

上方汇水对黄土坡面侵蚀方式演变及侵蚀产沙的影响

张新和^{1a,2}, 郑粉莉^{1b,2}, 汪晓勇^{1b,2}, 李 靖^{1a}

(1 西北农林科技大学 a 水利与建筑工程学, b 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

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)

【摘 要】 【目的】定量评价坡面上方汇水对坡下方土壤侵蚀方式演变及侵蚀产沙的影响。【方法】利用由位于坡面上部的供水装置和位于坡面下部的试验土槽组成的试验系统,通过人工模拟降雨试验,分析不同降雨强度和坡度条件下,上方汇水对黄土坡面片蚀—细沟侵蚀—一切沟侵蚀方式演变过程及侵蚀产沙量的影响。【结果】当坡面接受上方汇水后,各侵蚀方式演变速度明显加快,侵蚀产沙量迅速增大,且坡面侵蚀产沙增加幅度随上方汇水流量的增加而增大;在坡度和降雨强度相同条件下,坡面侵蚀产沙量和上方汇水引起的坡下方的净侵蚀产沙量,均随坡面上方汇水流量的增加而显著增大;受降雨强度、坡度和坡面侵蚀发育不同阶段的影响,坡面汇水引起的净侵蚀产沙量占总侵蚀产沙量的 15.36%~78.15%。不同降雨强度和坡度条件下,坡面侵蚀产沙量与上方汇水流量呈幂函数关系。【结论】坡面上方汇水强度对坡面侵蚀方式演变和产沙过程具有重要影响,若能有效控制坡面上方汇水,将可有效减少坡面侵蚀产沙量,抑制沟蚀的发生和发展。

【关键词】 上方汇水;侵蚀产沙作用;侵蚀方式演变;模拟降雨;黄土坡面

【中图分类号】 S157.1 【文献标识码】 A 【文章编号】 1671-9387(2008)03-0105-06

Effects of upslope runoff on loessial hillslope erosion pattern evolution process and erosion sediment

ZHANG Xin-he^{1a,2}, ZHENG Fen-li^{1b,2}, WANG Xiao-yong^{1b,2}, LI Jing^{1a}

(1 a. College of Water Resources and Architectural Engineering, b. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry land Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 The research is to quantify the effects of upslope runoff on loessial hillslope erosion pattern evolution process and erosion sediment. 【Method】 An experimental equipment, consisting of a water feed installation and a test box, is used to quantify a contribution of upslope runoff to hillslope erosion and sediment during erosion pattern evolution processes from sheet erosion to rill, and then to gully at different rainfall intensities and slope gradients by using simulated rainfall. 【Result】 The results show that upslope runoff discharging into downslope section greatly quickens the speed of erosion pattern evolution and largely increases hillslope sediment yield. Meanwhile, hillslope erosion and sediment process correspond to erosion pattern evolution process. At the same rainfall intensity and slope gradient, hillslope sediment yield and the net sediment delivery caused by upslope runoff obviously increases as the upslope runoff rate increases. The net sediment deliveries caused by upslope runoff account for 15.39% to 67.87% of the total sediment delivery, which is affected by rainfall intensity, slope gradient, erosion pattern evolution

* [收稿日期] 2007-09-14
[基金项目] 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB407201);国家自然科学基金重点项目(40335050)
[作者简介] 张新和(1976—),男,河南信阳人,在读博士。主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。
[通讯作者] 郑粉莉(1960—),女,陕西蓝田人,研究员,博士,博士生导师,主要从事土壤侵蚀过程及预报和侵蚀环境效应评价研究。

process. The relationship between hillslope sediment yield and the upslope runoff rate is expressed as exponential function. 【Conclusion】 Upslope runoff rate has great influences on erosion pattern evolution and the sediment yield process of loessial hillslope

Key Words: upslope runoff; erosion and sediment contribution; erosion pattern evolution; simulated rainfall; loessial hillslope

在降雨过程中,上坡汇水汇沙是坡面上下不同侵蚀部位之间水流能量转递的媒介,其大小不仅影响下坡的入渗和产流能力,使坡面水流能量发生变化,而且其含沙量大小影响坡下方水流的挟沙能力,进而影响坡面侵蚀发育过程及侵蚀产沙量^[1-6]。因此,阐明上方汇水在坡面侵蚀方式演变过程中的作用及其侵蚀产沙贡献,对加深理解土壤侵蚀过程有重要意义,并可为坡面水沙汇集演算提供重要的科学依据。已有的研究结果表明,坡面上方汇水强度对坡下方的侵蚀强度有重要影响^[7-13],尤其是对浅沟、切沟的发生、发展过程影响极大^[6,14-15]。野外实测资料表明^[6],溅蚀片蚀带水流汇入坡下方细沟侵蚀带,可使坡面侵蚀产沙量增加 30.5%~37.7%,片蚀带+细沟侵蚀带汇水流入浅沟侵蚀带,可使坡面侵蚀产沙量增加 16.7%~80.6%。坡下方侵蚀产沙量随上方汇水强度的增加而增加,而随上方汇水含沙量的增加而减少^[6,8,12-15]。目前,有关坡面汇水对坡面侵蚀演变过程和侵蚀产沙影响的研究还相对薄弱,严重地影响着坡面水沙汇集的演算和侵蚀预报模型的建立。为此,本研究采用自行设计的由位于坡面上部的供水装置和位于坡面下部的试验土槽组成的试验系统,通过人工模拟降雨试验,研究不同降雨强度、不同坡度条件下,上方汇水对坡面侵蚀方式演变过程的影响及其对坡面侵蚀产沙的贡献,以加深对坡面侵蚀规律的认识,为坡面水沙汇集演

算和侵蚀预报的建立提供理论基础。

1 试验设计与研究方法

1.1 试验设计

试验在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土壤侵蚀人工模拟降雨大厅进行。试验装置由位于坡面上部的供水装置和位于坡面下部的试验土槽组成。供水装置由安置在高于试验土槽顶端上部的保持恒定水位的贮水箱、控制阀门、放水软管和紧贴坡面上部的溢流槽组成,上方汇水流量的大小由贮水箱前方底部的阀门控制。试验土槽为可升降钢槽,长 8 m、宽 2 m、深 60 cm,坡度调节范围为 0°~25°,调节步长为 5°。试验设计的降雨强度分别为 50,75 和 100 mm/h,地面坡度分别为 15°,20°和 25°,不同降雨强度下的汇水流量见表 1。试验开始前,根据试验设计的坡面上方汇水流量率定不同阀门控制的开关大小,每个设定流量分别率定 2 次,2 次的误差不超过 5%。试验开始后,根据设计的上方汇水流量打开相应的阀门开关,将软管放入坡面上部的溢流槽,保证上方汇水水流是均匀、平稳的,并以薄层水流形式进入坡面试验土槽,以模拟自然坡面上方汇水对坡下部侵蚀方式演变及侵蚀产沙过程的影响。试验所用降雨设备为侧喷式人工降雨设备。降雨高度为 16 m,可以使所有的雨滴达到终点速度。

表 1 上方汇水对黄土坡面侵蚀产沙影响研究模拟降雨试验设计

Table 1 Experimental design for studying effects of upslope runoff on loessial hillslope erosion and sediment

雨强/(mm·h ⁻¹) Rainfall intensity	坡度/(°) Slope	坡面上方汇水流量/(L·min ⁻¹) Upslope runoff rate							
50	15	0	1.33	2.67	5.33	8.00	10.67	13.3	16.00
	20	0	1.33	2.67	5.33	8.00	10.67	13.3	16.00
	25	0	1.33	2.67	5.33	8.00	10.67	13.3	16.00
75	15	0	2.00	4.00	8.00	12.00	16.00	20.00	24.00
	20	0	2.00	4.00	8.00	12.00	16.00	20.00	24.00
	25	0	2.00	4.00	8.00	12.00	16.00	20.00	24.00
100	15	0	2.67	5.33	10.67	16.00	21.33	26.67	32.00
	20	0	2.67	5.33	10.67	16.00	21.33	26.67	32.00
	25	0	2.67	5.33	10.67	16.00	21.33	26.67	32.00

1.2 试验过程

试验用土为陕北安塞的黄绵土。所有试验土样

自然风干并过 10 mm 筛。试验土槽分层填土,填土前先在其底部装填 10 cm 厚的天然细沙,并铺上透

水纱布。将 50 cm 厚土层分为耕层和犁底层进行填装,其中耕层深度为 20 cm,犁底层深度为 30 cm;每次填土厚度为 5 cm,耕层容重控制在 1.05~1.1 g/cm³,犁底层容重控制在 1.25 g/cm³。填土时采用边填充边压实的方法,以减小边壁对入渗、产流、产沙过程及坡面侵蚀微形态发育等的影响,并使下垫面土壤条件的变异性最小。

为了确保降雨均匀度和降雨强度达到试验要求,每次正式试验前须专门对降雨强度进行率定。降雨试验开始后,试验土槽产流时,立即采集土槽的初始径流泥沙样,然后每隔 1 min 采集 1 次,共采集 8 个径流泥沙样,用秒表记录每次采样时间。然后,打开控制第一个坡面上方汇水流量大小的阀门开关,并将连接软管放入水槽中,1~2 min 后,即土槽达到新的侵蚀平衡时,每隔 1 min 采集 1 次土槽径流泥沙样,共采集 4 个径流泥沙样,关闭上方汇水流量控制阀门。经过 1~2 min 达到新的侵蚀平衡后,再采集土槽径流泥沙样 2 个,用于对比有上方汇水前后的侵蚀产沙变化。至此,对应降雨强度下第一个上方汇水流量下的径流泥沙样采集完毕。然后,重复上述步骤采集不同上方汇水流量条件下的径流泥沙样。降雨试验结束后,测量每一个径流泥沙样的体积,并用烘干法测算径流含沙量和侵蚀产沙量。

为了完整模拟坡面侵蚀过程及坡面上方汇水对坡面侵蚀演变过程的影响,根据降雨强度和坡度变化,在不同试验处理条件下连续进行 2~4 次降雨试验,使坡面从片蚀演变到细沟侵蚀,最后演变到稳定阶段的切沟侵蚀,即后一次模拟降雨是在前一次降雨过程中坡面形成侵蚀形态的基础上进行。对于 50 mm/h 降雨强度和 15°试验处理共进行 4 次连续模拟降雨试验,对于 70 mm/h 降雨强度时,20°和 25°试验处理各进行 2 次连续模拟降雨试验,其他试验处理均进行 3 次连续模拟降雨试验。坡面侵蚀发育过程基本稳定的确定,是以试验土槽沿坡长方向大部分切沟沟槽下切至底部沙层为判断标准。

2 结果与分析

2.1 上方汇水对坡面侵蚀方式演变过程的影响

通过对模拟降雨试验过程的观察发现,上方汇水的汇入不仅能使坡面径流量、侵蚀产沙量增加,而且也使各侵蚀方式的演变进程明显加快。这主要是由于上方汇水使坡下方径流量和流速增大,从而导致坡面径流侵蚀力加剧,坡面片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀发育速度加快。在坡面侵蚀处于片蚀阶段

时,坡面上方汇水主要使坡面水流速度加快,形成坡面跌水现象较快,从而加快了片蚀向细沟侵蚀的演变。当坡面处于细沟侵蚀发育的初期和中期时,坡面上方汇水成为坡面侵蚀的主要动力,且随着上方汇水流量的增大,细沟发育的速度明显加快,主要表现为细沟侵蚀的下切侵蚀和侧蚀发展明显。当坡面处于细沟侵蚀发育后期时,随着上方来水的汇入,细沟的发育不如其发育初期和中期那样迅速,且趋于稳定。当细沟演变为切沟后,上方汇水和降雨径流向沟槽大量汇集,从而使切沟沟槽水流的流量和流速进一步增大,沟槽水流的侵蚀力及搬运泥沙的能力也随之进一步增强,使得沟头不断下切加深、下切沟头间径流对沟底冲刷加深、沟壁崩塌加宽。切沟侵蚀不断发育和演变,其发育速度随上方汇水量的增加而增大;当切沟侵蚀发育趋于稳定时,上方汇水引起的侵蚀产沙量和切沟的发育速度明显小于切沟发育初期和中期。表明,坡面侵蚀发育不同形态和上方汇水流量对坡面侵蚀产沙量有较大的作用,且坡面侵蚀产沙变化过程与侵蚀方式演变发育过程是相一致的。

2.2 上方汇水的侵蚀产沙作用分析

坡面上方汇水对坡面侵蚀产沙量的影响大小取决于上方汇水量、降雨特征和下垫面侵蚀状况。描述上方汇水在坡面侵蚀产沙中作用的重要指标是上方汇水引起的坡面净侵蚀产沙量 S ,即土槽接受上方汇水时的侵蚀产沙量 S_{ft} 与土槽不接受上方汇水时侵蚀产沙量 S_t 的差,可用公式表示为: $S = S_{ft} - S_t$ 。在相同坡度和降雨强度下,坡面侵蚀产沙量和上方汇水引起坡下方的净侵蚀产沙量均随坡面上方汇水径流量的增加而显著增大。研究结果(表 2)表明,在坡面不同的侵蚀发育阶段,上方汇水对坡面侵蚀产沙的作用明显不同。由于上方汇水的作用,导致坡下方水流具有较强的侵蚀和搬运能力,坡面汇水引起的净侵蚀产沙量占总侵蚀产沙量的 15.36%~78.15%,且其所占比例的大小受降雨强度、坡度和坡面侵蚀发育阶段的影响。在不同降雨强度和坡度条件下,当坡面侵蚀以片蚀和细沟侵蚀为主时,上方汇水引起的净侵蚀产沙量占总侵蚀产沙量的 55.60%~78.15%;当坡面侵蚀以细沟侵蚀和发育活跃期切沟侵蚀为主时,上方汇水引起的净侵蚀产沙量占总侵蚀产沙量的 41.09%~76.53%;当坡面侵蚀以细沟侵蚀和稳定期的切沟侵蚀为主时,上方汇水引起的净侵蚀产沙量占总侵蚀产沙量的 15.36%~58.95%。另外,不论在何种侵蚀方式

下,上方汇水引起的侵蚀产沙作用均随汇水流量的增加而增大。

表 2 上方汇水在坡面侵蚀方式演变中的作用分析

Table 2 Contribution of upslope runoff to loessial hillslope erosion and sediment during erosion pattern evolution process								
雨强/(mm·h ⁻¹) Rainfall intensity	坡度/(°) Slope	降雨场次/次 Rainfall frequency	$S_t/(\text{kg}\cdot\text{min}^{-1})$	$S_{ft}/(\text{kg}\cdot\text{min}^{-1})$	S_{ft}/S_t	$S/(\text{kg}\cdot\text{min}^{-1})$	$(S/S_{ft})/\%$	主要侵蚀方式 Main erosion patterns
50	15	1	0.621	2.842	4.576	2.221	78.15	片蚀和细沟侵蚀 Sheet and rill erosion
		2	4.370	11.917	2.727	7.547	63.33	细沟侵蚀 Rill erosion
		3	7.516	15.734	2.093	8.218	52.23	细沟和切沟侵蚀 Rill and gully erosion
		4	4.361	7.443	1.707	3.082	41.41	切沟和细沟侵蚀 Gully and rill erosion
	20	1	2.226	6.166	2.770	3.94	63.90	片蚀和细沟侵蚀 Sheet and rill erosion
		2	11.749	32.279	2.747	20.53	63.60	细沟侵蚀 Rill erosion
		3	8.828	18.203	2.062	9.375	51.50	切沟和细沟侵蚀 Gully and rill erosion
	25	1	1.312	5.530	4.215	4.218	76.27	片蚀和细沟侵蚀 Sheet and rill erosion
		2	2.208	9.406	4.260	7.198	76.53	细沟侵蚀 Rill erosion
		3	5.316	12.949	2.436	7.633	58.95	切沟和细沟侵蚀 Gully and rill erosion
75	15	1	3.230	7.274	2.252	4.044	55.60	片蚀和细沟侵蚀 Sheet and rill erosion
		2	26.709	45.336	1.697	18.627	41.09	细沟侵蚀 Rill erosion
		3	14.289	16.883	1.182	2.594	15.36	切沟和细沟侵蚀 Gully and rill erosion
	20	1	8.100	19.533	2.411	11.433	58.53	片蚀和细沟侵蚀 Sheet and rill erosion
		2	26.149	39.269	1.502	13.12	33.41	细沟和切沟侵蚀 Rill and gully erosion
	25	1	5.087	15.786	3.103	10.699	67.78	片蚀、细沟侵蚀 Sheet and rill erosion
		2	27.725	42.012	1.515	14.287	34.01	细沟和切沟侵蚀 Rill and gully erosion
100	15	1	3.991	9.461	2.371	5.47	57.82	片蚀和细沟侵蚀 Sheet and rill erosion
		2	11.743	22.180	1.889	10.437	47.06	细沟侵蚀 Rill erosion
		3	13.006	19.603	1.507	6.597	33.65	切沟和细沟侵蚀 Gully and rill erosion
	20	1	4.446	10.678	2.402	6.232	58.36	片蚀和细沟侵蚀 Sheet and rill erosion
		2	11.657	20.949	1.797	9.292	44.36	细沟侵蚀 Rill erosion
		3	9.914	15.135	1.527	5.221	34.50	切沟和细沟侵蚀 Gully and rill erosion
	25	1	2.979	10.377	3.483	7.398	71.29	片蚀和细沟侵蚀 Sheet and rill erosion
		2	6.953	18.450	2.654	11.497	62.31	细沟和切沟侵蚀 Rill and gully erosion
		3	17.242	26.833	1.556	9.591	35.74	切沟和细沟侵蚀 Gully and rill erosion

2.3 上方汇水流量与坡面侵蚀产沙量的关系分析

为进一步阐明上方汇水流量对坡面侵蚀产沙的影响,本试验分析了不同降雨强度和坡度条件下,上方汇水流量(Q)与坡面侵蚀产沙量(S_{ft})的关系。结果(图 1~图 3)发现,坡面侵蚀产沙量与上方汇水流量呈幂函数关系,即 $S_{ft}=aQ^b$ 。说明,上方汇水

流量是影响坡面侵蚀产沙的主要因素之一,有效减少坡面上方汇水流量,是黄土高原地区水土保持措施布设必须考虑的问题。

由图 1~3 可知,在 50 mm/h 降雨强度下,当坡度从 15°增加到 20°时,回归方程中幂函数的指数减小,说明上方汇水的侵蚀产沙作用相对减弱;降雨强

度为 75 和 100 mm/h 时,第一次降雨随着坡度由 15°增加到 20°,回归方程中幂函数的指数增大,说明上方汇水的侵蚀产沙作用相对增强。在 50 和 75 mm/h 降雨强度下,当地面坡度从 20°增加到 25°时,上方坡面汇水对侵蚀产沙的影响更加明显。在 100 mm/h 降雨强度下,坡面以片蚀和细沟侵蚀为主时,汇水量对侵蚀产沙的影响减弱;坡面以细沟和切沟

侵蚀为主时,坡面汇水对侵蚀产沙的影响增强。从以上分析可知,在 75 mm/h 降雨强度下,坡面汇水流量对侵蚀产沙的影响随坡度的增加而增强,而在 50 和 100 mm/h 降雨强度下,坡面汇水流量对侵蚀产沙的影响并不随坡度的增加而增大。

这些研究结果也充分反映了坡面汇水流量、降雨强度和坡度对坡面侵蚀产沙的综合影响。

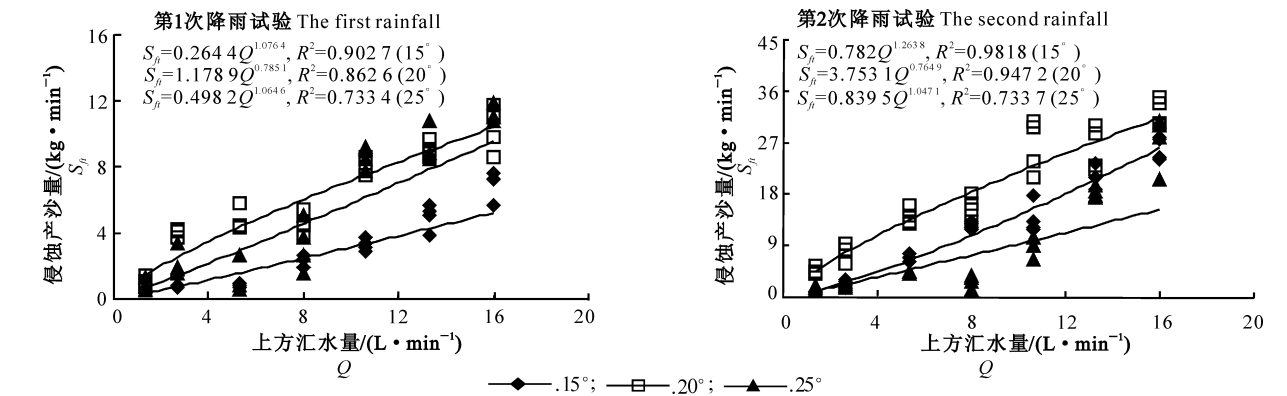


图1 50 mm/h降雨强度下坡面汇水流量与侵蚀产沙量的关系

Fig. 1 Relation between upslope runoff rates and sediment yield at 50 mm/h of rainfall intensity

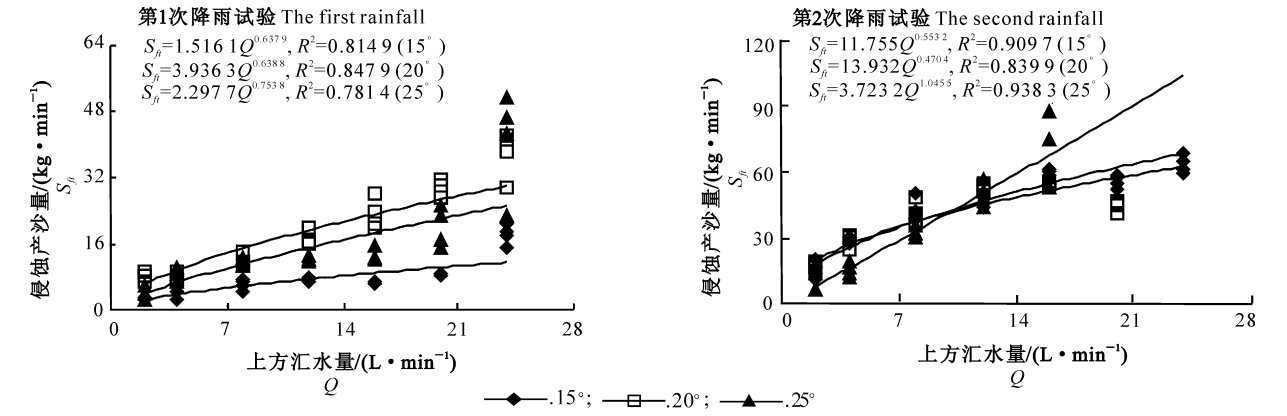


图2 75 mm/h降雨强度下坡面汇水流量与侵蚀产沙量的关系

Fig. 2 Relation between upslope runoff rates and sediment yield at 75 mm/h of rainfall intensity

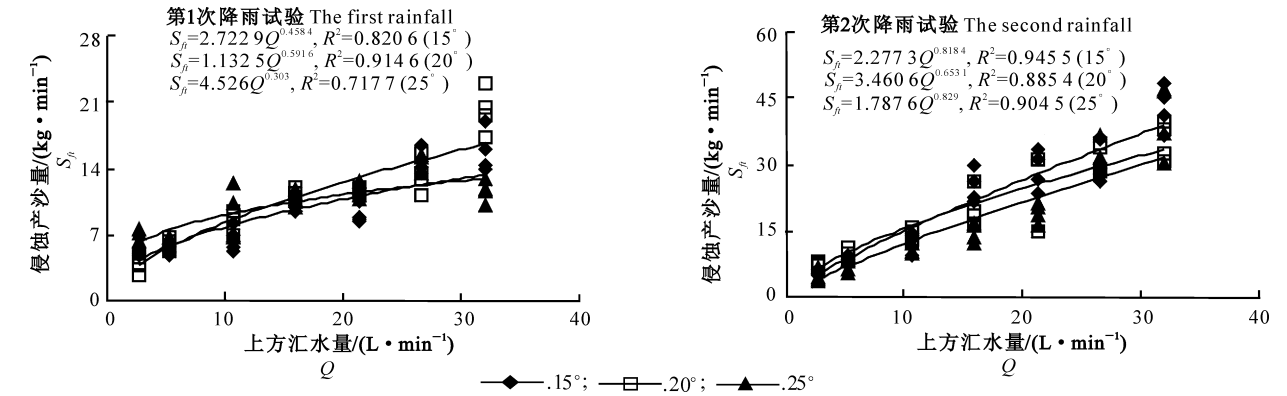


图3 100 mm/h降雨强度下坡面汇水流量与侵蚀产沙量的关系

Fig. 3 Relation between upslope runoff rates and sediment yield at 100 mm/h of rainfall intensity

3 结 论

(1)坡面汇水流量对坡面侵蚀方式的演变及产沙过程具有重要影响。当坡面接受上方汇水后,各种侵蚀方式的演变速度明显加快,侵蚀产沙量迅速增大,且坡面侵蚀产沙量的增加幅度随坡面上方汇水量的增加而增加。上方汇水导致坡下方侵蚀产沙量增加的原因,主要是由于上方汇水汇沙使坡下方的径流量和径流流速增大,从而引起坡面径流侵蚀能力加大和侵蚀方式演变进程加快。受坡面侵蚀形态及其发育过程的影响,坡面侵蚀产沙变化过程与侵蚀方式演变过程相对应。

(2)在坡度和降雨强度相同的条件下,坡面侵蚀产沙量和上方汇水引起的坡下方净侵蚀产沙量均随坡面上方汇水流量的增加而显著增加;上方汇水引起的坡面净侵蚀产沙量占坡面总侵蚀产沙量的 15.36%~78.15%,且受到降雨强度、坡度、坡面侵蚀方式及侵蚀发育阶段的影响。

(3)不同降雨强度和坡度条件下,坡面侵蚀产沙量与上方汇水流量呈幂函数关系,即 $S_{fi}=aQ^b$ 。说明坡面汇水流量是制约坡面侵蚀产沙与侵蚀微地貌发育的重要因素,若能有效控制上坡汇水,将可有效减少坡面侵蚀产沙量,抑制沟蚀的发生和发展。

[参考文献]

[1] 承继成. 坡地流水作用的分带性[C]//中国地理学会 1963 年学会论文集. 北京:科学出版社,1965:99-104.
Cheng J C. Study on the vertical belts of slope land fluvial process [C] //Proceeding of the geographical society of China in 1963. Beijing: Science Press, 1965:99-104. (in Chinese)

[2] 徐雪良. 韭园沟流域沟间地、沟谷地来水来沙量的研究[J]. 中国水土保持,1987(8):23-26.
Xu X L. Research of water and sediment yield in gully area and inter-gully area in Jiuyuangou Basin [J]. Soil and Water Conservation in China, 1987(8):23-26. (in Chinese)

[3] 龚时旸,蒋德麒. 黄河中游黄土丘陵沟壑区沟道小流域的水土流失及治理 [J]. 中国科学 A 辑,1978(6):671-678.
Gong S Z, Jiang D Q. Soil loss of small catchment and their control methods in loess gully region of middle reach of Yellow River [J]. Science in China A Edition, 1978(6):671-678. (in Chinese)

[4] 蒋德麒,赵诚信,陈章霖. 黄河中游小流域泥沙来源初步分析 [J]. 地理学报,1966,32(1):20-36.
Jiang D Q, Zhao C X, Chen Z L. A rudimental analysis of sediment origins of small catchment in middle reach of Yellow River [J]. Journal of Geography, 1966,32(1):20-36. (in Chinese)

[5] Zheng F, Chi-hua H, Norton L D. Vertical hydraulic gradient and run-on water and sediment effects on erosion processes and sediment regimes [J]. Soil Sci Soc Am J, 2000,64(1):4-10.

[6] 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 [J]. 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 [J]. ACTA Geographica Sinica, 1998, 53(5):422-428. (in Chinese)

[7] 陈 浩. 上坡来水在坡面产沙中的作用[C]//第二次全国水土保持学术讨论会论文集. 北京:林业出版社,1992:75-87.
Chen H. Effect of run-on water on slope erosion and sediment [C]//Proceeding of the second national symposium on soil and water conservation. Beijing: Forestry Press, 1992:75-87. (in Chinese)

[8] 陈 浩. 降雨特征和上坡来水对产沙的综合影响[J]. 水土保持学报,1992,6(2):17-23.
Chen H. Effects of rainfall characteristics and runoff from up-slope on erosion and yield sediment [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992,6(2):17-23. (in Chinese)

[9] 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 H, Wang K Z. 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)

[10] 陈 浩. 流域坡面与沟道的侵蚀产沙关系研究[M]. 北京:气象出版社,1993:139-172.
Chen H. A study on soil erosion and yield sediment of hill-slope and gullies in a watershed [M]. Beijing: Meteorological Press, 1993:139-172. (in Chinese)

[11] 焦菊英,刘元宝,唐克丽. 小流域沟间地与沟谷地径流泥沙来量的探讨 [J]. 水土保持学报,1992,6(2):24-28.
Jiao J Y, Liu B Y, Tang K L. An approach to runoff and sediment generation of gully and inter-gully land in small watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992,6(2):24-28. (in Chinese)

[12] 肖培青,郑粉莉. 上方汇水汇沙对坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报,2003,17(3):25-27.
Xiao P Q, Zheng F L. Effects of runoff and sediment from up-slope on downslope erosion process [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003,17(3):25-27. (in Chinese)

[13] 肖培青,郑粉莉. 上方来水来沙对细沟侵蚀产沙过程的影响 [J]. 水土保持通报,2001,21(1):23-25.
Xiao P Q, Zheng F L. Effect of run-on water and sediment on rill erosion process at down-slope section [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001,21(1):23-25. (in Chinese)

[14] 郑粉莉,高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安:陕西人民出版社,2000:96-119.
Zheng F L, Gao X T. Soil Erosion Processes and Modeling at Loessial Hillslope [M]. Xi'an: Shaanxi People's press, 2000:96-119. (in Chinese).

[15] 郑粉莉,武 敏,张玉斌,等. 黄土陡坡裸露坡耕地浅沟发育过程研究[J]. 地理科学,2006,26(4):438-442.
Zheng F L, Wu M, Zhang Y B, et al. Ephemeral gully development process at loess steep hillslope [J]. Scientia Geographica Sinica, 2006,26(4):438-442. (in Chinese)