

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.016.

艾建卫, 高照良, 娄永才, 等. 含沙量对高陡边坡径流水动力学特性的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 75-82.

AI Jianwei, GAO Zhaoliang, LOU Yongcai, et al. Effects of Sediment Concentration on Hydrodynamic Characteristics of Runoff on High and Steep Slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 75-82.

含沙量对高陡边坡径流水动力学特性的影响

艾建卫¹, 高照良^{1,2}, 娄永才¹, 孙贯芳¹, 李永红^{1,2}, 周富宇¹, 张 洵¹, 王 菊¹

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的]揭示含沙量对高陡边坡水动力学特性的影响,为高陡边坡土壤侵蚀机理模型精度的提升提供理论支撑。[方法]设定3个含沙梯度(0, 4%, 8%)和3个放水梯度(12, 16, 20 L/min),在36°坡面进行野外径流冲刷试验。[结果]随着放水流量的增大,平均流速随着含沙量增加而减小的趋势较小,雷诺数Re随着含沙量增加而减小的趋势较明显;当放水流量为16, 20 L/min时,随着含沙量的增加,坡面流态均由紊流向过渡流发展;弗汝德数Fr随着含沙量的增加而增大,且均大于1,坡面径流流态属于急流。阻力系数 f 与雷诺数Re呈极显著幂函数关系($p < 0.01$),随着含沙量的增加,雷诺数Re对阻力系数 f 的影响逐渐减弱。含沙量与平均流速、雷诺数、阻力系数、水流剪切力和水流功率呈极显著负相关关系($p < 0.01$),相关系数绝对值大小顺序为 $R(Re) > R(\omega) > R(\tau) > R(v) > R(f)$,雷诺数Re是描述水动力学参数与含沙量关系的最佳参数,含沙量与弗汝德数Fr关系不显著,与雷诺数、水流功率、水流剪切力以及流速间的关系可用二元线性函数表示。[结论]含沙量对高陡边坡水动力学特性具有较大影响,未来应增加坡长、坡度、流体性质等变量进一步研究含沙量与坡面水动力学参数之间的关系,为高陡边坡土壤侵蚀机理模型的建立奠定理论基础。

关键词: 土壤侵蚀; 含沙量; 高陡边坡; 水动力学特性

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0075-08

Effects of Sediment Concentration on Hydrodynamic Characteristics of Runoff on High and Steep Slope

AI Jianwei¹, GAO Zhaoliang^{1,2}, LOU Yongcai¹, SUN Guanfang¹,
LI Yonghong^{1,2}, ZHOU Fuyu¹, ZHANG Xun¹, WANG Ju¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University,
Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese
Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to reveal the influence of sediment concentration on the hydrodynamic characteristics of high and steep slopes, which can provide theoretical support for improving the accuracy of soil erosion mechanism model of high and steep slopes. [Methods] Three sediment concentration gradients (0, 4%, 8%) and three flow rate gradients (12, 16, 20 L/min) were set, the field runoff scouring experiment was carried out on a 36° slope. [Results] With the increase of flow rate, the trend of the average flow velocity decreasing with the increase of sediment concentration is small, and the trend of Reynolds number (Re) decreasing with the increase of sediment concentration is more obvious; when the discharge flow rates are 16 L/min and 20 L/min, with the increase of sediment concentration, the slope flow pattern gradually transforms from turbulence to transition; the Froude number (Fr) increases with the increase of

收稿日期: 2022-04-01

修回日期: 2022-06-05

资助项目: 国家重点研发计划项目“沟道径流消能抗冲技术研究”(2016YFC0501706-02)

第一作者: 艾建卫(1997—), 男, 宁夏中卫人, 硕士研究生, 研究方向为工程建设区土壤侵蚀与水土保持。E-mail: ajw9726@163.com

通信作者: 高照良(1969—), 男, 河南灵宝人, 博士, 研究员, 主要从事农业水土工程和荒漠化防治研究。E-mail: gzl@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

sediment concentration, and is greater than 1, and the slope runoff flow pattern belongs to the supercritical flow. The Darcy-Weisbach resistance coefficient (f) and the Reynolds number (Re) have a very significant power function relationship, and with the increase of the sediment concentration, the influence of the Reynolds number (Re) on the Darcy-Weisbach resistance coefficient (f) is gradually weakened. There is a very significant negative correlation between sediment concentration and average flow velocity, Reynolds number, Darcy-Weisbach (f), runoff power (ω) and runoff shear stress (τ) ($p < 0.01$), and the order of absolute value of correlation coefficient is $R(Re) > R(\omega) > R(\tau) > R(v) > R(f)$, the Reynolds number (Re) is the best parameter to describe the relationship between hydrodynamic parameters and sediment concentration, the relationship between sediment concentration and Froude number (Fr) is not significant, but is represented to Reynolds number (Re), runoff power (ω), runoff shear stress (τ), and average flow velocity by a binary linear function. [Conclusion] The sediment concentration has a great impact on the hydrodynamic characteristics of high and steep slopes. In the future, the slope length, slope gradient, fluid properties and other variables should be added to further study the relationship between the sediment concentration and the hydrodynamic parameters of slope surface, laying a theoretical foundation for the establishment of the soil erosion mechanism model of high and steep slopes.

Keywords: soil erosion; sediment concentration; high and steep slope; hydrodynamic characteristics

高陡边坡在降雨或径流作用下极易发生严重的水土流失、滑坡或泥石流等次生灾害,进而对水资源、土壤稳定以及生态环境造成影响^[1]。在高陡边坡土壤侵蚀过程中,含沙量是影响土壤分离、搬运和沉积的重要因素^[2],径流含沙量的变化会改变水流的物理性质,进而影响水流流速分布、流态变化及能量消耗等水动力学特性。生产实践中,坡面土壤侵蚀过程中上方来水均是有一定含沙量的浑水,因此,研究含沙量对高陡边坡径流水动力学特性的影响,有助于高陡边坡土壤侵蚀机理模型精度的提升。

近年来,国内外关于含沙量对坡面径流水动力学特性的影响研究已取得了一些进展。研究成果多集中于缓坡下含沙量与坡面水动力学特性的关系,且不同坡度下含沙量与水动力学参数间的关系存在着共通性与差异性。赵春红等^[3]研究表明在 9° 坡度、不同流量下,随含沙量增加,水流雷诺数 Re 减小,水流紊动强度减弱,弗劳德数、水流流速呈先减小随后突然增大最后趋于稳定的趋势。袁和第等^[4]通过室内人工模拟降雨试验,研究表明, 10° 坡度下径流含沙量与平均流速、弗劳德数、阻力系数、径流功率相关关系极显著,其中平均流速与含沙量的关系最为密切。李浩宏等^[5]认为不同雨强和不同坡度下,含沙量与水流剪切力和水流功率之间存在显著相关关系,单位水流功率是与坡面片蚀水流含沙量变化过程关系最密切的水动力学参数。邓军等^[6]认为含沙量较小时会加速坡面侵蚀,含沙量较大时则会抑制侵蚀,表明含沙量对坡面侵蚀是抑制或促进作用还需进一步研究。

潘成忠^[7]研究表明含沙量对坡面流速的影响较小,缓坡下阻力系数随着含沙量的增大而增大,陡坡下二者的变化趋势不明显。王龙生等^[8]认为陡坡下阻力系数主要受流速的影响较大,受含沙量的影响较小。余冰^[9]认为随着含沙量的增加,平均流速、雷诺数和弗汝德数均呈减小的趋势,坡面径流均属于急流,阻力系数随着含沙量的增大而增大,且陡坡下的变化更明显。张锐波等^[10]研究表明,在 20° 坡度、不同雨强下坡面径流都属于缓流。综上所述,已有研究得出的结果存在一定差别,甚至出现了相反的结论,对于某一水动力学参数在描绘土壤侵蚀过程中更优于其他参数的研究尚未有一致的结论。因此研究不同含沙量水流冲刷下高陡边坡径流水动力学特性至关重要。

鉴于此,本文以高陡边坡为研究对象,在野外径流小区放水冲刷条件下,对不同含沙量下坡面径流水动力学参数,包括径流流速、雷诺数、弗汝德数、Darcy-Weisbach 阻力系数、水流功率、水流剪切力等进行分析,揭示含沙量对水动力学参数的影响,以期高陡边坡土壤侵蚀预报模型精度的提升提供理论支撑。

1 试验材料与方法

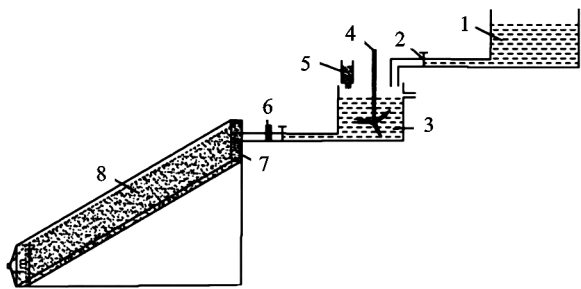
1.1 供试材料

供试土壤为陕西杨凌修建高速公路开挖形成的弃土,经 Malvern 2000 泥沙颗粒分析仪,测得粒径为 < 0.002 mm 的颗粒占 1.48%, $0.002 \sim 0.02$ mm 的颗粒占 41.42%, $0.02 \sim 0.05$ mm 的颗粒占 34.71%, $0.05 \sim 2.0$ mm 的颗粒占 22.39%,按国际制土壤质地

标准划分为粉砂质壤土,含水量 21.05%,自然风干后过 10 mm 筛,剔除大石块和杂草后回填到径流小区用于人工模拟径流冲刷试验,另一部分土样过 2 mm 筛去除小土(石)块,用于配置不同含沙量的浑水。

1.2 试验设计和试验过程

试验于 2019 年 7—9 月在陕西杨凌区马超岭高陡边坡水力侵蚀观测站(34°19'24"N,107°59'36"E)进行。试验小区长 8 m,宽 1 m,填土厚度 50 cm(下层 0.1 m,中层 0.2 m,上层 0.2 m),容重控制在 1.25 g/cm³。试验采用放水冲刷的方式,试验装置包括储水桶、水阀、恒压桶、搅拌机、出土桶、溢流槽、流量计等,在小区上方采用恒压桶放水,确保出流平稳恒定。试验小区及放水冲刷装置如图 1 所示。



注:1 储水桶,2 水阀,3 恒压桶,4 搅拌机,5 出土桶,6 流量计,7 溢流槽,8 试验小区。

图 1 试验小区及放水冲刷装置

基于试验区气象站多年的降雨资料以及试验站径流小区的观测数据,设计放水冲刷强度为 12, 16, 20 L/min(对应的降雨强度分别为 90, 120, 150 mm/h)。鉴于含沙量小于 10% 的水流黏滞系数一般采用爱因斯坦公式进行计算,当含沙量继续增大,水流可能从牛顿流体转化为宾汉体^[6]。因此含沙水流的含沙梯度按混合比设计为 0.4%, 8%。调查数据显示高速公路两侧高陡边坡平均坡度为 32°~43°^[11],因此设计坡度为 36°。

不同含沙量的配置方法^[12]:出土桶出口处装有带刻度的铁片,通过调节不同的刻度可控制出沙速率处于 0~2 500 g/min。当流量为 12 L/min 时,理论出沙速率为 500 g/min(质量浓度),考虑到沙粒沉积使得实际含沙量降低,试验时应使出沙速率大于 500 g/min,试验前在溢流槽出水口处取 3 次水样,烘干后测得质量含沙量,然后率定出试验所需出沙速率所对应的铁片刻度,最终使得出口处泥沙含量为 4%,试验过程中,每隔 10 min 在出水口处取 3 次水样测得含沙量,测得误差小于 5% 可以保证整场试验含沙量的稳定性。同理配置不同流量下 8% 的含沙水流。

试验小区设置 4 个观测断面,间隔 2 m。为了保证每场试验小区坡面土壤含水率等初始条件的一致

性和消除坡面处理的差异性^[13],试验前 24 h 在坡面均匀洒水,直到坡面产生径流后停止洒水并用塑料布覆盖坡面。试验开始前,在 4 个断面 0—20 cm 深度用环刀取样测定初始土壤含水率和容重,土壤容重为 1.25 g/cm³,含水率范围为 22%~30%。同时对放水强度和出口含沙量进行 3 次率定,控制误差小于 5% 后方可进行试验。试验开始后,前 3 min 每 1 min 用 1 000 ml 采样桶收集径流泥沙样品一次,此后每 3 min 测定一次。收集出口处径流泥沙样品的同时测定 4 个断面的流速、流宽以及水深。每场试验结束后重新填土、平整坡面。其中,流速采用高锰酸钾示踪法测定,流宽采用精度为 1 mm 的钢尺测量,水温采用温度计测定。试验时间为 30 min,每个试验处理重复两次。

1.3 数据分析

(1) 平均径流流速(v , m/s)。试验中测得的流速为不同断面集中流的流速,乘以校正系数 0.75 作为断面的平均径流流速^[14]。

(2) 平均径流深(h , m)。坡面侵蚀产流由于薄层水流高度较低,径流深不宜直接测量获取,可以采用平均径流深来代替,计算公式为:

$$h = Q_0 / (vbT) \quad (1)$$

式中: Q_0 为 T 时间内的径流量(m³); b 为过水断面宽度(m); T 为取样的时间间隔(s)。

(3) 雷诺数(Re)。层流: $Re < 500$;过渡流: $500 < Re < 2000$;紊流: $Re > 2000$,计算公式^[15]为:

$$Re = vR / \lambda \quad (2)$$

$$\lambda = 0.000001775 / (1 + 0.0337t + 0.000221t^2) \quad (3)$$

对于含沙量较大的水流采用修正方程调整运动黏度^[16],

$$\lambda_m = \lambda / (1 - S_v / 2 \sqrt{d_{50}}) \quad (4)$$

式中: R 为水力半径(m),可以用平均径流深 h 代替; λ 为流体运动黏滞系数(m²/s); t 为水温(°C); S_v 为体积含沙率(%); d_{50} 为土壤中值粒径(mm),分析得到 d_{50} 为 0.04 mm。

(4) 弗汝德数(Fr)。 $Fr > 1$ 是水流为急流, $Fr < 1$ 时水流为缓流,计算公式^[17]为:

$$Fr = v / \sqrt{gh} \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度(9.8 m/s²)。

(5) Darcy-Weisbach 阻力系数(f)。表示坡面流流动时所受阻力大小,计算公式为:

$$f = 8ghJ / v^2 \quad (6)$$

式中: J 为水力坡度,可用坡度的正弦值近似代替。

(6) 水流剪切力(τ , Pa)。表示引起土壤颗粒分

散和泥沙输移的径流冲刷力,计算公式为^[18]:

$$\tau = \rho g R J \quad (7)$$

式中: ρ 为浑水密度(g/ml)。

(7) 水流功率 $[\omega, \text{N}/(\text{m}/\text{s})]$ 。表示作用于单位面积的水流所消耗的功率,计算公式^[19]为:

$$\omega = \tau v \quad (8)$$

2 结果与分析

2.1 含沙量对径流流速的影响

平均径流流速既是主要的水动力学参数,也是计算

其他水动力学参数的重要依据。点绘不同含沙量下流速随产流历时的变化(图2),当含沙量为0时,平均流速变化介于0.415~0.656 m/s;当含沙量为4%时,平均流速变化介于0.447~0.620 m/s;当含沙量为8%时,平均流速变化介于0.377~0.597 m/s。与含沙量为0相比,含沙量为4%,8%的平均流速分别减少了约4.83%,8.95%。如图3所示,平均流速随着含沙量的增加而减小。这可能是因为含沙量越大,泥沙之间的黏滞力就越强,水流用来搬运泥沙所需的能量越大,水流消耗的能量越多,导致坡面径流流速也越小。

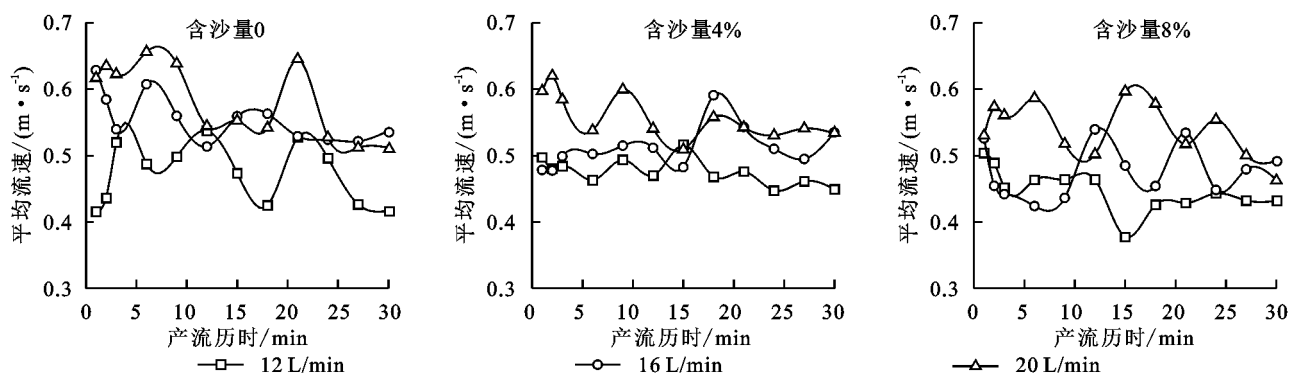


图2 水流平均流速随产流历时的变化

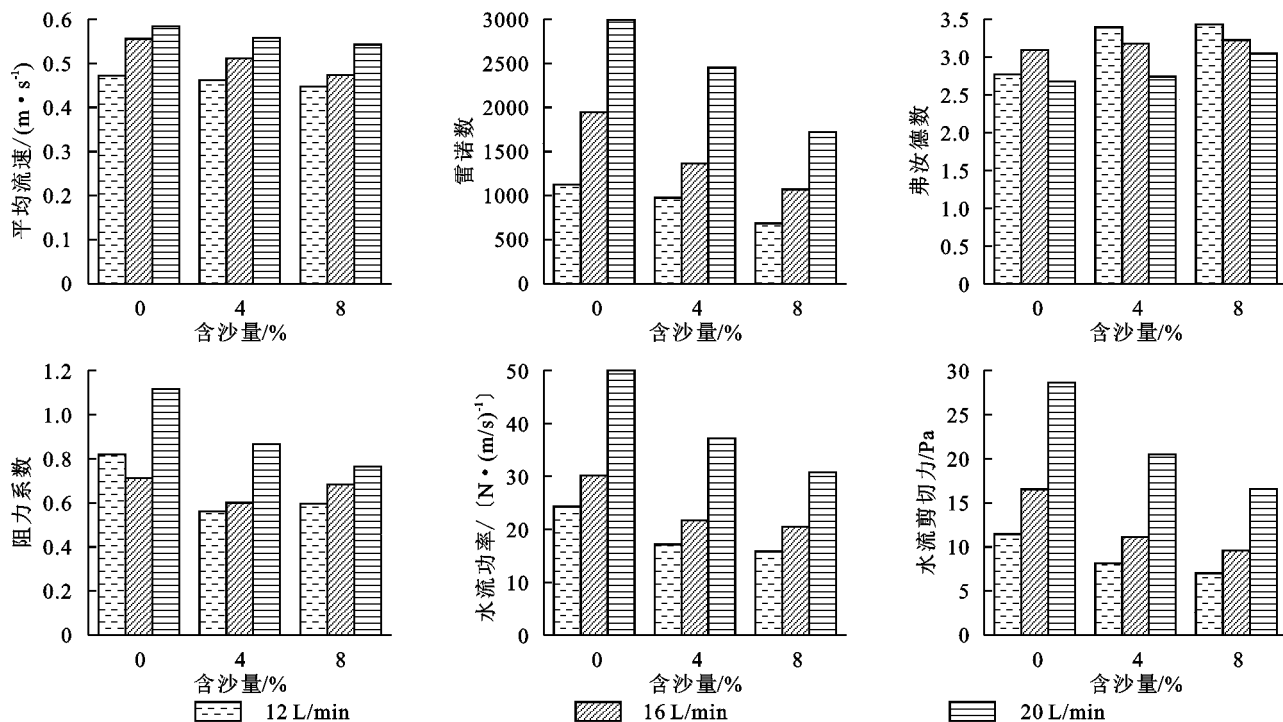


图3 水动力学参数随含沙量的变化

利用 Matlab 对平均流速与含沙量和流量之间关系进行分析,得出拟合方程见公式(9)。平均流速与含沙量和流量有较好的二元线性关系,在不同流量下,随着含沙量的增加,流速呈减小趋势,含沙量与流速的拟合方程系数的绝对值较小,因此随着含沙量的增加,水流平均流速减小的趋势较小。在不同含沙量下,水流的平均流速随着流量的增大而增大。

$$v = -0.006SC + 0.013Q + 0.334$$

$$(R^2 = 0.95, n = 9) \quad (9)$$

式中:SC为含沙量(%);Q为放水流量(L/min)。

2.2 含沙量对坡面流态的影响

2.2.1 含沙量对雷诺数的影响 点绘不同含沙量下雷诺数(Re)随产流历时的变化,如图4所示。根据明渠流理论,当 $Re < 500$ 为层流; $500 < Re < 2000$ 为

过渡流; $Re > 2000$ 为紊流。图4雷诺数随产流历时的变化,由图4可知,当含沙量为0时, Re 的变化范围介于669.34~4383.74,属于过渡流和紊流;当含沙量为4%时, Re 的变化范围介于479.61~3162.35,属于层流、过渡流和紊流;当含沙量为8%时, Re 的变化范围介于485.90~2663.49,属于层流、过渡流和紊流。与含沙量为0相比,含沙量为4%、8%的雷诺数 Re 分别减

小了约23.8%,42.3%。此外,随着含沙量的增加,水流流态从过渡流进入到紊流的时间节点在不断推迟,水流紊动强度不断减弱。当流量为16,20 L/min时,随着含沙量的增加,坡面流态逐渐由紊流向过渡流发展,这表明含沙量越大,泥沙颗粒内部的黏结力越强,水流对坡面的剥蚀力越弱,水流流态越趋于层流,雷诺数越小。

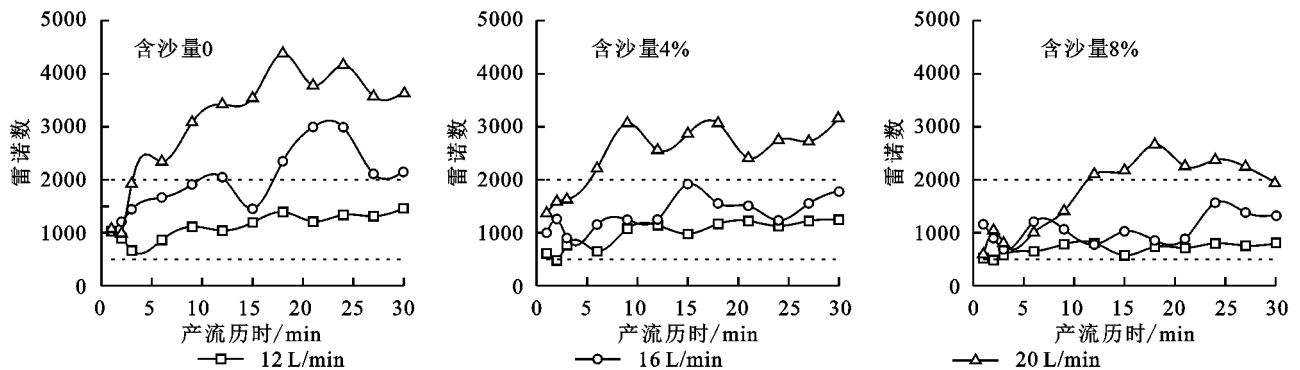


图4 雷诺数 Re 随产流历时的变化

对雷诺数(Re)与含沙量和流量之间关系进行分析,得出拟合方程式(10)。雷诺数 Re 与含沙量和流量有较好的二元线性关系,在不同流量下,随着含沙量的增加,雷诺数 Re 呈减小趋势,含沙量与雷诺数 Re 的拟合方程系数的绝对值较大,因此随着含沙量的增加,雷诺数 Re 减小的趋势更明显。在不同含沙量下,雷诺数 Re 随着流量的增大而增大。

$$Re = -108.105SC + 182.276Q - 892.205$$

$$(R^2 = 0.94, n = 9) \quad (10)$$

2.2.2 含沙量对弗汝德数的影响 点绘不同含沙量下弗汝德数(Fr)随产流历时的变化,见图5。根据明渠

流理论, $Fr > 1$ 时水流为急流, $Fr < 1$ 时水流为缓流^[20]。

由图5可知,当含沙量为0时, Fr 变化介于1.747~4.820;当含沙量为4%时, Fr 变化介于2.119~4.722;当含沙量为8%时, Fr 变化介于2.194~4.559, Fr 均大于1,坡面径流流态属于急流。与含沙量为0相比,含沙量为4%、8%的弗汝德数 Fr 分别增加了约9.21%,10.47%。如图3所示,当放水流量为12,16 L/min时,含沙量从0增加到4%, Fr 呈增大的趋势,含沙量从4%增加到8%, Fr 增大的趋势较小;当放水流量为20 L/min时, Fr 随着含沙量的增加而增大。随着含沙量的增加, Fr 总体呈增大的趋势,水流的平均动能越大,惯性力占主导。

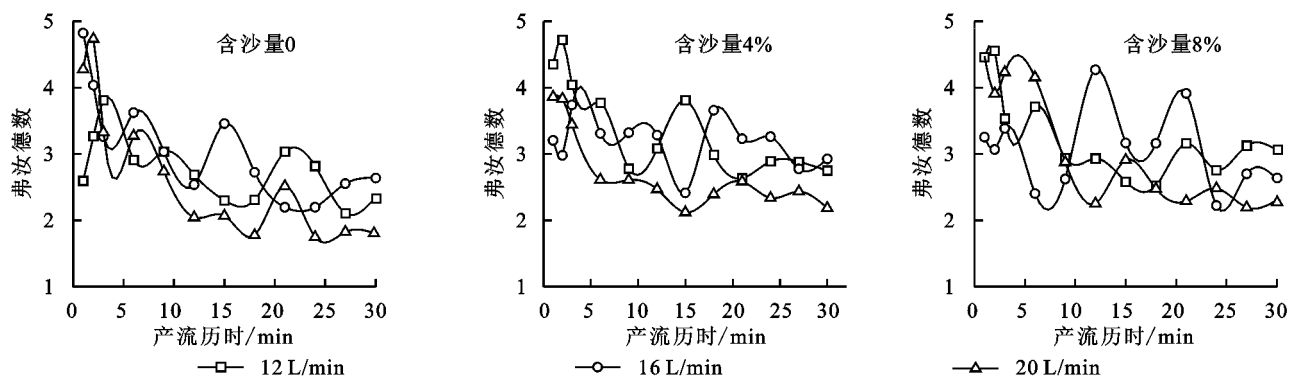


图5 弗汝德数 Fr 随产流历时的变化

2.3 含沙量对阻力系数的影响

坡面流阻力与坡面径流流速及径流水位曲线的模型密切相关,对于土壤侵蚀预测模型研究也至关重要。点绘不同含沙量下阻力系数 f 随产流历时的变化,如图6所示,当含沙量为0时, f 变化介于0.250~1.903;当含沙量为4%时, f 变化介于0.261~1.219;当含沙量

为8%时, f 变化介于0.279~1.177。与含沙量为0相比,含沙量为4%、8%的阻力系数 f 分别减小了约23.16%,20.88%。由图3可知,当放水流量为12,16 L/min时,随着含沙量的增大阻力系数 f 呈先减小后增大的趋势;当放水流量为20 L/min时,随着含沙量的增加阻力系数 f 总体呈减小的趋势;随着流量的增大,阻

力系数 f 总体呈增大的趋势。这种现象可能与不同放水流量、含沙量以及试验坡度条件下所形成的径流深和侵蚀沟形态的不同有关。

不同地表径流中的阻力系数(f)与相应的雷诺数(Re)密切相关。然而,不同径流含沙量下 f 和 Re 的关系鲜有研究。点绘不同含沙量下阻力系数与雷

诺数的关系,如图7所示。阻力系数均随雷诺数的增大而增大,两者之间呈极显著幂函数关系($p < 0.01$),方程拟合指数均小于1,表明随着 Re 的增大, f 增大的幅度逐渐减小。且随着含沙量的增加, Re 的指数不断减小,表明阻力系数 f 受雷诺数 Re 的影响逐渐减小。

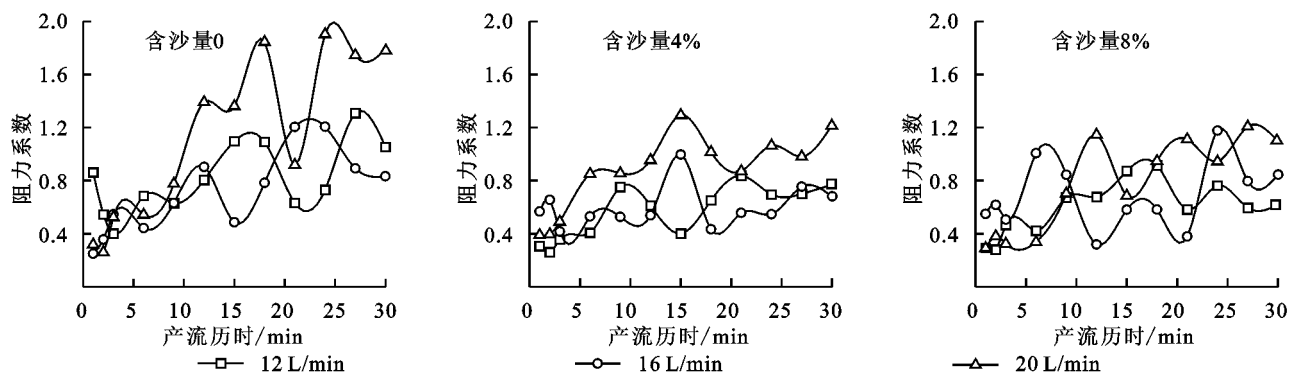


图6 阻力系数(f)随产流历时的变化

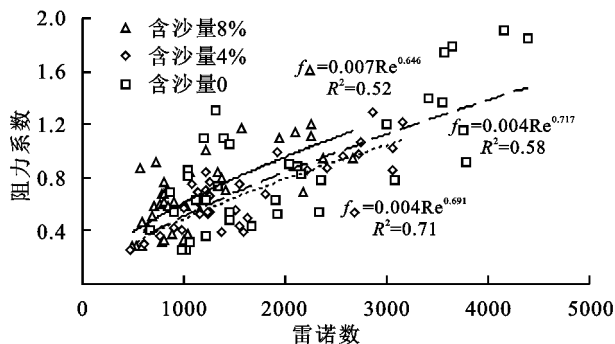


图7 不同含沙量下阻力系数 f 与雷诺数 Re 的关系

2.4 含沙量对水流功率和水流剪切力的影响

点绘不同含沙量下水流功率(ω)和水流剪切力(τ)随产流历时的变化(图8)。由图8A可知,当含沙量为0时, ω 变化介于6.392~42.930 N/(m·s),当含沙量为4%时, ω 变化介于4.185~26.660 N/(m·s),当含沙量为8%时, ω 变化介于4.563~25.968 N/(m·s);由图8B可知,当含沙量为0时, τ 变化介于14.399~79.244 Pa,当含沙量为4%时, τ 变化介于8.712~49.116 Pa,当含沙量为8%时, τ 变化介于14.399~44.923 Pa。与含沙量为0相比,含沙量为4%、8%的 ω 减小了约30.1%、40.9%, τ 减小了约28.1%、35.5%。由图3可知,随着含沙量的增加,水流功率和水流剪切力呈减小趋势。随着流量的增大,二者呈增大趋势。

分别对水流功率(ω)和水流剪切力(τ)与含沙量和流量之间关系进行分析,得出拟合方程式(11), (12)。水流功率和水流剪切力与含沙量和流量有较好的二元线性关系。

$$\omega = -0.977SC + 1.629Q - 7.771 \quad (R^2 = 0.90, n = 9) \quad (11)$$

$$\tau = -1.586SC + 2.555Q - 6.950 \quad (R^2 = 0.88, n = 9) \quad (12)$$

2.5 含沙量与水动力学参数间的关系

含沙量与水动力学参数间的关系见表1。含沙量与平均流速、雷诺数、阻力系数、水流剪切力和水流功率呈极显著负相关关系($p < 0.01$),相关系数绝对值大小顺序为 $R(Re) > R(\omega) > R(\tau) > R(v) > R(f)$,含沙量与弗汝德数 Fr 关系不显著。放水流量与平均流速、雷诺数、阻力系数、水流剪切力和水流功率呈极显著正相关关系($p < 0.01$),相关系数的大小顺序为 $R(v) > R(Re) > R(\omega) > R(\tau) > R(f)$,流量与弗汝德数 Fr 关系不显著。试验坡面的糙度、坡度、细沟沟壁稳定性以及沙粒之间的作用力等存在差异,这可能是含沙量与弗汝德数 Fr 相关关系较差的原因。由此可知:雷诺数 Re 受含沙量的影响最大,阻力系数 f 受含沙量的影响最小。雷诺数 Re 是描述水动力学参数与含沙量关系最适合的参数指标。

3 讨论

本文通过模拟径流冲刷试验对比分析了含沙量对高陡边坡径流水动力学参数的影响。结果表明:坡面径流平均流速随含沙量的增加而减小,这与李君兰^[21]和纪丽静^[22]等的研究结果一致,原因在于一方面含沙量越大,泥沙之间的黏滞力就越强,水流用来搬运泥沙的能量越大,导致坡面径流流速也越小^[23];另一方面坡面径流中含沙量增加使得颗粒之间的摩擦几率增大,颗粒动量在垂直方向的分量增加,产生与泥沙运动相反的力,使得流速降低^[24]。相关性分

析表明流量对径流平均流速的影响显著大于含沙量(表 1),原因可能在于流速与流量之间存在幂函数关系^[25],流速随流量的增大而增大。

含沙量与雷诺数(Re)的关系取决于含沙量对水流的黏性力和惯性力的影响程度^[3]。试验条件下,随着含沙量的增加,Re 呈减小的趋势,水流紊动强度不断减弱,当放水流量为 16,20 L/min 时,随着含沙量的增加,坡面流态逐渐由紊流向过渡流发展,这与和继军^[26]、赵春红^[3]等的研究结果一致,表明即使泥沙粒径发生变

化,Re 也随着含沙量增加而减小且含沙量增大对水流黏性力的影响更明显。弗汝德数 Fr 随着含沙量的增加而增加,且均大于 1,坡面径流流态属于急流,与潘成忠等^[27]的研究结果不一致,可能是因为下垫面条件以及试验坡度的差异性。

含沙量与水流功率和水流剪切力呈极显著负相关关系,这与倪世民^[28]、袁和第^[4]等的研究结果不一致,原因可能是高含沙水流泥沙输移稳定,具有强大的泥沙搬运能力^[29],使得坡面流的能量消耗呈减小趋势。

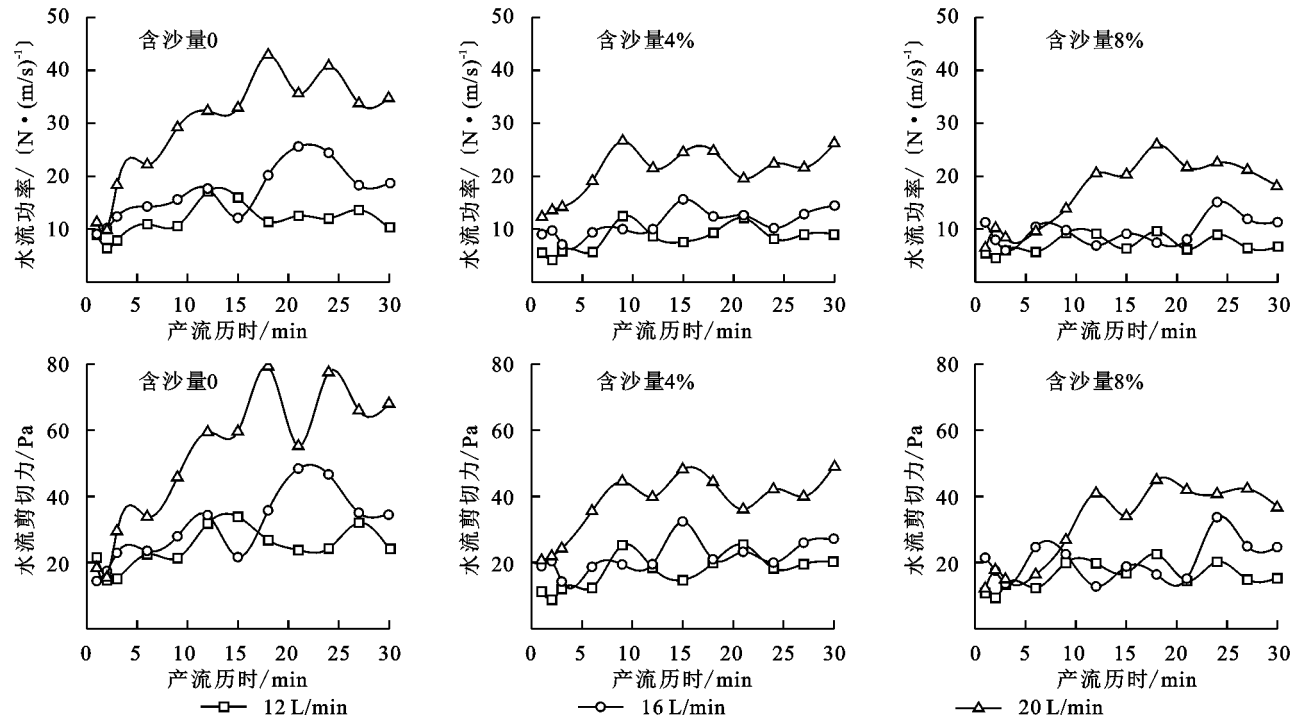


图 8 水流功率 ω 和 水流剪切力 τ 随产流历时的变化

表 1 含沙量与水动力学参数的相关分析

参数	含沙量/%	$Q/$ ($L \cdot min^{-1}$)	$v/$ ($m \cdot s^{-1}$)	Re	Fr	f	τ/Pa	$\omega/$ [$N \cdot (m/s)^{-1}$]
ν	-0.342**	0.673**	1					
Re	-0.393**	0.663**	0.435**	1				
Fr	0.162	-0.186	0.249**	-0.670**	1			
f	-0.260**	0.554**	0.148	0.804**	-0.690**	1		
τ	-0.357**	0.575**	0.283**	0.961**	-0.768**	0.867**	1	
ω	-0.387**	0.646**	0.439**	0.979**	-0.675**	0.821**	0.983**	1

注: * 表示 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示 0.001 水平(双侧)上显著相关; $n=108$ 。

含沙量的变化会导致坡面流流体由牛顿体向宾汉体发生变化,为保证试验数据的统一性,本研究未考虑流体的变化,因此设置的最大含沙量不会导致流体发生变化,不足之处在于没有考虑到坡度和坡长的变化对坡面径流水动力学特性的影响。在今后的研究中,应通过增加坡长、坡度、流体性质等变量进一步研究含沙量与坡面水动力学参数之间的关系,为高陡边坡土壤侵蚀机理模型的建立奠定理论基础。

4 结 论

(1) 随着放水流量的增大,平均流速随着含沙量增加而减小的趋势较小,雷诺数(Re)随着含沙量增加而减小的趋势较明显;当放水流量为 16,20 L/min 时,随着含沙量的增加,坡面流态逐渐由紊流向过渡流发展;弗汝德数(Fr)随着含沙量的增加而增大,且均大于 1,坡面径流流态属于急流。

(2) 阻力系数(f)与雷诺数(Re)呈极显著幂函数关系,随着含沙量的增加, Re 对 f 的影响逐渐减弱。

(3) 含沙量与平均流速、雷诺数、阻力系数、水流剪切力和水流功率呈极显著负相关关系($p < 0.01$),相关系数绝对值大小顺序为 $R(Re) > R(\omega) > R(\tau) > R(v) > R(f)$,雷诺数(Re)是描述水动力学参数与含沙量关系的最佳参数,含沙量与弗汝德数(Fr)关系不显著,与雷诺数、水流功率、水流剪切力以及流速间的关系可用二元线性函数表示。

参考文献:

- [1] 骆汉,赵廷宁,彭贤锋,等.公路边坡绿化覆盖物水土保持效果试验研究[J].农业工程学报,2013,29(5):63-70.
- [2] Yang D, Gao P, Zhao Y, et al. Modeling sediment concentration of rill flow[J]. Journal of Hydrology, 2018, 561:286-294.
- [3] 赵春红,高建恩,王飞,等.含沙量对坡面流水动力学特性的影响研究[J].农业机械学报,2013,44(9):79-85.
- [4] 袁和第,信忠保,蒋秋玲,等.连续降雨作用下褐土坡面侵蚀及其水动力学特征[J].水土保持学报,2020,34(4):14-20.
- [5] 李浩宏,王占礼,申楠,等.黄土坡面片蚀水流含沙量变化过程试验研究[J].中国水土保持,2015(3):46-49.
- [6] 邓军,杨永全,沈焕荣,等.水流含沙量对磨蚀的影响[J].泥沙研究,2000(4):65-68.
- [7] 潘成忠.坡面流水力学特性及其对草地拦沙的响应机制[D].陕西杨凌:中国科学院水利部水土保持研究所(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2007.
- [8] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面发育平稳的细沟流水动力学特性[J].地理科学进展,2014,33(8):1117-1124.
- [9] 余冰.含沙水流和坡面糙度对红壤团聚体输移破坏影响[D].武汉:华中农业大学,2017.
- [10] 张锐波,张丽萍,付兴涛.坡面侵蚀产沙与水力学特征参数关系模拟[J].水土保持学报,2017,31(5):81-86.
- [11] 冯乐.不同高陡边坡植被配置的水土保持效益研究[J].珠江水运,2021(21):17-18.
- [12] 陈卓.黄土工程堆积体坡面含沙水流冲刷过程中产流产沙及水动力学特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [13] 卞艳丽,曹惠提,张会敏,等.泥沙级配对浑水灌溉下土壤水分增长过程的影响分析[J].节水灌溉,2016(7):23-30,35.
- [14] Niu Y, Gao Z, Li Y, et al. Characteristics of rill erosion in spoil heaps under simulated inflow: A field runoff plot experiment[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 202: 104655.
- [15] Zhang L, Gao Z, Yang S, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered landforms derived from expressway construction: A case study of typical steep spoil heap[J]. Catena: An Interdisciplinary Journal of Soil Science Hydrology-Geomorphology Focusing on Geoecology and Landscape Evolution, 2015, 128:108-121.
- [16] 沙玉清.泥沙运动学引论[M].北京:中国工业出版社,1965.
- [17] 罗榕婷,张光辉,沈瑞昌,等.染色法测量坡面流流速的最佳测流区长度研究[J].水文,2010,30(3):5-9.
- [18] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: II. Shear stress relationships[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(3): 797-0804.
- [19] 李永红,牛耀彬,王正中,等.工程堆积体坡面径流水动力学参数及其相互关系[J].农业工程学报,2015,31(22):83-88.
- [20] Lou Y, Gao Z, Zhou F, et al. Rill erosion on slope of spoil tips: experimental study of runoff scouring erosion in multiple times[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2021:1-33.
- [21] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等.坡面水流速度与坡面含砂量的关系[J].农业工程学报,2011,27(3):73-78.
- [22] 纪丽静,王文龙,康宏亮,等.黄土区土质与土石质堆积体水力侵蚀过程差异[J].应用生态学报,2020,31(5):1587-1598.
- [23] 张翔,高照良,袁雪红,等.工程堆积体坡面细沟流水力学参数特性研究[J].泥沙研究,2016(4):34-40.
- [24] Abrahams A D, Atkinson J F. Relation between grain velocity and sediment concentration in overland flow[J]. Water Resources Research, 1993,29(9):3021-3028.
- [25] 杨大明,高佩玲,张晴雯,等.黄土坡面细沟水动力学特性试验研究[J].泥沙研究,2018,43(4):49-56.
- [26] 和继军,王硕,蔡强国,等.黄土缓坡片蚀过程及其水力参数适宜性试验研究[J].水科学进展,2021,32(1):97-108.
- [27] 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.
- [28] 倪世民,冯舒悦,王军光,等.不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力特性及产沙的关系[J].农业工程学报,2018,34(15):149-156.
- [29] 张乐涛,董俊武,张晨,等.黄土坡面径流侵蚀泥沙的空间动态及其尺度关系[J].泥沙研究,2021,46(1):42-49.