增加而减少的趋势。从表4可以看出,在不同降雨强度下,有汇流时的坡沟系统水流的阻力系数是无汇流时的0.51~0.97倍。降雨强度由60 mm/h增到90 mm/h和130 mm/h时,有上方汇水汇入坡沟土槽时,阻力系数减少19.7%~42.5%。由于上方汇水的汇入使坡沟水流流量增大而所受阻力的减少,使坡下方的坡沟侵蚀产沙量显著增大。

表4 不同断面阻力系数变化特征

Table 4 Darcy-Weisbach coefficient numbers of flow on hillslope-gullyslope system

雨强 (mm·h ⁻¹)	场次	沟坡不接受汇流					沟坡接受汇流				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
60	1	1.57	3.42	4.77	3.90	3.14	1.26	2.88	3.40	2.47	3.02
	2	0.73	1.29	2.16	1.69	1.90	0.42	0.95	1.53	1.19	1.56
	3	0.38	0.98	1.55	1.95	1.65	0.25	0.67	1.13	1.35	1.55
90	1	0.79	1.36	1.88	2.56	2.48	0.43	1.05	1.27	1.71	2.42
	2	0.49	0.82	1.14	1.30	1.73	0.31	0.80	0.75	0.82	1.47
130	1	0.45	1.26	1.46	1.52	1.79	0.32	1.00	0.98	1.09	1.07
	2	0.39	0.88	1.02	0.92	1.19	0.27	0.75	0.66	0.68	0.61

2.4 坡沟系统径流水力学参数变化的影响因素分析

以上分析可以看出,降雨强度和坡面汇流对坡面径流雷诺数、弗劳德数和阻力系数有重要影响。降雨强度的增大,一方面增大了水流的紊动性,使径流雷诺数和弗劳德数增大,另一方面使侵蚀产沙量增大。阻力系数随降雨强度的增加呈减小的趋势,阻力系数越小,水流克服阻力所消耗的能量越少,则水流用于侵蚀和泥沙输移的能量越大,土壤侵蚀就越严重。随着降雨强度的增大,坡沟系统径流的流雷诺数、弗劳德数呈迅速增大的趋势,而Darcy-Weisbach阻力系数呈减少趋势。在一定的降雨强度下,坡面汇流及其挟带的含沙量对水力学参数有明显的影。坡沟系统沟坡接受上方汇流后,流速随上方汇流含沙量的增加而减少,而水力半径随上方汇流含沙量的增大而增大^[9]。流速和水力半径是反映坡沟系统水流水力学特征的重要指标,雷诺数和弗劳德数是二者之比的综合体现。雷诺数是水流的惯性力与粘滞力之比,弗劳德数是水流的惯性力与重力之比,其中,惯性力起着扰动水体,并使其脱离规则运动的作用。梁坡汇流进入沟坡系统后,惯性力作用显著增强,使雷诺数和弗劳德数增大。同时,上方汇流后,坡沟系统水流出现了不均匀水深,由于局部流速突然增大,冲刷作用相对集中,使坡面水流的阻力系数减少,侵蚀产沙量增大。

3 结 论

通过变坡度坡沟系统概化模型和人工模拟降雨试验,运用水力学理论分析了坡沟系统径流的坡面径流流态和水力学参数特征,主要结论如下:

(1) 梁坡汇流和降雨强度对坡沟系统不同断面的径流雷诺数产生重要影响。在降雨强度为60和90 mm/h时,断面1在有、无汇流时雷诺数均小于500,表明位于分水岭附近坡面的水流为层流状态;而其他4个断面在试验条件下,雷诺数均大于500,水流为紊流状态。雷诺数的变化也受到侵蚀方式演变过程的影响。

(2) 当降雨强度为60和90 mm/h时,在坡面汇流作用下,随着降雨场次的增加,梁坡不同断面的径流流态由缓流演变为急流状态。沟坡(断面5)在不同降雨强度条件下,径流弗劳德数均大于1,属于急流状态。弗劳德数随着降雨强度、坡流面汇流和降雨场次的增加而增加。

(3) 坡沟系统不同断面的阻力系数随降雨强度的增大呈减少的趋势,由于上方水流的汇入使不同断面水流阻力系数呈减少的趋势,从而使坡沟侵蚀产沙量增大。

本文仅在现有的条件下对坡沟系统径流水力学参数特征进行了一定的探讨。今后,还需要研究不同沟道发育变化过程及其高含沙水流条件下坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征。

参考文献:

- [1] 蒋德麒, 赵诚信, 陈章霖. 黄河中游小流域径流泥沙来源初步分析[J]. 地理学报, 1966, 32(1): 20 - 35. (JIANG De-qi, ZHAO Cheng-xin, CHEN Zhang-lin. A preliminary analysis on sediment sources of small watershed in the middle reaches of Yellow River[J]. Acta Geographica Sinica, 1966, 32(1): 20 - 36. (in Chinese))
- [2] 曾伯庆. 晋西黄土丘陵沟壑区水上流失规律及治理效益[J]. 人民黄河, 1980(2): 20 - 25. (ZHENG Bo-qing. Soil and ater loss law and control benefit in loess hilly region of west part of Shanxi Province[J]. Yellow River, 1980(2): 20 - 25. (in Chinese))
- [3] 陈浩, 王开章. 黄河中游小流域坡沟侵蚀关系研究[J]. 地理研究, 1999, 18(4): 363 - 372. (CHEN Hao, WANG Kai-zhang. A study on the slope-gully erosion relationship on small basins in the loess areas at the middle reaches of the Yellow River[J]. Geographical Research, 1999, 18(4): 363 - 372. (in Chinese))
- [4] 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[J]. 泥沙研究, 2007(2): 30 - 35. (XIAO Pei-qing, ZHENG Fer-li, YAO Wen-yi. Study on the sediment yield and coupling mechanism of slope-gully system[J]. Journal of Sediment Research, 2007(2): 30 - 35. (in Chinese))
- [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[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 10 - 14. (DING Wen-feng, LI - Mian, ZHANG Ping-cang, et al. Experimental study on the sediment yield characteristics in slope-gully system[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 10 - 14. (in Chinese))
- [6] 王文龙, 雷阿林, 李占斌. 土壤侵蚀链内细沟浅沟切沟动力机理研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 471 - 475. (WANG Wen-long, LEI A-lin, LI Zhan-bin, et al. Study on dynamic mechanism of rills, shallow furrows and gully in the soil erosion chain[J]. Advances in Water Sciences, 2003, 14(4): 471 - 475. (in Chinese))
- [7] 郑粉莉, 唐克丽, 白红英. 林地开垦后坡沟侵蚀产沙关系的研究[J]. 中国水土保持, 1994, 8: 19 - 20. (ZHENG Fer-li, TANG Ke-li, BAI Hong-ying. Study of sedimnt yield from slope and gully erosion after reclamation of forest land[J]. Soil and Water in China, 1994, 8: 19 - 20. (in Chinese))
- [8] 潘成忠, 上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 490 - 495. (PAN Cheng-zhong, SHANG GUAN Zhou-ping. Hydraulic characteristics of silt laden flow on different gradient grass plots and its mechanism of sediment retention[J]. Advances in Water Sciences, 2007, 18(4): 490 - 495. (in Chinese))
- [9] 肖培青, 郑粉莉. 上方来水来沙对细沟水流水力学参数的影响[J]. 泥沙研究, 2002(4): 69 - 74. (XIAO Pei-qing, ZHENG Fer-li. Effects of up slope runoff and sediment on rill hydraulic parameters[J]. Journal of Sediment Research, 2002(4): 69 - 74. (in Chinese))

Flow pattern and hydraulic parameter characteristics in hillslope-gullyslope system*

XIAO Pei-qing^{1,2}, ZHENG Fer-li^{2,3}, YAO Wen-yi¹

(1. Institute of Yellow River Hydraulic Research, Key Laboratory of Yellow River Sediment Research of Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation CAS & MWR, Yangling 712100, China; 3. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Flow pattern and hydraulic parameter characteristics are quantified under the rainfall intensities of 60, 90, and 130 mm/h using the hillslope-gullyslope system including different slope gradients with the simulated rainfall experiment. The results show that the hillslope runoff discharging into gullyslope or the increase of the rainfall intensity will result in the increase of the Reynolds number and Froude number and the shift of flow pattern from the stratum flow into torrent flow. The hillslope runoff discharging into hillslope-gullyslope system causes the decrease of the Darcy-Weisbach coefficient and the increase of the sediment delivery at the same time.

Key words: hillslope-gullyslope system; hillslope runoff; flow pattern; hydraulic parameter; simulated rainfall

* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2007CB407201).