

# 黄土丘陵沟壑区浅沟水流水动力学参数实验研究

龚家国<sup>1,2</sup>, 王文龙<sup>1,3†</sup>, 郭军权<sup>4</sup>

(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, 712100, 陕西杨凌;  
2. 中国科学院研究生院, 100049, 北京; 3. 西北农林科技大学, 712100, 陕西杨凌; 4. 延安职业技术学院, 716000, 陕西延安)

**摘要** 浅沟侵蚀是黄土丘陵沟壑区重要的侵蚀类型, 浅沟水流的水动力学参数研究是建立浅沟侵蚀物理模型或概念模型的基础。以黄土丘陵沟壑区延安市燕儿沟小流域的坡地为对象, 通过野外放水冲刷实验, 对浅沟水流的水动力学参数变化特征进行研究。结果表明: 浅沟水流属于紊流范围, 大多数情况下是急流; 在坡度 18°左右时, 携沙水流的流速最小, 阻力最大, 此时水流的能量分配在侵蚀与携沙之间达到平衡; 浅沟水流在坡度 26°左右时流速达到最大, 水流功率达到最大, 最利于浅沟侵蚀的发生和发展。研究结果可为黄土区浅沟侵蚀物理模型的建立提供理论支撑。

**关键词** 浅沟侵蚀; 水动力学参数; 黄土丘陵沟壑区

## Ephemeral gully erosion experiment on hydrodynamics parameter of concentrated flow in hilly area of Loess Plateau

Gong Jiaguo<sup>1,2</sup>, Wang Wenlong<sup>1,3</sup>, Guo Junquan<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, 712100, Yangling, Shaanxi; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 100049, Beijing; 3. Northwest Science and Technology University of Agriculture and Forestry, 712100, Yangling, Shaanxi; 4. Yan An Vocational and Technical College, 716000, Yan'an, Shaanxi; China)

**Abstract** Ephemeral gully erosion is an important erosion type in Loess Plateau. Study of the hydrodynamic parameters of ephemeral gully flow is the base of establishing process-based or conceptual water erosion models. Hydrodynamic parameters were studied by scouring experiment on the slope of Yanergou watershed. It was concluded that ephemeral gully flow is turbulent flow, mostly is supercritical flow, and nearby the slope of 18° the power distribution of ephemeral gully flow was balanced between erosion and sediment transport, and nearby the slope of 26° the velocity and the stream power of ephemeral gully flow are the biggest and then this slope gradient is the best for the generation and development of ephemeral gully erosion.

**Key words** ephemeral gully erosion; hydrodynamic parameter; hilly area of Loess Plateau

浅沟水流的水动力学参数研究是建立浅沟侵蚀物理模型或概念模型的基础。目前, 国外著名的侵蚀模型都是用一个水动力学参数来描述坡面的土壤侵蚀过程, 如美国的 WEPP(water erosion prediction project) 模型采用了传统的水流剪切力概念, 欧洲的

EUROSEM(european soil erosion model) 和 LISEM(limburg soil erosion model) 模型采用了单位水流功率概念, 澳大利亚的 GUEST(griffith university erosion system template) 模型采用了水流功率概念。这些模型都没有给予浅沟侵蚀足够的重视, 未考虑浅沟侵蚀

收稿日期: 2007-07-17 修回日期: 2007-11-05

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”(40471080, 42201903)

第一作者简介: 龚家国(1977—), 男, 硕士研究生, 助理工程师。主要研究方向: 水文水资源及土壤侵蚀。E-mail: jiaguogong@163.com

† 责任作者简介: 王文龙(1964—), 男, 博士后, 研究员。主要研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。E-mail: ww1@tsinghua.edu.cn

的影响。基于上述不足,美国发展了浅沟侵蚀预报模型 EGEM,但其地区适应性较差<sup>[1-4]</sup>。

浅沟侵蚀在黄土高原地区占有举足轻重的地位,分布面积可占到沟间地的 70% 左右,侵蚀量占坡面侵蚀量的 35% ~ 70%<sup>[5]</sup>。国内对坡面薄层水流侵蚀、细沟侵蚀的水动力学特征研究较多,对浅沟侵蚀主要是野外调查、定点观测等研究居多,浅沟侵蚀预报模型的研究多是通过对外国模型进行经验性修正<sup>[6-7]</sup>。白清俊等<sup>[8]</sup>对坡面细沟股流的流态进行了初步研究,郑良勇等<sup>[9]</sup>通过室内水槽冲刷试验,对黄土区坡面陡坡径流的时空分异特征、坡度与径流雷诺数、Darcy-Weisbach 阻力系数之间的相关关系,以及 Darcy-Weisbach 阻力系数与弗罗德数之间的关系进行了研究,张光辉等<sup>[10]</sup>认为水流功率与土壤分离速率间的关系最为密切,土壤侵蚀过程受水流能量大小的控制。目前国内对浅沟侵蚀的实验研究较少,特别是针对浅沟水流动力学方面的实验研究在黄土区几乎没有,因此,研究黄土区浅沟侵蚀的水力学特性,揭示浅沟水流的水动力机制,对建立黄土区的浅沟侵蚀预报模型具有重要的理论和现实意义。

## 1 研究区概况

研究地点选在位于 E 107°41' ~ 110°31', N 35°21' ~ 37°31' 之间的陕西省延安市燕儿沟小流域内。该地区位于黄河中游,黄土高原南部,地势西北高,东南低,属黄土高原丘陵沟壑区,地形以梁、峁为主。平均海拔 1 000 m 左右。气候属高原大陆性季风气候,春季干旱多风,夏秋温凉多雨,年平均降水量 483.4 ~ 630.8 mm,由南向北递减。降雨多集中在 7—9 月,雨型以短历时暴雨为主。土壤为典型的延安黄绵土,砂粒(0.020 ~ 2.000 mm)、粉粒(0.002 ~ 0.020 mm)和黏粒(小于 0.002 mm)的含量分别为 7.9%、66.7% 和 25.4%,有机质含量为 0.9%,耕作层(0 ~ 20 cm)土壤密度为 1.15 g/cm<sup>3</sup> 左右,20 ~ 60 cm 土层的土壤密度为 1.28 g/cm<sup>3</sup> 左右。

## 2 材料与研究方法

### 2.1 实验布设

实验布设在燕儿沟小流域裸露的坡地上,依照具体地形将坡面以挖方的方法修整成单一坡度小区,小区横断面呈两肩高中间低的瓦背状。共选造了 4 个不同坡度的浅沟小区,小区概况见表 1。在 5 m 长小区上沿坡长方向设 3 个观测断面,第 1 个距小区上端 1 m,然后每隔 2 m 设置观测断面。在 10 m

长小区上沿坡长方向设 4 个观测断面,每隔 2.5 m 设置一个观测断面。利用山顶水窖供水,采用恒水箱和闸阀提供流量恒定的冲刷水流。在小区上端放置溢流箱,溢流端与地面等高并且保持水平,使水流通过溢流箱的缓冲,以均匀的薄层水流形式向小区供水。放水流量采用 4 个级别:10、15、20 和 25 L/min。实际试验时,在实验前后各测定 1 次流量,分析时流量取平均值<sup>[11-15]</sup>。

表 1 实验小区基本资料

Tab. 1 Summary of the experimental plots characteristics

小区编号	坡面坡度/(°)	小区宽/m	小区坡长/m
1	14.0	1	5
2	18.5	1	5
3	26.0	1	10
4	29.0	1	5

### 2.2 数据获取与处理

试验数据包括水温  $t/^\circ\text{C}$ 、流速  $v/(\text{m/s})$ 、流量  $Q/(\text{m}^3/\text{s})$ 、含沙量  $S/(\text{kg}/\text{m}^3)$ 、水流深  $h/\text{m}$ 、水面宽  $b/\text{m}$  等。实验开始和结束时,用普通温度计测量小区上端溢流箱的水温,计算时取平均值;实验开始后,每隔 5 min 用高锰酸钾溶液示踪法测量各断面处流速,用测针法量测断面水深,用卡尺直接量取水面宽;实验开始后前 3 min,每隔 1 min 用体积法量测 1 次流量、用取样烘干法测 1 次含沙量,然后每隔 3 min 测量 1 次流量和含沙量。实验历时 40 min。选用算术平均值进行具体的计算和分析。

通过野外放水冲刷试验数据,对浅沟水流的流速、雷诺数  $Re$ 、弗罗德数  $Fr$ 、Darcy-Weisbach 阻力系数  $f$ 、剪切力  $\tau/(\text{N}/\text{m}^2)$ 、水流功率  $P/(\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s}))$  等水动力学参数特征进行研究。

雷诺数  $Re$  表征径流惯性力和黏滞力的比值,是判别水流运动型态的重要指标。对于明渠水流来说,当  $Re < 500$  时,水流为层流,而当  $Re > 500$  时,为紊流。对于浅沟水流,由于其所处的浅沟沟床的高程和流动方向变化频繁,所以研究中认为,当  $Re > 500$  时,水流为紊流,其计算公式<sup>[13,16]</sup>为

$$Re = vR/\eta$$

式中:  $\eta$  为水的运动粘滞系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ,  $\eta = 0.01775/(1 + 0.0337t + 0.0000221t^2)$ ;  $R$  为水力半径,  $\text{m}$ ,  $R = \bar{A}/W_p$ ,  $\bar{A}$  为平均水流截面积,  $\text{m}^2$ ,  $\bar{A} = Q/v$ ,  $W_p$  为湿周,  $\text{m}$ ,  $W_p = b + 2h$ 。

弗罗德数  $Fr$  表征水流惯性力和重力的比值,是判断水流流态的重要指标。当  $Fr < 1$  时水流为缓

流,  $Fr > 1$  时水流为急流, 其计算公式<sup>[13, 16]</sup>为

$$Fr = v / \sqrt{gh}$$

Darcy-Weisbach 阻力系数  $f$  表示水流剪切力做功与水流动能的比值, 是反映水流流动时所受阻力大小的参数, 其计算公式<sup>[13, 16]</sup>为

$$f = 8RJg / v^2$$

式中,  $J$  为水力坡度,  $m/m$ ,  $J = [l \sin \theta - (v^2 / 2g)] / l$ ,  $l$  为坡长,  $m$ 。

剪切力  $\tau$  是反映水流在流动时对浅沟沟床土壤的剥蚀力大小的参数, 其计算公式<sup>[13, 16]</sup>为

$$\tau = \rho g R J = \gamma R J$$

式中,  $\gamma = \rho g$ , 水流密度  $\rho$  取平均含沙量时的密度  $1\ 080\ kg/m^3$ 。

水流的水流功率  $P$  是反映水流流动时的挟沙能力的参数, 其计算公式<sup>[13, 16]</sup>为

$$P = \tau v$$

### 3 结果与分析

实验中测定的浅沟水流基本水动力学参数如表 2 所示。

表 2 实验浅沟水流基本水动力学参数表

Tab. 2 Summary of hydrodynamics parameters of ephemeral gully flow

水动力学参数	流速 $v$ $m \cdot s^{-1}$	雷诺数 $Re$	弗罗德数 $Fr$	Darcy-Weisbach 阻力系数 $f$	水流剪切力 $\tau$ $N \cdot m^{-2}$	水流功率 $P$ $N \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
变化范围	0.17~ 0.89	380~ 7 300	0.25~ 6.40	0.02~ 12.70	0.002~ 0.080	0.001~ 0.022
平均值	0.44	2565	1.48	1.34	0.020	0.008

#### 3.1 浅沟水流的流速变化特征

由表 2 可知, 流速的变化范围在  $0.17 \sim 0.89\ m/s$  之间, 平均值为  $0.44\ m/s$ 。最大流速出现在跌水坑的上部, 最小流速出现在跌水坑下游的水平沟道段。图 1 为不同坡度下流速随坡长变化曲线, 可以看出, 坡度较缓时, 由于水流需要流过较长的坡面才能获得足够的能量用于侵蚀和泥沙输移, 同时随着侵蚀和泥沙输移对水流动能的消耗速度大于其因位置降低获得动能的速度, 使得流速又开始降低。图 1(c)、(d) 表明大坡度坡面上由于水流冲淤变化

距离的缩短, 从而使得跌水的落差变小, 水流流速变化不大, 甚至出现图 1(d) 中的全坡面水流不断加速的情况。综合图 1 可以看出: 不同坡度的坡面上, 流速沿坡长方向的变化规律不同, 这是由于不同坡面上的冲淤变化段的长度不等, 同时伴随着沟壁崩塌等对流速的剧烈改变使得各断面的平均流速随坡长的变化规律不明显, 从而说明不同坡度坡面上浅沟水流的能量耗散规律差别较大。

同时从图 2 流速随坡度变化曲线可以看出, 相同放水流量时流速随坡度的变化趋势基本一致: 流

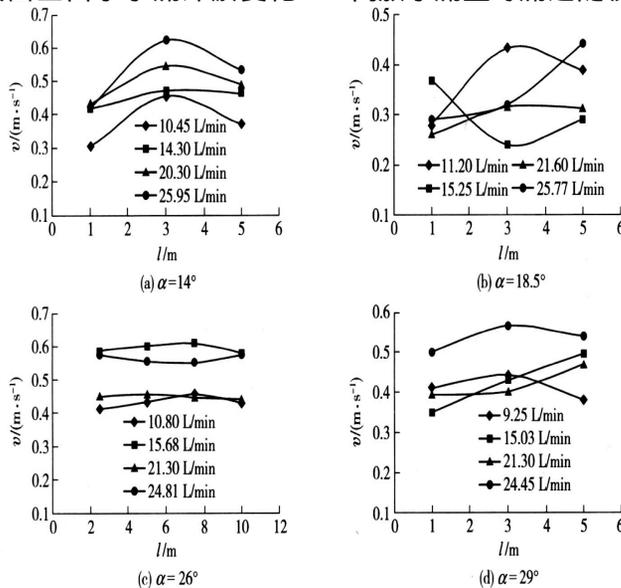


图 1 不同坡度  $\alpha$  流速  $v$  随坡长  $l$  变化曲线

Fig. 1 Relationship between  $v$  and slope length on different gradient

速随坡度的增大上下波动,在坡度  $18^\circ$  左右时流速最小,在  $26^\circ$  左右时流速最大。由于侵蚀是一个动态的侵蚀—输移—沉积—再侵蚀的过程<sup>[17]</sup>,所以在  $18^\circ$  左右的坡面上,浅沟水流因位置降低而获得的动能在侵蚀和携沙二者间的分配达到平衡,使得水流的流速最小,而在  $26^\circ$  左右的坡面上,水流的潜在侵蚀能力最大,这时的水流流速最大,水流动能最大,最利于浅沟侵蚀的发生和发展。

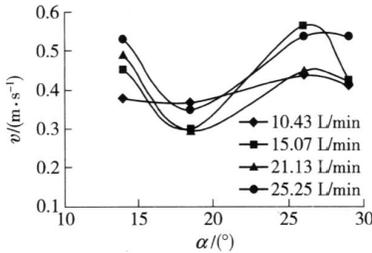


图2 流速  $v$  随坡度  $\alpha$  变化曲线

Fig. 2 Relationship between  $v$  and slope gradient

### 3.2 浅沟水流的雷诺数 $Re$ 变化特征

从表 2 可知,浅沟水流的雷诺数的变化范围在

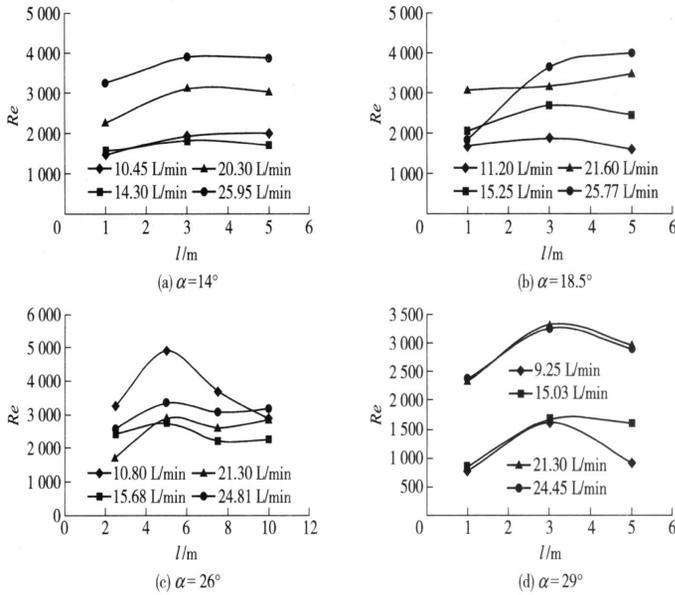


图3 不同坡度  $\alpha$  雷诺数  $Re$  随坡长  $l$  变化曲线

Fig. 3 Relationship between  $Re$  and slope length on different gradient

### 3.3 浅沟水流的弗罗德数 $Fr$ 变化特征

从表 2 可知,浅沟水流的弗罗德数的变化范围在 0.25~ 6.40 之间,平均值为 1.48,其中有 34% 的弗罗德数  $Fr$  小于 1,说明浅沟水流在大多数情况下属于急流,只有在发生大的沟壁崩塌造成沟道堵塞及跌水处,流出的水流出现短时间的缓流状态。图 6 为不同坡度弗罗德数随坡长变化曲线,可以看出,

380~ 7300 之间,平均值为 2565,其中只有 1% 的雷诺数小于 500,说明浅沟水流基本属于紊流,只有在发生大的沟壁崩塌造成沟道堵塞时才会剧烈改变水流流态,使得水流出现短时间的层流状态。图 3 为不同坡度雷诺数随坡长变化曲线,可以看出不同坡度时,雷诺数随坡长的变化基本表现为小—大—小的变化趋势。这是由于水流在坡的上端随着高度的降低,势能不断转化为水流的动能,水流的侵蚀能力不断增大所致。同时,由于水流层很薄(小于 4 cm),沟道的摩擦阻力很容易使水流发生扰动,随着流速的增大,水流的扰动也不断加剧。随着侵蚀的不断发生,使得水流的动能不断消耗于侵蚀及携带泥沙上,从而使水流的紊动状态维持在一定的水平上。图 4 为雷诺数随坡度变化曲线,可以看出,不同坡度时,雷诺数的变化趋势比较复杂。图 5 为雷诺数随流量变化曲线,可以看出,在同一坡度情况下,水流的流态基本随着流量的增大而紊动的越来越剧烈,这是由于随着放水流量的加大,水流的惯性力不断增大造成的。

不同坡度时,弗罗德数随坡长的增大变化趋势有较大差异,但总体表现为抛物线的变化趋势。图 7 为弗罗德数随坡度变化曲线,可以看出,弗罗德数的变化随坡度的增大存在近周期性的上下波动情况,说明弗罗德数的变化与浅沟水流的周期性冲淤变化有密切的关系。

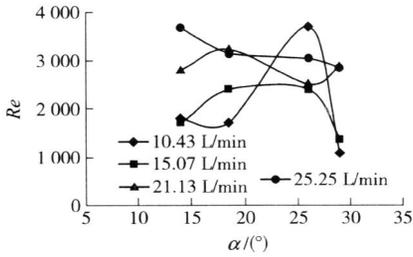


图 4 雷诺数  $Re$  随坡度  $\alpha$  变化曲线

Fig. 4 Relationship between  $Re$  and slope gradient

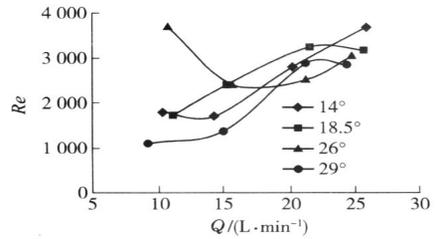
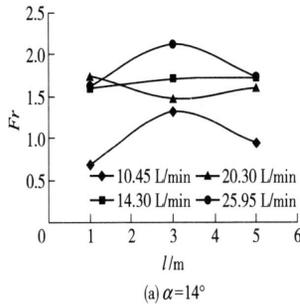
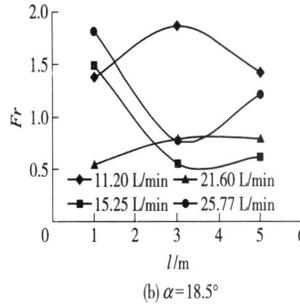


图 5 雷诺数  $Re$  随流量  $Q$  变化曲线

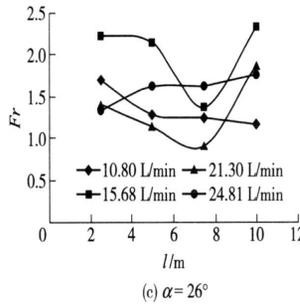
Fig. 5 Relationship between  $Re$  and flow discharge



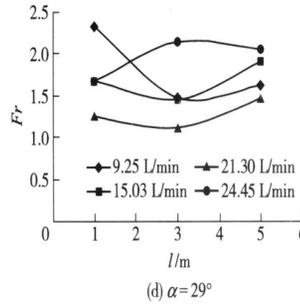
(a)  $\alpha=14^\circ$



(b)  $\alpha=18.5^\circ$



(c)  $\alpha=26^\circ$



(d)  $\alpha=29^\circ$

图 6 不同坡度  $\alpha$  弗罗德数  $Fr$  随坡长  $l$  变化曲线

Fig. 6 Relationship between  $Fr$  and slope length on different gradient

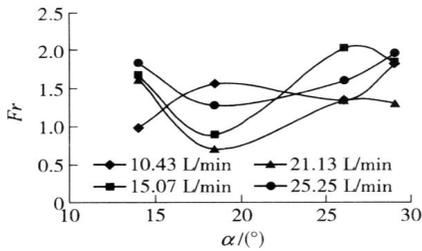


图 7 弗罗德数  $Fr$  随坡度  $\alpha$  变化曲线

Fig. 7 Relationship between  $Fr$  and slope gradient

### 3.4 浅沟水流的 Darcy-Weisbach 阻力系数 $f$ 变化特征

从表 2 可知, 浅沟水流的阻力系数变化范围在 0.02~ 12.70 之间, 平均值为 1.34。图 8 为阻力系数随坡长变化曲线, 可以看出不同坡度时, 阻力系数随坡长的增大变化趋势有很大差异:  $14^\circ$  坡时阻力系数随坡长的变化趋势基本是开口向上的抛物线关系, 而  $26^\circ$  和  $29^\circ$  坡时阻力系数随坡长的变化基本呈开口

向下的抛物线关系,  $18.5^\circ$  时阻力系数随坡长的变化趋势则不明显。图 9 为阻力系数随坡度变化曲线, 可以看出: 阻力系数的变化随坡度的增大存在近周期性的上下波动情况; 随着流量的增大, 不同坡度时水流的平均阻力系数分布在 0.5~ 4.3 之间, 其中  $18.5^\circ$  时的阻力系数明显高于其他坡度, 说明浅沟水流在此时水流所受到的阻力最大, 与前面在坡度  $18^\circ$  左右时流速最小相呼应。

### 3.5 浅沟水流的剪切力 $\tau$ 变化特征

从表 2 可知, 浅沟水流的剪切力的变化范围在 0.002~ 0.080  $N/m^2$  之间, 平均值为 0.020  $N/m^2$ 。图 10 为剪切力随坡长变化曲线, 可以看出, 不同坡度时, 水流剪切力随坡长的增大变化趋势有很大不同:  $14^\circ$  坡时水流剪切力随坡长的变化基本呈开口向上的抛物线关系, 而  $26^\circ$  和  $29^\circ$  坡时水流剪切力随坡长的变化基本呈开口向下的抛物线关系,  $18.5^\circ$  时水流剪切力随坡长的变化趋势则不明显。由图 11 和图 12

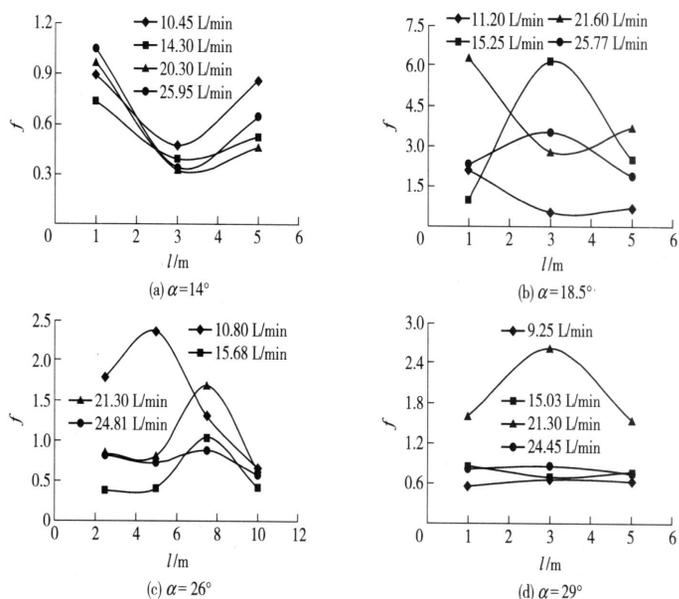


图 8 不同坡度  $\alpha$  阻力系数  $f$  随坡长  $l$  变化曲线

Fig. 8 Relationship between  $f$  and slope length on different gradient

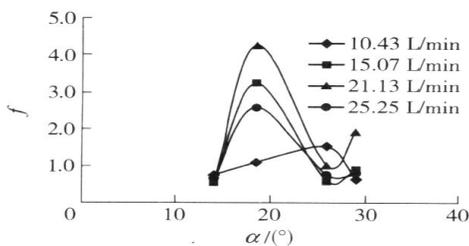


图 9 阻力系数  $f$  随坡度  $\alpha$  变化曲线

Fig. 9 Relationship between  $f$  and slope gradient

可以看出, 水流剪切力与坡度及放水流量的关系比较复杂, 需要进一步研究。

### 3.6 浅沟水流的水流功率 $P$ 变化特征

从表 2 可知, 浅沟水流功率的变化在  $0.001 \sim 0.022 \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{s})$  之间, 平均值为  $0.008 \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。图 13 为水流功率随坡长变化曲线, 可以看出, 不同坡度时, 水流功率随坡长的增大变化趋势基本一致: 即在坡面的上半段 ( $< 3 \text{ m}$ ), 水流功率随着坡长的增加而逐渐增大; 在坡面的下半段 ( $> 3 \text{ m}$ ), 水流功率增

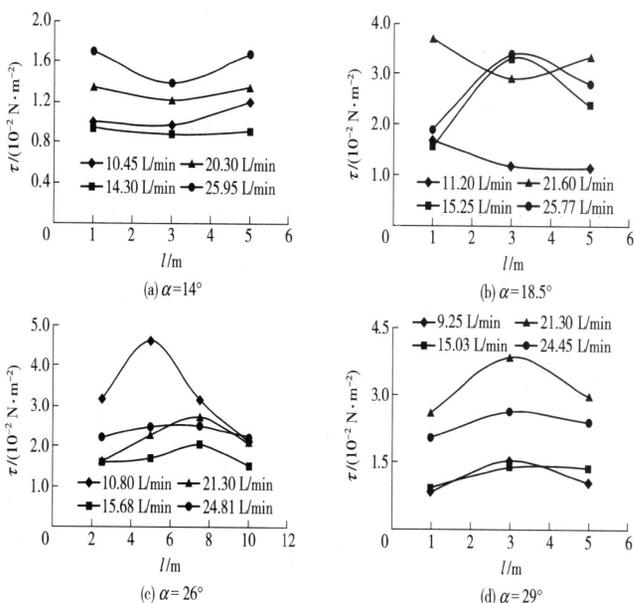


图 10 不同坡度  $\alpha$  水流剪切力  $\tau$  随坡长  $l$  变化曲线

Fig. 10 Relationship between  $\tau$  and slope length on different gradient

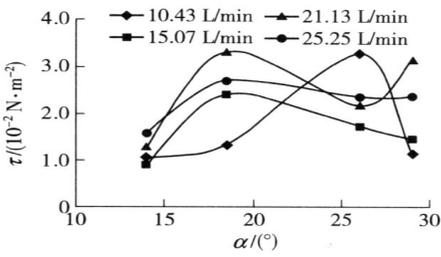


图 11 水流剪切力  $\tau$  随坡度  $\alpha$  变化曲线

Fig. 11 Relationship between  $\tau$  and slope gradient

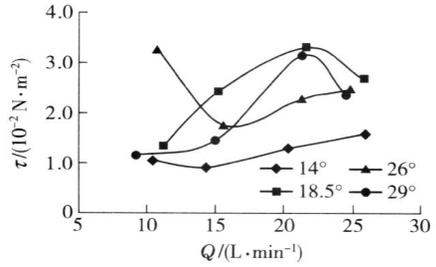


图 12 水流剪切力  $\tau$  随流量  $Q$  变化曲线

Fig. 12 Relationship between  $\tau$  and flow discharge

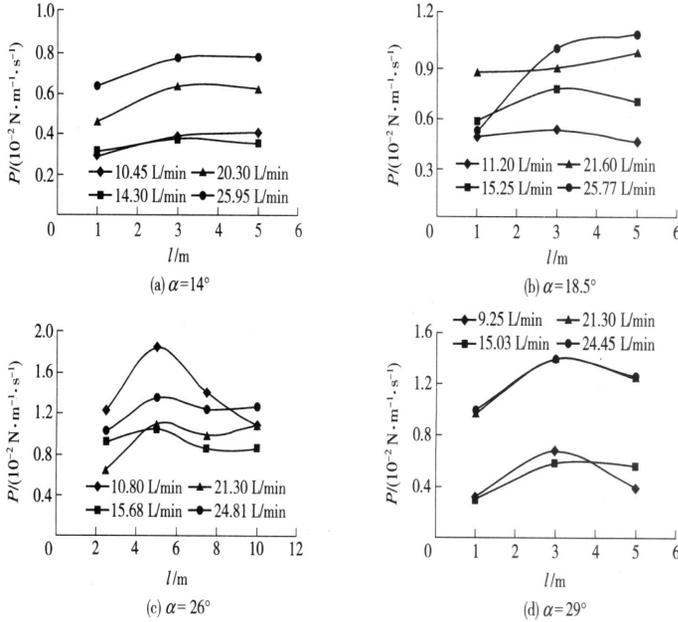


图 13 不同坡度  $\alpha$  水流功率  $P$  随坡长  $l$  变化曲线

Fig. 13 Relationship between  $\omega$  and slope length on different gradient

大的同时, 水流侵蚀能力也不断增强, 由于侵蚀和泥沙输移耗能的不断增大, 水流功率随着坡长的增加又逐渐减小, 单一坡面上水流功率的变化逐渐趋于稳定。图 14 为水流功率随坡度变化曲线, 可以看出, 水流功率在坡度  $26^\circ$  附近达到最大值, 由于水流功率与土壤分离速率间的关系最为密切<sup>[10]</sup>, 说明此

时水流的侵蚀能力最强, 这与张科利等人的研究结果一致<sup>[11]</sup>。图 15 为水流功率随流量变化曲线, 可以看出, 不同坡度情况下, 水流功率随放水流量的增大变化规律较为复杂, 同一坡度情况下, 水流功率随放水流量的增大而逐渐增大。说明在相同条件下, 浅沟水流的侵蚀能力随放水流量的增加而增大。

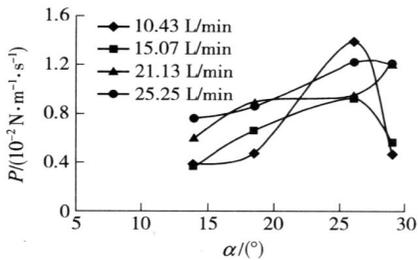


图 14 水流功率  $P$  随坡度  $\alpha$  变化曲线

Fig. 14 Relationship between  $\omega$  and slope gradient

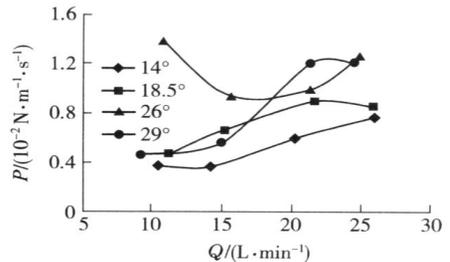


图 15 水流功率  $P$  随流量  $Q$  变化曲线

Fig. 15 Relationship between  $\omega$  and flow discharge

## 4 结论与讨论

1) 雷诺数试验结果表明, 浅沟水流属于紊流范围; 从弗罗德数的试验结果看, 浅沟水流有可能为缓流, 也有可能为急流, 但大多数情况下是急流。

2) 浅沟水流在 18° 坡附近时, 携沙水流的流速最小, 阻力最大, 此时水流在侵蚀与携沙之间的能量分配达到平衡。

3) 浅沟水流在 26° 坡附近时流速达到最大, 水流功率达到最大, 最利于浅沟侵蚀的发生和发展。

浅沟水流的水动力学参数的影响因素众多而复杂, 本文只是做了一些有益的探索, 还需要做大量深入细致的工作, 特别是在天然降雨条件下的野外定位观测试验研究。

## 5 参考文献

- [1] Capra A, Mazzara L M, Scicolone B. Application of the EGEM model to predict ephemeral gully erosion in Sicily, Italy. *Catena*, 2005(59): 133-146
- [2] Capra A, Scicolone B. Ephemeral Gully Erosion in a Wheat cultivated Area in Sicily (Italy). *Biosystems Engineering*, 2002(83): 119-126
- [3] Valcárcel M, Taboada M T, Paz A, et al. Ephemeral gully erosion in northwestern Spain. *Catena*, 2003(50): 199-216
- [4] Casali J, López JJ, Giráldez JV. Ephemeral gully erosion in southern Navarra (Spain). *Catena*, 1999(36): 65-84
- [5] 唐克丽. 黄土高原地区土壤侵蚀区域特征及其治理途径. 北京: 中国科学技术出版社, 1991: 41-42
- [6] 江忠善, 郑粉莉. 中国土壤侵蚀预报模型研究. 陕西: 中国科学院水土保持研究所图书馆资料, 2001
- [7] 江忠善, 郑粉莉, 武敏. 中国坡面水蚀预报模型研究. 泥沙研究, 2005(4): 1-6
- [8] 白清俊, 沙际德. 黄土坡面细沟流流态的试验研究. *水土保持学报*, 2001, 15(5): 26-32
- [9] 郑良勇, 李占斌, 李鹏. 黄土区陡坡径流水动力学特性试验研究. *水利学报*, 2004(5): 1-7
- [10] 张光辉, 刘宝元, 何小武. 黄土区原状土壤分离过程的水动力学机理研究. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 48-52
- [11] 张科利. 陕北黄土高原丘陵沟壑区坡耕地浅沟侵蚀及其防治途径[D]. 陕西: 中国科学院西北水土保持研究所图书馆, 1998
- [12] 姜永清, 王占礼, 胡光荣. 瓦背状浅沟分布特征分析. *水土保持研究*, 1999, 6(2): 181-184
- [13] 王文龙, 雷阿林, 李占斌. 土壤侵蚀链内细沟浅沟切沟流动力机制研究. *水科学进展*, 2003, 14(4): 471-475
- [14] 张科利, 唐克丽. 黄土高原坡面浅沟特征值的研究. *水土保持学报*, 1991, 5(2): 8-13
- [15] 王文龙, 王兆印, 雷阿林, 等. 黄土丘陵区坡沟系统不同侵蚀方式的水力特性初步研究. *中国水土保持科学*, 2007, 5(2): 11-17
- [16] 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学. 北京: 中国农业出版社, 2002
- [17] Knapen A, Poesen J, Govers G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth Science Reviews*, 2007(80): 75-109

(责任编辑: 宋如华)