黄土坡面侵蚀方式演变过程中汇水坡长的侵蚀产沙作用分析

张新和[1,3],郑粉莉[2,3],张　鹏[2,3],李　靖[1]

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;2.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;
3.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:利用由位于坡面上部的供水装置和坡面下部的试验土槽组成的试验装置系统,通过模拟降雨试验,研究了不同降雨强度(50、75和100 mm/h)和不同坡度(15°、20°和25°)条件下坡面侵蚀方式演变过程中汇水坡长对侵蚀产沙的作用。结果表明,黄土坡面片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀方式演变过程中汇水坡长对侵蚀产沙具有重要作用,且受降雨强度、坡度和侵蚀方式演变过程的综合影响。汇水坡长增加,使坡面片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀发育速度明显加快,侵蚀产沙量明显增加。在坡面侵蚀不同发育阶段,汇水坡长对坡面侵蚀的产沙作用也不尽相同。当坡面以切沟侵蚀为主时,汇水坡长对坡面侵蚀产沙的作用最大,其次是以细沟侵蚀为主时。而以坡面片蚀为主时,汇水坡长对坡面侵蚀产沙的作用最小。通过对坡面侵蚀产沙量与汇水坡长的相关分析表明,它们呈正线性关系。

关键词:汇水坡长;侵蚀产沙;侵蚀方式演变;模拟降雨

中图分类号:S157.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-7601(2007)06-0126-06

汇水坡长是影响坡面汇水流量、侵蚀方式演变及侵蚀产沙过程的重要因子。国外研究结果表明,当坡面以片蚀或细沟侵蚀为主时,坡面侵蚀量随坡长的增加呈幂指数增加,但其指数大小表现为一定的复杂性[1~4]。我国学者从20世纪50年代就开始研究坡长对坡面侵蚀产沙的影响。罗来兴[5]的研究结果表明,黄土区坡地上的冲刷量随坡长的变化呈先增强,后逐渐减弱,再增强的变化过程;郑粉莉[6]等的研究结果表明,当坡面以细沟侵蚀为主时,坡面侵蚀产沙量随坡长的变化呈强弱波状起伏变化;蔡强国[7,8]等的研究结果也表明坡面侵蚀产沙量随坡长呈先增加趋势,但当坡长超过一定值时,又随坡长的增加而逐渐减少。但有关坡面侵蚀方式演变过程中汇水坡长与坡面侵蚀产沙关系的研究还非常薄弱。本文通过改变坡面上方汇水流量大小来改变对应降雨强度条件下的坡面汇水长度,研究坡面侵蚀方式演变过程中汇水坡长对侵蚀产沙的影响,加深理解汇水坡长的侵蚀产沙作用,为建立侵蚀预报模型提供理论支持。

1　试验设计与研究方法

试验在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。试验装置系统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,贮水箱前方底部的不同阀门用来控制不同的放水流量。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°。试验设计包括三种降雨强度:50、75和100 mm/h;三种地面坡度:15°、20°、25°。汇水坡长的变化是通过改变坡面上方汇水流量来实现的。试验开始前,根据降雨强度大小及坡面汇水坡长为0、1、2、4、6、8、10、12 m时的对应坡面汇水流量率定各控制阀门的放水流量,每个设定的放水流量分别率定2次,2次的误差不超过5%。具体的汇水坡长与坡面上方汇水流量对应关系如表1。试验开始后,根据试验设计需要的不同汇水坡长打开相应的上方汇水流量控制阀门开关,将软管放入坡面上部的溢流槽,以保证上方汇水水流是均匀的、平稳的、以薄层水流形式进入坡面试验土槽,模拟自然坡面汇水过程。试验所用降雨设备为侧喷式的人工降雨设备,模拟降雨强度变化范围为30~200 mm/h,降雨均匀度大于80%,降雨高度为16 m,可以满足所有雨滴达到终点速度。

收稿日期:2007-04-23
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,在读博士研究生。主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。
* **通讯作者**:郑粉莉(1960—),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。
中国知网 www.cnki.net

表 1　汇水坡长与坡面上方汇水流量的对应关系

Table 1　Relations between upslope runoff rates and upstream slope length

汇水坡长(m) Upstream slope length	各雨强下对应汇水坡长的上方放水流量(L/min) Upslope runoff rates at every rainfall intensity		
	50 mm/h	75 mm/h	100 mm/h
0	0.00	0.00	0.00
1	1.33	2.00	2.67
2	2.67	4.00	5.33
4	5.33	8.00	10.67
6	8.00	12.00	16.00
8	10.67	16.00	21.33
10	13.30	20.00	26.67
12	16.00	24.00	32.00

试验用土为陕北安塞黄绵土。所有试验土样自然风干并过 10 mm 筛。试验土槽采用分层填土，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 厚土层分为耕作层和犁底层进行填装，其中耕作层深为 20 cm，犁底层深度为 30 cm；每次填土厚度为 5 cm，耕作层容重控制在 1.05～1.1 g/cm^3，犁底层容重控制在 1.25 g/cm^3 左右。填土时采用边填充边压实的方法，以减小边壁对坡面入渗、产流产沙过程及坡面侵蚀微形态发育等诸多方面的影响。土槽装填完毕后用 30 mm/h 的降雨强度进行前期降雨，当坡面有产流时，立刻停止降雨。前期降雨的目的一是保持坡面下垫面有相同的前期土壤含水量，二是通过降雨湿润固结分散孤立的土壤颗粒，三是减少下垫面条件的空间变异性。

为了确保降雨均匀度和降雨强度达到试验要求，每次试验前专门对降雨强度进行 2 次率定，2 次误差不超过 5%。试验开始后，当试验土槽产流时，采集土槽的初始产流量和径流量，再每隔 1 min 采集土槽的 8 个径流泥沙样，并用秒表测定径流泥沙采集时间。然后依次打开不同汇水坡长对应汇水流量的阀门开关，进行有汇水坡长和无汇水坡长时试验土槽的模拟降雨对比试验。具体径流泥沙采样过程为当汇水坡长为 1 m 时，每分钟采集土槽径流泥沙样一次，用秒表测定径流泥沙采集时间，采集 4 个径流泥沙样后，进行无汇水坡长时的模拟降雨对比试验，也采集土槽径流泥沙样 4 个。然后依次进行汇水坡长为 2、4、6、8、10 和 12 m 的模拟降雨试验，用上述同样步骤分别采集不同汇水坡长下有汇水坡长和无汇水坡长时的径流泥沙样。降雨试验结束后，量得每一个径流泥沙样的体积，并用烘干法求得径流含沙量和侵蚀产沙量。

2　试验结果与分析

2.1　坡面侵蚀方式演变过程中汇水坡长的变化对侵蚀产沙的影响

为了完整模拟坡面片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀演变过程中汇水坡长对坡面侵蚀产沙的影响，根据降雨强度和坡度变化，在每个试验处理下对坡面连续进行降雨试验 2～4 次，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。

汇水坡长的改变直接影响坡面径流量，坡面径流又直接影响坡面侵蚀产沙过程，同时，在坡面不同侵蚀方式下，汇水坡长的侵蚀产沙作用也不尽相同。模拟降雨试验过程观察表明，随着坡面汇水坡长的增加，坡面片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀发育速度明显加快，而且也使得坡面径流量、侵蚀产沙量明显增加。图 1～图 9 是坡面在不同坡度、不同降雨强度条件下坡面侵蚀方式演变过程中坡面侵蚀产沙量随汇水坡长的变化。

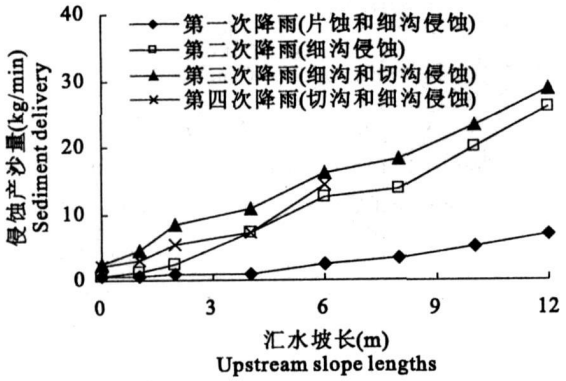

图 1　50 mm/h 雨强和 15°坡度时侵蚀产沙量随汇水坡长变化

Fig. 1　Sediment yield change with upstream slope lengths at 50 mm/h of rainfall intensity and 15° of slope gradient

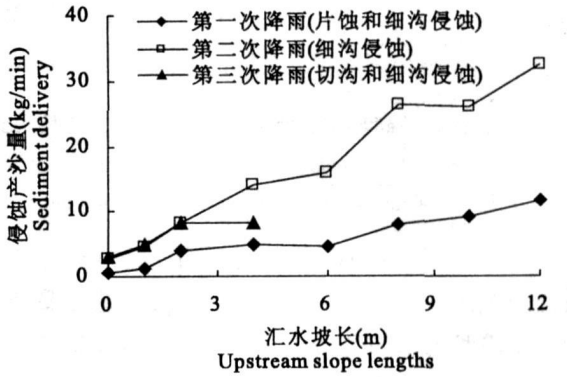

图 2　50 mm/h 雨强和 20°坡度时侵蚀产沙量随汇水坡长变化

Fig. 2　Sediment yield change with upstream slope lengths at 50 mm/h of rainfall intensity and 20° of slope gradient

中国知网 https://www.cnki.net

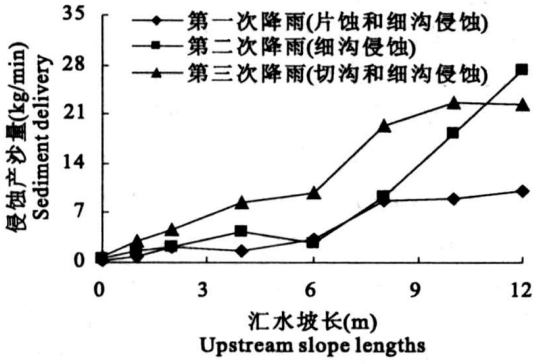

图 3 50 mm/h 雨强和 25°坡度时侵蚀产沙量随汇水坡长变化

Fig.3 Sediment yield change with upstream slope lengths at 50 mm/h of rainfall intensity and 25° of slope gradient

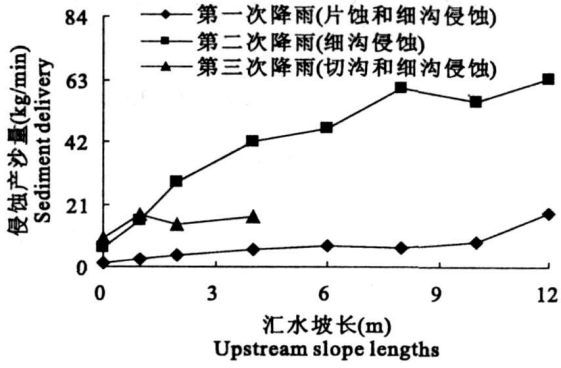

图 4 75 mm/h 雨强和 15°坡度时侵蚀产沙量随汇水坡长变化

Fig.4 Sediment yield change with upstream slope lengths at 75 mm/h of rainfall intensity and 15° of slope gradient

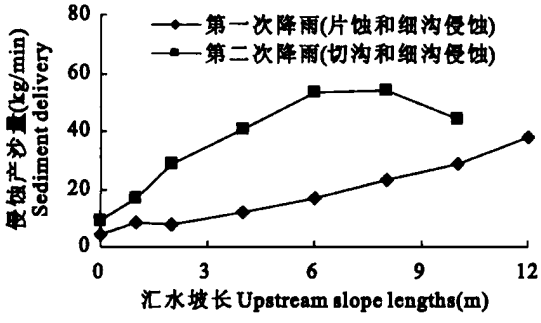

图 5 75 mm/h 雨强和 20°坡度时侵蚀产沙量随汇水坡长变化

Fig.5 Sediment yield change with upstream slope lengths at 75 mm/h of rainfall intensity and 20° of slope gradient

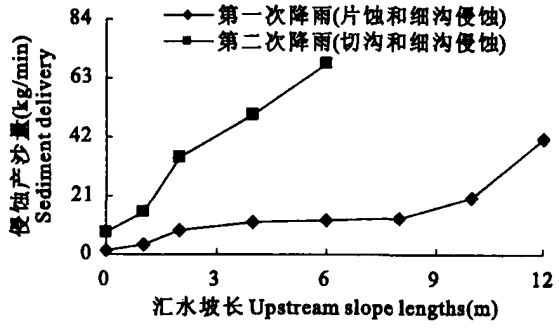

图 6 75 mm/h 雨强和 25°坡度时侵蚀产沙量随汇水坡长变化

Fig.6 Sediment yield change with upstream slope lengths at 75 mm/h of rainfall intensity and 25° of slope gradient

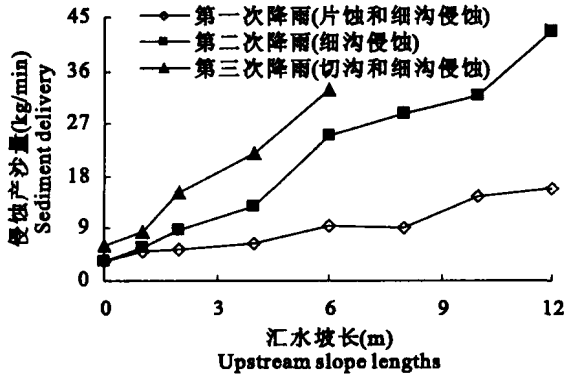

图 7 100 mm/h 雨强和 15°坡度时侵蚀产沙量随汇水坡长变化

Fig.7 Sediment yield change with upstream slope lengths at 100 mm/h of rainfall intensity and 15° of slope gradient

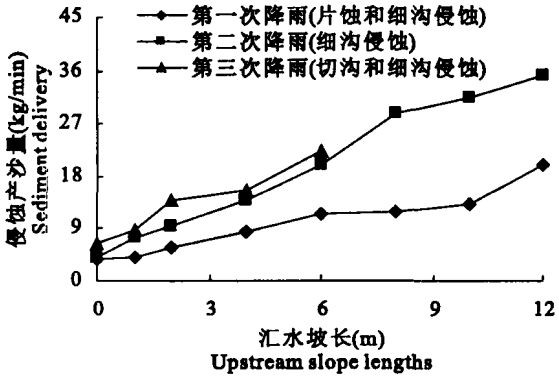

图 8 100 mm/h 雨强和 20°坡度时侵蚀产沙量随汇水坡长变化

Fig.8 Sediment yield change with upstream slope lengths at 100 mm/h of rainfall intensity and 20° of slope gradient

从图 1～图 9 可以看出，上方汇水坡长增加时，坡面侵蚀产沙量都呈明显增加的趋势。这主要是由于汇水坡长的增加使得上方汇流量增加，导致坡面水流流速及其对应的水流剪切力增大，从而使坡面侵蚀产沙量增加。在不同试验处理条件下，由汇水坡长增加而引起的坡面侵蚀产沙量，皆随侵蚀方式的演变而发生变化。在 50 mm/h 雨强和 15°坡度时，当坡面以片蚀和细沟侵蚀为主时，汇水坡长由 1 m 增加到 6 m 再增加到 12 m，坡面侵蚀产沙量由 0.47 kg/min 增到 2.25 kg/min 和 7.00 kg/min；当坡面以细沟侵蚀为主时，汇水坡长由 1 m 增加到 6 m 再增加到 12 m，坡面侵蚀产沙量由 1.13 kg/min

中国知网 www.cnki.net

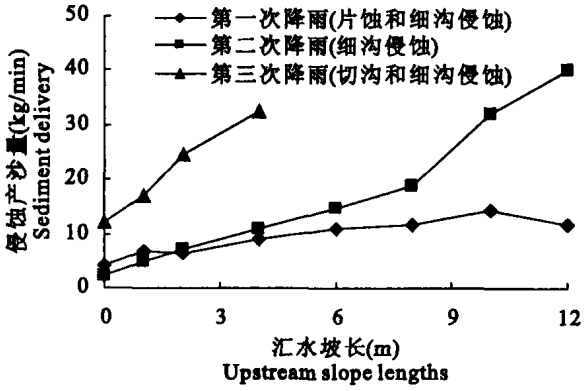

图 9　100 mm/h 雨强和 25°坡度时侵蚀产沙量随汇水坡长变化

Fig.9　Sediment yield change with upstream slope lengths at 100 mm/h of rainfall intensity and 25° of slope gradient

增加到 12.53 kg/min 和 26.08 kg/min，分别是以片蚀和细沟侵蚀为主时的 2.4 倍、5.6 倍和 3.7 倍；当坡面以细沟侵蚀和发育活跃期切沟侵蚀为主时，汇水坡长由 1 m 增加到 6 m 再增加到 12 m，坡面侵蚀产沙量由 4.61 kg/min 增加到 16.04 kg/min 和 28.75 kg/min，分别是以片蚀和细沟侵蚀为主阶段时的 9.8 倍、7.1 倍和 4.1 倍，是以细沟侵蚀为主时的 4.1 倍、1.3 倍和 1.1 倍；当坡面以稳定发育的切沟侵蚀和细沟侵蚀为主时，汇水坡长由 1 m 增加到 6 m，坡面侵蚀产沙量由 2.99 kg/min 增加到 14.18 kg/min，分别是以片蚀和细沟侵蚀为主时的 6.36 倍和 6.3 倍，是以细沟侵蚀为主时的 2.6 倍和 1.13 倍，是以细沟侵蚀和发育活跃期切沟侵蚀为主时的 0.65 倍和 0.88 倍。在 75 mm/h 雨强和坡度 25°时，当坡面以片蚀和细沟侵蚀为主时，汇水坡长由 1 m 增加到 6 m 再增加到 12 m，坡面侵蚀产沙量分别由 3.75 kg/min 增加到 12.32 kg/min 和 40.94 kg/min；当坡面以切沟侵蚀和细沟侵蚀为主时，汇水坡长由 1 m 增加到 6 m，坡面侵蚀产沙量由 15.42 kg/min 增加到 68.08 kg/min，分别是以片蚀和细沟侵蚀为主时的 4.1 倍和 5.5 倍。在 100 mm/h 雨强和坡度 20°时，当坡面以片蚀和细沟侵蚀为主时，汇水坡长由 1 m 增加到 6 m 再增加到 12 m，坡面侵蚀产沙量分别由 3.94 kg/min 增加到 11.34 kg/min 和 20.04 kg/min；当坡面以细沟侵蚀为主时，汇水坡长由 1 m 增加到 6 m 再增加到 12 m，坡面侵蚀产沙量分别由 7.54 kg/min 增加到 20.07 kg/min 和 35.22 kg/min，分别是以片蚀和细沟侵蚀为主时的 1.9 倍、1.77 倍和 1.76 倍；当坡面以切沟侵蚀和细沟侵蚀为主时，汇水坡长由 1 m 增加到 6 m，坡面侵蚀产沙量由 8.86 kg/min 增加到 22.20 kg/min，分别是以片蚀和细沟侵蚀为主时的 2.2 倍和 1.1 倍，是以细沟侵蚀为主时的 1.18 倍和 1.1 倍。此研究结果表明，当坡面以切沟侵蚀为主时，汇水坡长对坡面侵蚀产沙的作用最大，其次是以细沟侵蚀为主，而以坡面片蚀为主时，汇水坡长对坡面侵蚀产沙的作用最小。因此，通过坡面水土保持措施，缩短汇水坡长或实现径流的就地拦蓄，是减少坡面侵蚀的关键所在。

图 1～图 9 也表明，当坡面侵蚀处于片蚀和细沟侵蚀发育初期时，侵蚀产沙量随汇水坡长的变化幅度相对较小；当坡面侵蚀以细沟侵蚀和发育活跃期切沟侵蚀为主时，坡面侵蚀产沙量随汇水坡长的变化幅度较大；而在切沟发育后期或趋于稳定时，坡面侵蚀产沙量随汇水坡长增加的变化幅度相对减小。再次说明坡面不同侵蚀发育阶段，汇水坡长对坡面侵蚀的产沙作用也不相同。这些研究结果表明，坡面细沟侵蚀发生及其由此发育演变形成的切沟侵蚀使坡面侵蚀产沙量急剧增加。也再次证明沟蚀是黄土高原小流域泥沙的主要来源，防治小流域的沟蚀发生发展，对流域侵蚀泥沙减少有重要意义。

2.2　坡面侵蚀产沙量与汇水坡长的关系分析

为了阐明黄土坡面在侵蚀方式演变过程中汇水坡长对侵蚀产沙的影响，分别分析了不同降雨强度和坡度条件下实测侵蚀产沙量(S)与汇水坡长(L)的关系(图 10 ～ 图 12)，发现坡面侵蚀产沙量与汇水坡长呈正线性关系，即 $S = kL + b(k > 0)$。

从图 10～图 12 可知，在不同降雨强度和坡度条件下，汇水坡长对坡面侵蚀产沙的影响也不相同。在坡度为 15°时，当降雨强度从 50 mm/h增加到 75 mm/h 时，汇水坡长对坡面侵蚀产沙的影响增强；而当降雨强度从 75 mm/h 增加到 100 mm/h 时，汇水坡长对坡面侵蚀产沙的影响相对减弱。在 50 mm/h降雨强度下，坡面侵蚀以片蚀和细沟侵蚀为主时，随着坡度的增加，汇水坡长对侵蚀产沙的影响更加显著；在以细沟侵蚀为主时，当坡度由 15°增加到 20°时，汇水坡长对侵蚀产沙的影响增强，而当坡度从 20°增加到 25°时，汇水坡长对侵蚀产沙的影响相对减弱；在 75 mm/h 降雨强度下，坡面以片蚀和细沟侵蚀或以细沟侵蚀为主时，当坡度由 15°增加到 20°时，汇水坡长对侵蚀产沙的影响明显增强，而当坡度从 20°增加到 25°时，汇水坡长对侵蚀产沙的影响呈微弱减小趋势，而坡面以细沟和切沟侵蚀为主时，当坡度由 15°增加到 20°时，汇水坡长对侵蚀产沙的影响减弱，而当坡度从 20°增加到 25°时，汇

中国知网 https://www.cnki.net

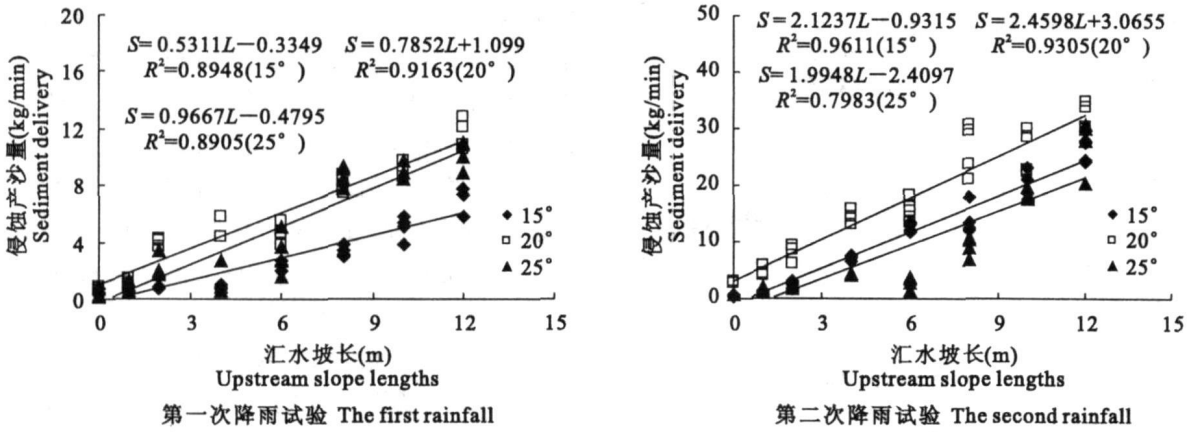

图 10 降雨强度为 50 mm/h 时坡面侵蚀产沙量与汇水坡长的关系

Fig. 10 Relation between sediment yield and upstream slope length at 50 mm/h of rainfall intensity

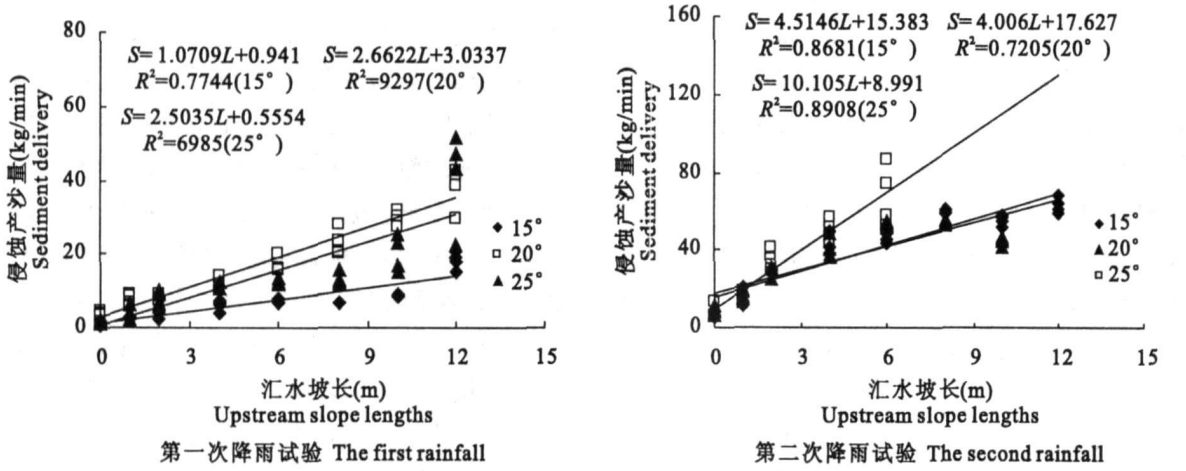

图 11 降雨强度为 75 mm/h 时坡面侵蚀产沙量与汇水坡长的关系

Fig. 11 Relation between sediment yield and upstream slope length at 75 mm/h of rainfall intensity

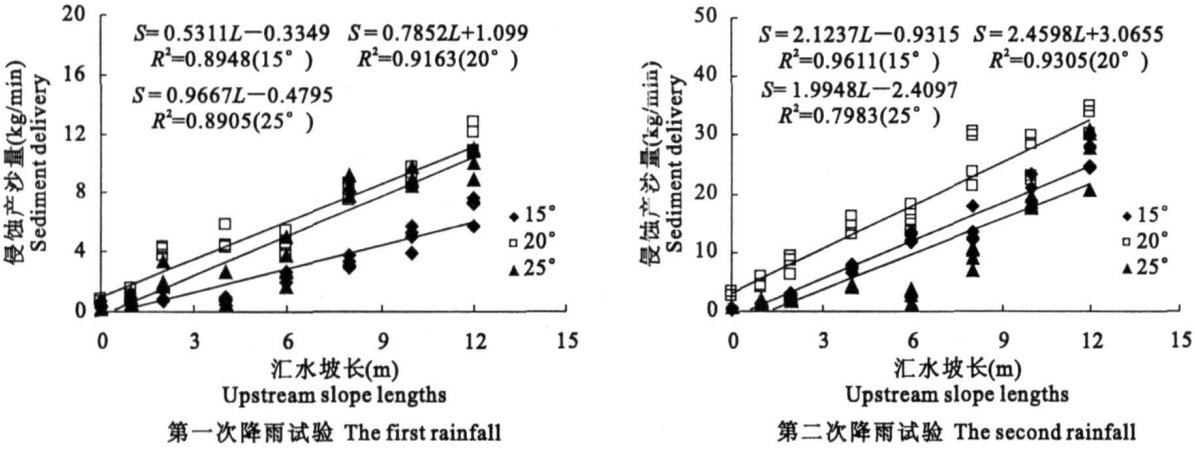

图 12 降雨强度为 100 mm/h 时坡面侵蚀产沙量与汇水坡长的关系

Fig. 12 Relation between sediment yield and upstream slope length at 100 mm/h of rainfall intensity

水坡长对侵蚀产沙的影响显著增强；在 100 mm/h 降雨强度下，坡面以片蚀和细沟侵蚀为主时，当坡度由 15°增加到 20°时，汇水坡长对侵蚀产沙量的影响增强，而在坡度从 20°增加到 25°时，汇水坡长对侵蚀产沙量的影响相对减弱，而坡面以细沟和切沟侵蚀为主时，当坡度由 15°增加到 20°时，汇水坡长对

中国知网 https://www.cnki.net

侵蚀产沙量的影响相对减弱,而在坡度从 20°增加到 25°时,汇水坡长对侵蚀产沙量的影响相对增强。这些研究结果充分反映了侵蚀方式演变、坡度和降雨强度对坡面侵蚀产沙的综合影响,也再一次说明降雨强度、坡度和汇水坡长对坡面侵蚀产沙的影响受坡面侵蚀方式演变过程的影响。

3　结　论

1) 黄土坡面侵蚀方式演变过程中汇水坡长对侵蚀产沙具有重要作用。汇水坡长的改变直接影响坡面径流量,坡面径流又直接影响坡面侵蚀产沙过程。上方汇水坡长增加时,坡面片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀发育速度明显加快,坡面侵蚀产沙量明显增加。同时,在坡面侵蚀不同发育阶段,汇水坡长对坡面侵蚀的产沙作用也不尽相同。当坡面以切沟侵蚀为主时,汇水坡长对坡面侵蚀产沙的作用最大,其次是以细沟侵蚀为主时,而以坡面片蚀为主时,汇水坡长对坡面侵蚀产沙的作用最小。而且,坡面细沟侵蚀的发生及由此发育演变形成的切沟侵蚀是坡面侵蚀产沙的主要来源。

2) 汇水坡长对坡面侵蚀产沙量的影响受降雨强度、坡度和侵蚀方式演变等因子的综合影响。在本模拟降雨试验条件下,不同降雨强度和坡度时,黄土坡面侵蚀产沙量(S)与汇水坡长(L)之间呈正线性关系,即 $S=kL+b(k>0)$。但汇水坡长对坡面侵蚀产沙量的影响程度随侵蚀方式演变阶段、降雨强度和坡度的变化而表现为不同的形式。

3) 汇水坡长、侵蚀方式演变、坡度和降雨强度对坡面侵蚀产沙具有综合影响作用。侵蚀方式的演变过程是影响坡面侵蚀产沙量的重要因素,而且降雨强度、坡度和汇水坡长对坡面侵蚀产沙的影响也受坡面侵蚀方式演变过程的影响。

参 考 文 献:

[1] Zingg A W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff[J]. Agricultural Engineering, 1940,21(2):59—64.

[2] Wischmerier H H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses from cropland east of Rocky Mountains[M]. Washington, D. C. Agriculture Handbook 282. U. S. Department of Agriculture, 1965.

[3] Wischmerier H H, Smith D D, Uhalnd R E. Evaluation of factors in the erosion equation[J]. Agriculture Engineering, 1958, 39(8):458—462.

[4] Bryan R B, Poesen J. Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1989,14(2):211—231.

[5] 罗来兴.甘肃华亭粮食沟坡侵蚀量的野外观测及其初步分析结果[J].地理学资料,1958,(2):111—118.

[6] 郑粉莉,唐克丽.坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J].土壤学报,1989,26(2):109—116.

[7] 陈永宗,景　可,蔡强国.黄土高原现代侵蚀与治理[M].北京:科学出版社,1988.

[8] 蔡强国.坡长在坡面侵蚀产沙过程中的作用[J].泥沙研究,1989,(4):84—91.

Contribution of upstream slope length to loessial hillslope erosion and sediment during erosion pattern evolution process

ZHANG Xin-he[1,3], ZHENG Fen-li[2,3], ZHANG Peng[2,3], LI Jing[1]

(1. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2. *College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
3. *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: An experimental equipment, consisting of a water feed installation and a test box, is used to assess the contribution of upstream slope length to loessial hillslope erosion and sediment during erosion pattern evolution process at 50, 75 and 100 mm/h of rainfall intensities and 15°, 20° and 25° of slope gradients by using simulated rainfall. The results show that upstream slope length has great influences on the erosion and sediment yield during the erosion pattern evolution process from sheet erosion to rill erosion, and then to gully erosion. With the increasing of upstream slope length, the erosion pattern evolution process from sheet erosion to rill erosion, and rill erosion to gully erosion quickens and the sediment yields increase greatly. Meanwhile, at different stages of erosion pattern evolution process, the contribution of upstream slope length to loessial hillslope erosion and sediment is quite different. At the gully erosion stage, the effect of upstream slope length to hillslope erosion and sediment is the largest, the next is at the rill erosion stage, and the last one is at sheet erosion stage. The relationship between hillslope sediment yield and the upstream slope length is expressed as positive linear function.

中国知网 https://www.cnki.net

Keywords: upstream slope length; erosion and sediment; erosion pattern evolution; simulated rainfall