

# 上方来水来沙对浅沟侵蚀产沙及水动力参数的影响

车小力<sup>1</sup>, 王文龙<sup>1,2†</sup>, 郭军权<sup>3</sup>, 韩芳芳<sup>4</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 712100 陕西杨凌; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100 陕西杨凌; 3. 延安职业技术学院, 745000 陕西延安; 4. 长安大学环境科学与工程学院, 710064 西安)

**摘要** 浅沟侵蚀是黄土高原重要的侵蚀类型, 上方汇水对坡面浅沟侵蚀具有重要的影响。采用野外放水冲刷试验, 定量分析 26° 坡耕地在上方来水量为 5、10 和 15 L/min 时对坡下方浅沟侵蚀产沙及其水动力参数的影响。结果表明: 上方来水的汇入使浅沟水流流速明显增大, 雷诺数、弗劳德数、水流功率和剪切力分别增大 33% ~ 76%、21% ~ 47%、29% ~ 72% 和 18% ~ 42%, 阻力系数减少 11% ~ 13%, 导致浅沟侵蚀产沙量明显增大; 除流速和弗劳德数外, 其余水动力参数随放水时间的延长呈递增趋势; 上方来水使浅沟侵蚀产沙量相对增量与水流功率和剪切力相对增量均呈幂函数关系。

**关键词** 上方来水来沙; 浅沟侵蚀; 产沙; 水动力参数; 黄土高原沟壑区

## Effects of up-slope runoff and sediment on ephemeral gully erosion sediment and hydraulic parameters

Che Xiaoli<sup>1</sup>, Wang Wenlong<sup>1,2</sup>, Guo Junquan<sup>3</sup>, Han Fangfang<sup>4</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, 712100, Yangling, Shaanxi; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi; 3. Yan'an Vocational and Technical College, 716000, Yan'an, Shaanxi; 4. College of Environ Science & Engineering, Chang'an University, 710064, Xi'an, China)

**Abstract** The ephemeral gully erosion was an important issue and had great distribution in the Loess Plateau. The runoff and sediment from up-slope had great impacts on slope soil erosion. In this paper, its effect on down-slope ephemeral gully erosion sediment yield and hydrodynamic parameters were analyzed by water discharge scouring experiments in fields, with the designed discharge 5 L/min, 10 L/min and 15 L/min on the slope of 26°. The results indicated that the runoff from up-slope increased the flow velocity. The Reynolds number, Froude number, stream power and shearing force increased by 33% - 76%, 21% - 47%, 29% - 72%, 18% - 42% respectively, and the Daycy-Weisbach coefficient decreased by 11% - 13%, which caused the increasing sediment of the ephemeral gully erosion. Except the flow velocity and Froude number, the other hydrodynamic parameters increased over the water discharge scouring time. There was a power relationship between ephemeral gully relative increment sediment yield caused by up-slope runoff and relative increment of the stream power and shearing force.

**Key words** runoff and sediment from up-slope; ephemeral gully erosion; sediment yield; hydrodynamic parameters; Loess Plateau gully region

收稿日期: 2011-01-24 修回日期: 2011-03-27

项目名称: 国家自然科学基金“黄土丘陵区坡面浅沟侵蚀过程及预报模型研究”(40411080); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项经费(10502-Z5-3)

第一作者简介: 车小力(1986—)男, 硕士研究生。主要研究方向: 土壤侵蚀。E-mail: chexiaoli19860125@163.com

† 责任作者简介: 王文龙(1964—)男, 博士, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。E-mail: wlwang@nwsuaf.edu.cn

土壤侵蚀在黄土高原地区非常严重,制约着当地经济社会的可持续发展,而浅沟侵蚀作为坡面土壤侵蚀的一个重要过程,在黄土地区坡耕地上的分布十分广泛,是一种人为耕垦与强烈径流侵蚀相互作用的特殊侵蚀形态,对黄土区沟蚀的发生发展有着重要的影响,历来为学者所重视。浅沟是在径流冲刷和人为耕作的反复作用下形成的瓦背状起伏的地形<sup>[1]</sup>。有关土壤侵蚀过程的研究,在片蚀和细沟侵蚀研究方面已取得了重要的成果,但对浅沟侵蚀过程的研究仍较薄弱<sup>[2]</sup>。有关资料表明,浅沟占坡面范围大,侵蚀量可占坡面侵蚀量的17%~85%<sup>[3-6]</sup>。国内外学者对浅沟侵蚀进行了一定的研究,主要涉及浅沟侵蚀分布特征<sup>[7]</sup>、浅沟侵蚀过程及其影响因素<sup>[8-9]</sup>、浅沟水流水动力参数特征<sup>[10]</sup>等,并建立了浅沟侵蚀预报模型<sup>[11-12]</sup>。郑粉莉等<sup>[13]</sup>利用室内人工建筑浅沟发育初期的雏形模型,研究浅沟发育不同阶段的侵蚀过程及浅沟侵蚀对坡面侵蚀产沙的贡献,指出浅沟发育不同阶段对应于不同的浅沟侵蚀过程,浅沟侵蚀量在发育初期和中期阶段占总坡面侵蚀产沙量的58%,而在后期为26%~59%。王文龙等<sup>[14]</sup>通过模拟降雨试验的方法对比了浅沟与细沟水动力参数的关系,指出紊动和急流冲刷是浅沟区别于细沟侵蚀的最重要的特征。郑粉莉等<sup>[15]</sup>利用室内双土槽径流小区,通过模拟降雨试验研究了坡度为20°时上方来水来沙对坡下方浅沟侵蚀产沙的影响,结果表明,上方来水引起的侵蚀产沙量随降雨强度的增加可增加4.4%~83.5%,而在相同上方来水条件下,上方来沙强度的减少,可使下方浅沟侵蚀产沙量增加。由于浅沟侵蚀过程的复杂性,现有研究成果在浅沟水流水动力参数方面的试验研究在黄土高原地区较少,且以室内人工模拟试验居多<sup>[8-14]</sup>,而野外径流小区观测资料表明,上方来水来沙对坡面侵蚀具有重要的影响<sup>[15-16]</sup>。因此,笔者通过野外放水冲刷试验,定量研究上方来水来沙对坡面浅沟侵蚀产沙及其水动力参数的影响,以期对浅沟侵蚀过程量化研究和坡面土壤侵蚀预报模型的建立提供科学依据。

## 1 研究区概况

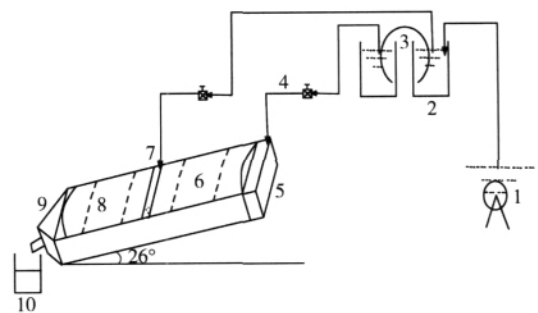
研究区位于陕西省延安市燕儿沟小流域内,地处延安市南3 km处,地势西北高,东南低,地形以梁、峁为主。土壤为典型的黄绵土,粉粒含量高,有机质含量为0.9%。耕作层土壤密度为1.15 g/m<sup>3</sup>左右。该区年平均降雨量480~630 mm,降雨年际变

化大,多集中于夏季,雨型以短历时暴雨为主。

## 2 试验设计与研究方法

### 2.1 试验设计

试验地布设在燕儿沟流域庙河村对面山上的苹果园里,尽可能选取原来就发育有浅沟的完整坡面,或依照具体地形修整成两肩高中间低的瓦背状浅沟。设宽1 m、长10 m、坡度为26°浅沟小区。试验利用水窖供水,采用水泵和阀门控制流量,用标准径流桶对放水流量进行率定。将10 m小区分为上下2个,通过小区相连的方式来模拟上方来水对下方小区水动力学参数及产沙的影响。在小区上方放置一个与小区同宽的溢流槽,保证试验中水是均匀地从溢流槽流出,在小区中部,将有无数小孔的塑料水管,用纱布包裹,并使其形状与坡面浅沟凹状相符,将水管与水箱相连,保证试验中水流均匀地流向下方坡面。顺小区纵向2、4、6和8 m处设定4个观测断面,以测定流速、流宽和流深。小区下方设有集流槽,根据集流桶内的水沙体积可计算出径流量与泥沙量。放水流量分别采用上方放水流量5 L/min、下方放水流量5 L/min;上方放水流量10 L/min、下方放水流量10 L/min;上方放水流量15 L/min、下方放水流量10 L/min;另外还对下方5 m小区进行放水流量为5和10 L/min的无上方来水来沙试验。单场试验重复次数为2。野外放水冲刷试验系统示意图见图1。



1. 潜水泵; 2. 储水箱; 3. 连接器; 4. 阀门;  
5. 溢流槽; 6. 10 m × 1 m 小区; 7. 塑料水管;  
8. 测流断面; 9. 集流槽; 10. 接样桶。

图1 野外放水冲刷试验系统示意图

Fig. 1 Sketch map of outdoor scouring erosion experimental apparatus

### 2.2 试验过程及数据获取

试验前测量土壤密度和前期含水量,试验开始,记录产流时间,产流后前3 min内每1 min接1次水样,3 min后每3 min接1次水样。用体积法量测流量,用取样烘干法测含沙量,用高锰酸钾溶液示踪法

每隔 5 min 测量各断面处流速,用测针法量测断面水深,流宽用卡尺量测,试验历时 40 min。

通过野外放水冲刷试验,用断面平均流速、雷诺数、弗劳德数、阻力系数、剪切力、水流功率表示浅沟水流的水力学参数。主要计算公式如下。

断面平均流速  $v$  为各时段流速大小的平均值,单位是  $m/s$ 。

$$Re = \frac{vR}{\nu}$$

式中:  $Re$  为雷诺数,是水流惯性力与黏性力之比,量纲为 1,  $Re < 500$  水流为层流,  $Re > 500$  水流处于紊流状态;  $v$  为平均流速,  $m/s$ ;  $R$  为水力半径,  $m$ ;  $\nu$  为运动黏性系数,  $m^2/s$ 。

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gR}}$$

式中:  $Fr$  为弗劳德数,是水流的惯性力与重力的比值。可以用  $Fr$  反映水流流态,当  $Fr < 1$  时水流为缓流,当  $Fr > 1$  时水流为急流;  $g$  为重力加速度,  $m/s^2$ 。

$$f = \frac{8gRJ}{v_1^2}$$

式中:  $f$  为阻力系数,表征了水流在流经坡面时所受的阻力情况;  $J$  为水力能坡,  $m/m$ ;  $v_1$  为断面平均流速,  $m/s$ 。

$$S = QgRJ$$

式中:  $S$  为水流剪切力,  $Pa$ ,是反应水流对浅沟沟床土壤剥蚀力大小的参数;  $Q$  为水流平均含沙量时的密度,  $kg/m^3$ ,取  $1.8 kg/m^3$ 。

$$P = Sv$$

式中:  $P$  为水流功率,  $N/(m \cdot s)$ ,表征水流流动时的挟沙能力的参数。

### 3 结果与分析

#### 3.1 上方来水对浅沟水动力参数的影响

3.1.1 上方来水对浅沟水流流速的影响 不同放水流量下,上方含沙水流汇入浅沟侵蚀槽后,导致浅沟水流流速明显增大。从图 2 可以看出,上方汇水汇沙导致浅沟下方流速明显增大,且随着上方汇水流量的增大而增大。由于受微地貌的影响,浅沟侵蚀过程流速的变化是不均匀的,随着侵蚀的发生,水流流速出现整体递减的趋势,说明坡面浅沟侵蚀过程以侵蚀-搬运为主,随着上方泥沙的运移,下方水流进行挟沙需要消耗较多的能量,其水流冲击能力相对减少,因此,浅沟水流流速变小。

3.1.2 上方来水对浅沟水流雷诺数的影响 有无

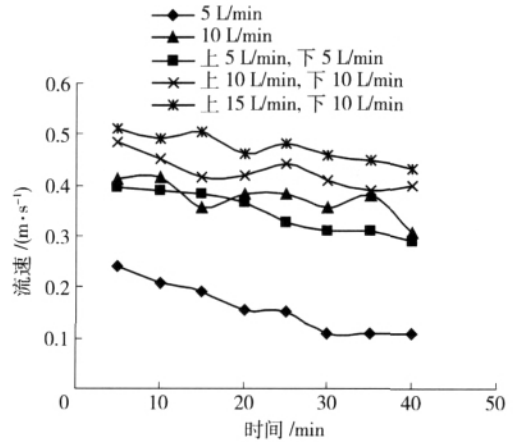


图 2 26°时不同放水流量有无上方来水流速随时间的变化

Fig. 2 Flow velocity over time with or without up-slope runoff in different water discharge at slope of 26°

上方汇流对浅沟水流雷诺数具有明显的影响。雷诺数随着放水流量的增大而增大,上方来水来沙的汇入,使下坡浅沟水流的紊动性显著增加,雷诺数变大,从而增大了浅沟侵蚀产沙量。在坡度为 26°时,无上方来水时浅沟水流雷诺数变化于 1 165 ~ 8 689 之间,大于 500,浅沟水流属于紊流状态;与无上方来水相比,有上方来水时的浅沟水流雷诺数增大 33% ~ 76%。

从图 3 可以看出,雷诺数随着放水流量的增大而增大,上方汇水汇沙使下方水流雷诺数呈现递增趋势,当下坡放水流量相同时,雷诺数随着上坡放水流量的增大而增大;因此,在坡度为 26°时,浅沟水流属于紊流,在上方来水来沙的作用下,浅沟水流雷诺数迅速增大,浅沟水流搬运泥沙的能力增强,侵蚀产沙量增大。

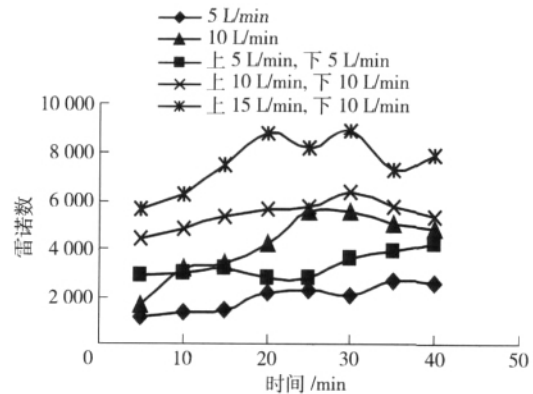


图 3 26°时不同放水流量有无上方来水雷诺数随时间的变化

Fig. 3 Reynolds number over time with or without up-slope runoff in different water discharge at slope of 26°

3.1.3 上方来水对浅沟水流弗劳德数的影响 弗劳德数随着水流紊动强度的增大而增大,上方来水来沙的汇入对浅沟水流弗劳德数有显著的影响。无上方来水浅沟水流的弗劳德数介于 1.21 ~ 4.35 之间,其流态属于急流。与无上方来水相比,上方来水使浅沟水流的弗劳德数增加 21% ~ 47%,当下坡放水流量相同时,上方来水为 15 L/min 的弗劳德数比 10 L/min 的大 26%。

从图 4 可以看出,浅沟水流弗劳德数随着上方来水来沙的汇入显著增大,上方来水来沙的增大亦使弗劳德数变大;弗劳德数最大值出现在放水初期,最小值出现在放水末期。随着放水时间的持续,浅沟形态趋于稳定,水流紊动强度减小,故弗劳德数随放水时间呈递减趋势。

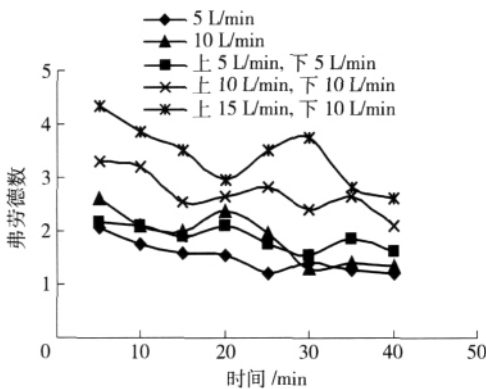


图 4 26°时不同放水流量有无上方来水弗劳德数随时间的变化

Fig. 4 Froude number over time with or without up-slope runoff in different water discharge at slope of 26°

3.1.4 上方来水对浅沟水流阻力系数的影响 水流进入浅沟后,必然受到摩擦阻力的影响,其阻力主要来自水流中沙粒本身的摩擦力对水流的阻碍作用。在坡度为 26°时,浅沟水流的阻力系数介于 0.69 ~ 1.98 之间,上方来水的汇入使浅沟水流阻力系数减小,与无上方来水相比其值减小 11% ~ 13%。

从图 5 可以看出:放水流量与阻力系数成反比,上方来水汇入浅沟侵蚀槽后,阻力系数明显减小,且随着上方来水的增大而减小;整个放水过程中,由于上方来沙汇入下方浅沟侵蚀槽,水流摩擦力增大,故阻力系数随着放水时间的持续逐渐变大。

3.1.5 上方来水对浅沟水流剪切力的影响 剪切力反应水流对土壤剥蚀力的大小,上方来水进入浅沟侵蚀槽后,增加了下方汇水流量,浅沟水流剪切力相应增大。在坡度为 26°时,不同放水流量浅沟水流剪切力介于 1.763 ~ 4.521 之间,与无上方

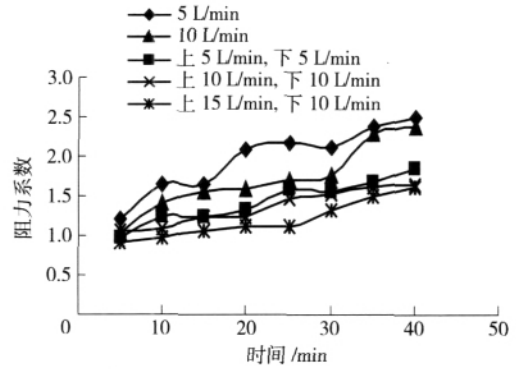


图 5 26°时不同放水流量有无上方来水阻力系数随时间的变化

Fig. 5 Daycey-weisbach coefficient over time with or without up-slope runoff in different water discharge at slope of 26°

来水相比,上方来水使浅沟水流剪切力增加 18% ~ 42%。

从图 6 可以看出:浅沟侵蚀槽在接受上方来水后,其水流剪切力显著增大,同时,放水流量的增加也使浅沟水流剪切力增大。浅沟水流剪切力随着放水时间的持续,呈现出递增趋势,只有在放水流量为“上 5 L/min,下 5 L/min”时,其值在整个放水阶段比较平稳。

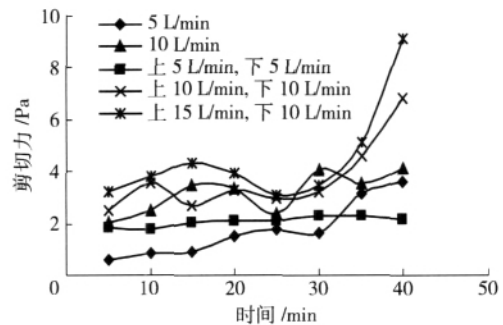


图 6 26°时不同放水流量有无上方来水剪切力随时间的变化

Fig. 6 Shearing force over time with or without up-slope runoff in different water discharge at slope of 26°

3.1.6 上方来水对浅沟水流功率的影响 水流功率表征水流流动时的挟沙能力,流动水体将势能转化为动能,对浅沟侵蚀槽造成破坏。上方来水使浅沟水流的水流功率增加 29% ~ 72%,同时,放水流量的增加,也使浅沟水流的水流功率增大。

从图 7 可以看出:浅沟水流功率随上方来水的汇入而显著增大,下坡放水流量相同时,水流功率随上方来水量的增大而增大;水流功率随放水时间的持续而递增,唯有在“上 5 L/min,下 5 L/min”时,其值波动比较平缓。

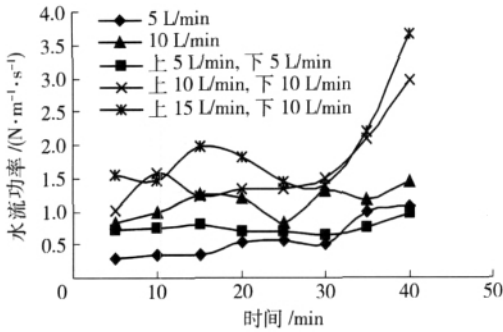


图7 26°时不同放水流量有无上方来水水流功率随时间的变化

Fig. 7 Stream power over time with or without up-slope runoff in different water discharge at slope of 26°

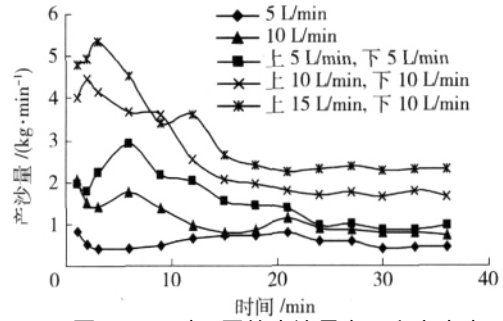


图8 26°时不同放水流量有无上方来水浅沟侵蚀产沙量随时间的变化

Fig. 8 Sediment yield over time with or without up-slope runoff in different water discharge at slope of 26°

### 3.2 上方来水对浅沟侵蚀产沙量的影响

不同放水流量对坡面浅沟侵蚀产沙过程具有显著影响,而上方来水的汇入加剧了这一过程。根据实验设计分析上方来水对浅沟侵蚀产沙的影响,点绘出浅沟水流的产沙过程线。产沙过程大致为,随着放水时间的延长,产沙量在出现峰值后逐渐减少,最后趋于稳定。

从图8可以看出,上方来水对浅沟侵蚀的产沙量贡献很大,上方来水量大的,产沙增量。与无上方来水相比,有上方来水的浅沟侵蚀产沙过程较为复杂,有多峰多谷的特点。其最大值出现在产流初期,此时由于土粒松散,易被剥蚀,再加上上方来水汇入浅沟侵蚀槽,产沙过程线便出现峰值。随着放水时间的延长,待坡面土壤水分饱和时,即坡面产流达到峰值后,产沙过程又出现峰值。当产流渐渐趋于稳定,浅沟侵蚀产沙最终趋于稳定。

### 3.3 浅沟侵蚀产沙量与水动力参数的关系

上方来水引起下方浅沟侵蚀产沙相对增量可用下式计算:

$$\Delta M = M_{sx} - M_x$$

式中:  $\Delta M$  为产沙相对增量, g/min;  $M_{sx}$  为有上方来水时浅沟侵蚀产沙量, g/min;  $M_x$  为相对应的无上方来水时下方浅沟侵蚀产沙量, g/min。剪切力和水流功率计算式同上,  $\Delta P$  为水流功率相对增量, N/(m·s);  $\Delta S$  为剪切力相对增量, Pa。

上方来水对坡下方浅沟侵蚀产沙量的影响与浅沟水力学参数有密切的关系,用相关分析法对实验资料进行分析,得知上方来水引起的产沙量相对增量与浅沟水流的剪切力和水流功率相对增量的相关性较好,浅沟侵蚀产沙量相对增量与剪切力相对增量和水流功率相对增量均呈幂函数关系(表1)。

从图9可以看出,上方来水引起的产沙相对增

表1 水流剪切力、水流功率与产沙量的关系

Tab. 1 Relationship between sediment yield and flow shearing force and stream power

放水流量	产沙量与水流剪切力关系	相关系数	产沙量与水流功率关系	相关系数
上方来水为 5 L/min	$\Delta M = 250.2e^{1.1874\Delta S}$	0.863 0	$\Delta M = 306.1e^{2.87\Delta P}$	0.898 3
上方来水为 10 L/min	$\Delta M = 619.98e^{1.069\Delta S}$	0.824 3	$\Delta M = 589.8e^{1.98\Delta P}$	0.878 9

量与水流剪切力和水流功率相对增量呈幂函数关系,即随着浅沟水流剪切力和水流功率的增大,侵蚀产沙量迅速增大。

## 4 结论与讨论

1) 上方来水的汇入使浅沟水流流速明显增大,雷诺数、弗劳德数、水流功率和剪切力分别增大了33%~76%、21%~47%、29%~72%、18%~42%,阻力系数减少了11%~13%,导致浅沟侵蚀产沙量明显增大。除流速和弗劳德数外,其余水动力参数

随放水时间的延长呈递增趋势。

2) 上方来水对浅沟侵蚀产沙量贡献很大,上方来水量大的,产沙增量亦愈大。与无上方来水情况相比,有上方来水的浅沟侵蚀产沙过程较为复杂,有多峰多谷的特点,其产沙过程大致为,随着放水时间的延长,产沙量在出现峰值后逐渐减少,最后趋于稳定。

3) 浅沟水流剪切力和功率是影响浅沟侵蚀产沙量的重要水动力学参数。上方来水引起坡下方浅沟侵蚀产沙量相对增量与浅沟水流的剪切力和水流

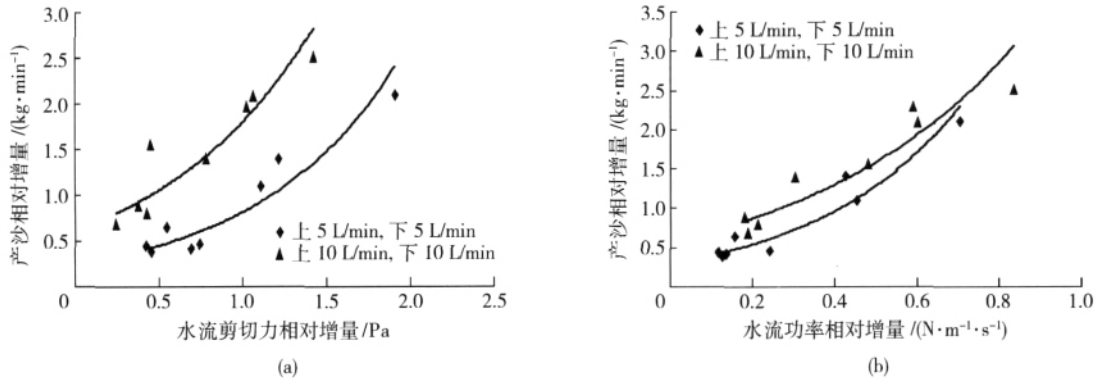


图9 不同放水流量水流剪切力相对增量和水流功率相对增量与产沙量相对增量的关系

Fig.9 Relationship between stream power, shearing force increment and sediment yield increment relatively in different water discharge

功率相对增量均呈幂函数关系。

上方来水来沙的汇入,加速了坡下方浅沟侵蚀的发展,并使浅沟侵蚀过程更为复杂。笔者在现有条件下做了一些有益的探索,而诸如不同含沙量的上方来水、不同下垫面影响因子以及复杂自然环境因子的影响在今后的工作中还需进一步研究。

## 5 参考文献

- [1] 许建民. 黄土高原浅沟发育主要影响因素及其防治措施研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 39-41
- [2] 刘志, 江忠善. 降雨因素和坡度对片蚀影响的研究[J]. 水土保持通报, 1994, 14(2): 19-22
- [3] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区站流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1-9
- [4] 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
- [5] 张科利. 黄土坡面侵蚀产沙分配及其与降雨特征关系的研究[J]. 泥沙研究, 1991(4): 39-47
- [6] Zheng Fenli, Huang Chihua. Gully erosion [A]. In: Lal Rattan edited. Encyclopedia of Soil Science [M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 2002: 630-634
- [7] 张科利, 唐克丽, 王斌科. 黄土高原坡面浅沟侵蚀特征的研究[J]. 水土保持学报, 1991, 5(2): 8-13
- [8] Woodward D E. Method to predict crop and ephemeral gully erosion[J]. Catena, 1999, 37(3-4): 393-399
- [9] Nachtergaele J, Poesen J, Vandekerckhove L, et al. Testing the ephemeral gully erosion model for two mediterranean environments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26(1): 17-30
- [10] 郑粉莉, 唐克丽. 降雨动能对坡耕地细沟侵蚀影响的研究[J]. 人民黄河, 1995, 17(7): 22-24
- [11] 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
- [12] 肖培青, 郑粉莉. 细沟侵蚀过程与细沟水流水力参数的关系研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(1): 54-57
- [13] 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
- [14] 王文龙, 雷阿林, 李占斌, 等. 土壤侵蚀链内细沟浅沟切沟动力机制研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 471-475
- [15] 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: 95-124
- [16] 陈浩. 降雨特征和上方来水对产沙的综合影响[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 17-23

(责任编辑: 宋如华)