

工程堆积体坡面径流水动力学参数及其相互关系

李永红^{1,2}, 牛耀彬^{1,3}, 王正中^{2*}, 高照良¹, 张少佳^{1,3}, 刘子壮⁴

(1.中国科学院水利部西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100;
3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘要: 工程堆积体具有独特的土壤组成及复杂的下垫面条件, 其土壤抗冲性极差, 径流条件下堆积体陡坡坡面关键的水动力学参数及其相互关系亦表现出不同的特点, 为探明工程堆积体坡面径流水动力学参数及其相互关系, 该文采用 30、40、50、60 L/min 4 个流量, 对 24°、28°、32° 共 3 个坡度的堆积体边坡 (20 m×5 m 标准监测小区) 进行模拟放水冲刷试验, 选取径流流速、水深、雷诺数、弗汝德数、径流阻力系数、水流剪切应力、径流功率等参数进行分析。结果表明: 工程堆积体坡面侵蚀位置主要集中在坡面上部 (0~10 m), 侵蚀时段主要集中在产流后期 (12~30 min); 流速随坡度和流量的增大而增大, 坡度对流速的影响大于流量; 随着坡面流由层流向紊流、急流向缓流的过渡, 坡面径流阻力系数随之增大; 基于水流剪切应力和径流功率分别计算获得的工程堆积体坡面细沟侵蚀土壤可蚀性参数分别为 2.63×10^{-2} s/m 和 $0.1 \text{ s}^2/\text{m}^2$, 对应的临界侵蚀径流功率为 $0.8 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。研究结果可为坡面措施的配置提供一定的理论支撑, 也能为工程堆积体土壤侵蚀预报模型的建立提供部分基础参数。

关键词: 水动力学; 径流; 侵蚀; 时空变化; 侵蚀预报模型; 工程堆积体

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.22.012

中图分类号: TU41; S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-22-0083-06

李永红, 牛耀彬, 王正中, 高照良, 张少佳, 刘子壮. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.22.012 http://www.tcsae.org

Li Yonghong, Niu Yaobin, Wang Zhengzhong, Gao Zhaoliang, Zhang Shaojia, Liu Zizhuang. Hydrodynamic parameters and their relationships of runoff over engineering accumulation slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(22): 83-88. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.22.012 http://www.tcsae.org

0 引言

生产建设项目所产生的弃土弃渣堆置形成工程堆积体, 工程堆积体具有独特的土壤组成及复杂的下垫面条件, 其表面土壤结构缺失、土质松散、植物根系及有机质缺乏, 导致其抗冲性极差, 在径流条件下极易产生水土流失^[1]。坡面径流是侵蚀产生的主导因素, 其变化包含径流的形成与汇集、土壤的破坏与剥蚀、泥沙输移与沉积等过程^[2]。侵蚀产沙量及产沙特征又取决于其径流的水动力学特征^[3], 深入了解坡面径流的水动力学特性是理解坡面侵蚀过程和规律的前提和基础。其中坡面径流流速、流态雷诺数、弗汝德数和阻力系数是表征水动力学特性的重要参数也是研究的热点^[4-5]。李鹏等^[6]研究表明, 坡面径流平均流速随坡度和流量的增加而增大, 流速与坡度和流量之间存在指数函数关系, 坡度对流速的影响大于流量。郑良勇等^[7]研究表明, 陡坡径流的流态属于急紊

流, 且具有时空分异特征, 随着坡度的增加, 径流雷诺数 Re 和 Darcy-Weisbach 阻力系数 f 均随坡度的增加呈先增后减趋势, f 与 Re 之间存在幂函数正相关关系。李占斌等^[8]研究表明, 陡坡坡面流阻力系数 f 随雷诺数 Re 的增大而增大。张科利^[9]研究表明, 在坡度较缓的坡面上, 阻力系数随雷诺数的增大而减小, 在坡度较陡的坡面上, 阻力系数又会随雷诺数的增大而变大。张宽地等^[10]研究植被覆盖条件下水流阻力与雷诺数的变化规律, 表明两者之间并非呈单调增加或单调递减的趋势, 而与植被的覆盖度紧密相关。大多研究主要集中在缓坡模拟冲刷和室内装填土槽的试验中, 且对于水力学指标研究较多, 而关于人工模拟暴雨在野外陡坡原位小区上的水力学特征的研究较少^[8], 至于研究整个坡面径流水动力学时空变化过程则更少。

本文主要通过野外小区放水试验模拟径流冲刷过程, 研究工程堆积体坡面流流态以及水动力学参数特性, 选取径流流速、水深、雷诺数、弗汝德数、径流阻力系数、水流剪切应力、径流功率等参数, 分析主要水动力学参数的时空变化特征以及水力学要素间的相互关系。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于中国科学院长武黄土高原农业生态试验站 (35°14'24"N、107°41'21"E) 海拔高度 1 107 m, 属典

收稿日期: 2015-06-19 修订日期: 2015-10-10

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题 (2011BAD31B01)

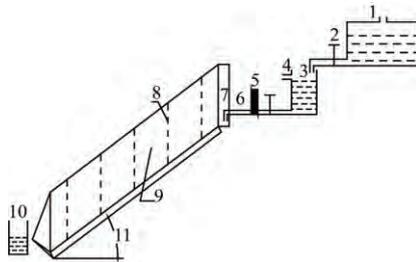
作者简介: 李永红, 男, 陕西永寿人, 博士, 主要研究方向为农业水土工程和荒漠化防治。杨凌 中国科学院水利部西北农林科技大学水土保持研究所, 712100. Email: lyh712100@163.com

※通信作者: 王正中, 男, 陕西彬县人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为水利水电与水土保持工程。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100. Email: wangzz0910@163.com

型高原沟壑区。试验小区所在位置地带性土壤类型为黑垆土, 小区建在人工开挖坡面上, 开挖面达到土壤母质层, 土壤母质为马兰黄土, 小区所填土壤来自边坡开挖产生的弃土, 事先清除杂草和有机残落物层, 经现场机械开挖后进行人工回填, 小区弃土为当年回填, 坡面无任何植被覆盖, 小区坡面长度 20 m、宽 5 m, 覆土厚度 0.5 m。堆积体土壤质地为砂壤, 土石比超过 9:1, 土壤粒径多在 1 mm 以下, 而碎石粒径范围是指大于 10 mm 的砾石, 土壤颗粒粒径 0.1~0.2、0.05~0.1、0.02~0.05、0.01~0.02、0.005~0.01、0.002~0.005、<0.002 mm 质量分数依次为 8.42%、21.76%、33.07%、19.33%、6.61%、2.17%、8.64%。

1.2 试验设计及过程

工程堆积体边坡坡度范围大多为 25°~40°^[11]。因此, 本文选取 3 个试验坡度水平: 24°、28°和 32°。按照试验区 1a 中发生的最大暴雨以及试验放水梯度, 并结合前期的放水试验, 共设置 30、40、50、60 L/min 共 4 个放水流量, 对应雨强分别为 20、27、34、41 mm/h, 共 12 场试验。每场试验结束后进行重新填土、平整、控制土壤容重和含水率, 试验前土壤容重范围为 1.21~1.56 g/cm³, 土壤质量含水率为 10.29%~20.09%。试验小区及放水装置示意图见图 1, 试验供水引自王东沟民用泉水井, 经自流到蓄水桶。



1.储水桶 2.水阀 3.恒压桶 4.溢流管 5.流量计 6.塑料管 7.溢流槽
8.观测断面 9.试验小区 10.集流桶 11.试验坡度
1.Storage tank 2.Valve 3.Constant barrel 4.Overflow pipe 5.Flowmeter
6.Plastic tube 7.Overflow tank 8.Observations section 9.Experimental plot
10.Collecting bucket 11.Test slope

图 1 试验小区及放水装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental plot and drain device

本试验放水装置包括储水桶、恒压桶、溢流槽、水阀、流量计等, 在小区上方采用恒压放水, 保证出水流量均匀。在整个小区上选取 5 个观测断面, 分别设在距离小区顶端 2 m (断面 1)、6 m (断面 2)、10 m (断面 3)、14 m (断面 4)、18 m (断面 5) 的位置, 在每一观测断面同时测定对应时刻的流速和流宽。试验从有线状水流流出小区开始计时, 持续 30 min, 最初 6 min 内每隔 2 min 测定 1 次浑水总量、收集径流泥沙样品, 计算获得侵蚀量; 6 min 后每隔 3 min 测定 1 次。

1.3 水动力学参数测定和计算方法

1) 流速和流宽 坡面水流流速采用高锰酸钾染色示踪法, 测距为 1.5 m, 流速乘以修正系数 0.75 作为水流断面平均流速^[11]; 流宽用自制的彩色测尺测量, 精度为 1 cm, 准确的读出有水流彩色测尺读数, 然后计算出

流宽。

2) 平均水深 h 由于整个试验过程中全部为面蚀和细沟侵蚀阶段, 断面水深较小, 直接测定误差较大, 因此采用式 (1) 计算平均水深^[11]。

$$h = \frac{Q_1 - Q_2}{V \cdot b \cdot T} \quad (1)$$

式中, Q_1 、 Q_2 分别为 T 时间段内进入该断面以上区域的水量和入渗量, m³; b 为过水断面宽, m; V 为水流平均流速, m/s; T 为取样的时间间隔, s。

3) 雷诺数 Re 考虑含沙量对水流运动黏滞性的影响, 采用沙玉清公式^[12]计算雷诺数, 经变形后为

$$Re = \frac{V \cdot h}{\gamma} \cdot \left(1 - \frac{S_v}{2\sqrt{d_{50}}} \right) \quad (2)$$

式中, γ 为水动黏滞系数, m²/s; t 为水温, °C; S_v 为体积含沙率, %; d_{50} 为土壤中值粒径, 室内土样分析得 d_{50} 为 0.04 mm。通常, $\gamma = 0.000001775 / (1 + 0.0337t + 0.000221t^2)$ 。

4) 径流弗汝德数 Fr 计算公式为^[12]

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (3)$$

式中, g 为重力加速度, 9.8 m/s²。

5) Darcy—Weisbach 阻力系数 f 它表征坡面流流动时沿程所受阻力大小^[12]。

$$f = \frac{8g \cdot h \cdot J}{V^2} \quad (4)$$

式中, J 为水力坡度, m/m, 由于坡长较长, 可用坡度的正弦值近似代替。

6) 土壤剥蚀率 D_r 它表示单位时间内单位面积上剥蚀的土壤质量, 计算公式为^[11]

$$D_r = \frac{M}{b \cdot L \cdot T} \quad (5)$$

式中, D_r 为土壤剥蚀率, kg/(m²·s); M 为时段内的产沙量, kg; L 为坡长, m。

7) 水流剪切应力 τ 它表示产生土壤颗粒分离和输移泥沙的径流冲刷动力^[12]

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot J \quad (6)$$

式中, τ 为水流剪切应力, Pa; ρ 为浑水密度, kg/m³; R 为水力半径, m, 由于坡面水流为薄层水流, 可以用平均水深 h 代替。

8) 径流功率 ω 表示作用于单位面积的水流所消耗的功率^[13]。

$$\omega = \tau \cdot V \quad (7)$$

式中, ω 为径流功率, N/(m·s)。

2 结果与分析

2.1 坡面径流流态的时空变化

2.1.1 坡面雷诺数 Re 的时空变化

坡面径流在流动过程中会不断对坡面进行下切侵蚀、侧蚀和溯源侵蚀, 因此在坡面不同断面和侵蚀的不同时段坡面沟床和侵蚀形态各不相同, 故坡面径流的水

动力学特性具有时空变化规律^[7]，在试验坡度和流量范围内，各水动力学参数的时空变化表现出相同的变化规律，所以文章选取中间流量 40 L/min 和 24°坡度（本试验最小坡度）来代表所有试验坡度和流量条件下水动力学参数的时空变化规律。

图 2a 为在坡度为 24°，流量为 40 L/min 条件下，雷诺数 Re 在坡面不同位置 and 不同时段的变化状况。由图 2a 可以看出，在试验条件下， Re 的变化范围在 72~608 之间，在不同时段和位置处坡面径流的流态不一致。放水冲刷刚开始时，坡面比较平整，坡面径流水深变化不大， $Re < 100$ ，每个位置的雷诺数变化均不显著，此时水流为层流。随着冲刷历时的延长，在产流 12 min 以后，坡面 2、6 和 10 m 3 个位置雷诺数逐渐增大，其中 2 m 位置最为显著，主要是因为坡面中上部相继出现跌坎，坡面不再平整，在 2 m 位置以上溯源侵蚀剧烈发育， Re 增大迅速，径流流态也随之转变为过渡流。从图 2a 还可以看出，14 和 18 m 位置的雷诺数随时间的变化不明显，这主要是因为 14 和 18 m 位置径流均为薄层水流，无细沟出现。由此得出工程堆积体在径流冲刷时的坡面径流雷诺数的时空变化规律是，雷诺数剧烈变化主要集中在坡面的 0~10 m 处、产流的 12~30 min 之间。综上所述，对于坡面措施体系的配置而言，防治坡面水土流失不但应当考虑措施在坡面的空间配置强度，而且要考虑措施配置的时效性，才能确保措施能在有效的时间和空间内发挥最大的拦蓄效益。

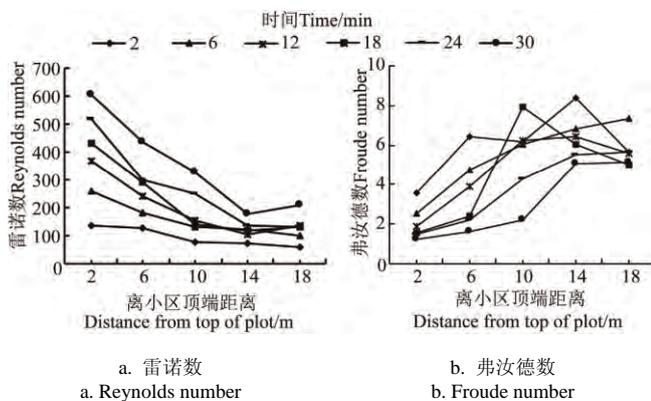


图 2 Temporal and spatial variation of runoff flowing

2.1.2 坡面弗汝德数 Fr 的时空变化

由图 2b 可看出，弗汝德数 Fr 的变化与雷诺数 Re 的变化恰恰相反。总体来看，整个试验过程中， $Fr > 1$ ，表明坡面径流均为急流。在冲刷初期，坡面较为平整， Fr 较大，但随着冲刷的延续，在产流 18 min 以后，坡面出现跌坎和细沟，致使 Fr 逐渐变小；而同一时刻不同位置的 Fr ，随着位置数的递增呈现先增后减的现象，这主要是因为 2~10 m 位置处，坡面细沟已经发育成形，径流沿细沟流动，径流流动加速；在 14 m 位置处，细沟和跌坎均没有发育，细沟中汇集的径流在 14 m 位置处被平摊，所以在 14 m 位置出现 Fr 最大值。到了 18 m 位置处，随着径流的进一步分散， Fr 值回落，趋于平缓。综上所

述，工程堆积体坡面 Fr 的时空变化规律为，坡面急流主要位于坡面 6~18 m、产流 0~18 min 之间。

2.2 坡面水动力学参数的时空变化

2.2.1 坡面阻力系数 f 的时空变化

在试验坡度和流量范围内，各阻力系数和水流剪切应力的时空变化表现出相同的变化规律，所以文章选取中间流量 40 L/min 和 24°坡度（本试验最小坡度）来代表所有试验坡度和流量条件下阻力系数和水流剪切应力的时空变化规律。

从图 3a 可以看出，阻力系数 f 的时空变化表现为，在 14 和 18 m 位置处， f 随时间和空间变化均不明显，表明在 14 和 18 m 位置处未出现细沟，坡面糙率不变，而只有坡面土壤颗粒阻力阻滞水流。在产流第 6 分钟以后，2 和 6 m 位置处，开始出现跌坎，坡面形态阻力增大，致使 2 和 6 m 位置处 f 增大。在产流第 12 分钟后，2、6 和 10 m 3 个位置细沟开始贯通，随着冲刷历时的延续， f 逐渐增大并向坡面下部伸延。综上所述，工程堆积体坡面 f 的时空变化规律为，坡面阻力系数增大集中在坡 0~10 m、产流 12~30 min 之间。

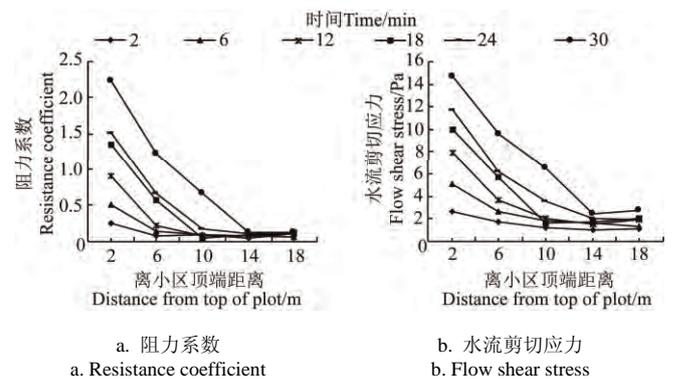


图 3 坡面水动力学参数的时空变化

Fig.3 Temporal and spatial variation of slope hydrodynamic parameters

2.2.2 坡面水流剪切应力 τ 的时空变化

水流剪切应力可以从动力学角度揭示坡面产流产沙的变化规律，从图 3b 可以看出，14 和 18 m 位置处，水流剪切应力随时间和空间变化均不明显，基本保持平稳状态，原因是小区坡面下部细沟没有发育，坡面糙率基本未变，径流从产流开始到产流结束始终保持平稳，这一现象与雷诺数和阻力系数的变化过程基本一致，进一步印证了以上结论。随着产流时间的持续，在产流 12 min 以后，2 m 位置处的 τ 逐渐增大，6 和 10 m 位置的 τ 也随之增大，这是因为随着产流时间的持续，坡面侵蚀方式发生了转变，由面蚀转变为沟蚀，细沟最早在坡面的 2 m 位置处开始发育，随后沿着坡面向下延续，最终在 14 m 位置处形成特定流量条件的稳定沟型，从而导致 τ 呈现由大到小。综上所述，工程堆积体坡面径流水流剪切应力的时空变化规律为，坡面水流剪切应力增大位于坡面 0~10 m、产流 12~30 min 之间。

2.2.3 坡面径流功率 ω 的时空变化

在试验坡度和流量范围内，各径流功率的时空变化

表现出相同的变化规律,所以笔者选取中间流量 40 L/min 和 24° (本试验最小坡度) 来代表所有试验坡度和流量条件下径流功率的时空变化规律。

径流功率也是从动力学角度揭示坡面产流产沙的变化规律,图 4 揭示了坡面径流功率随产流时间和断面的变化规律。从图 4 可以看出,在 14 和 18 m 位置处, ω 随时间和空间变化均不明显,基本保持平稳状态。随着产流时间的持续,在产流 12 min 以后,在 2、6 和 10 m 位置处的 ω 逐渐增大,这是因为随着产流时间的持续,在 2、6 和 10 m 位置处侵蚀逐渐由面蚀转变为沟蚀,随后沿着坡面向下延续,最终在 14 m 位置处发育稳定。综上所述,工程堆积体坡面径流功率的时空变化规律与水流剪切应力的时空变化规律基本一致,即:坡面径流功率增大位于坡面 0~10 m、产流 12~30 min 之间。这也从径流功率的角度印证了工程堆积体坡面产流产沙的时空变化规律。

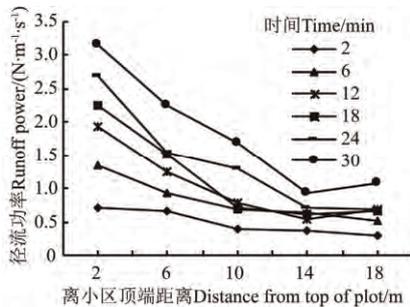


图 4 坡面径流功率的时空变化

Fig.4 Temporal and spatial variation of runoff power

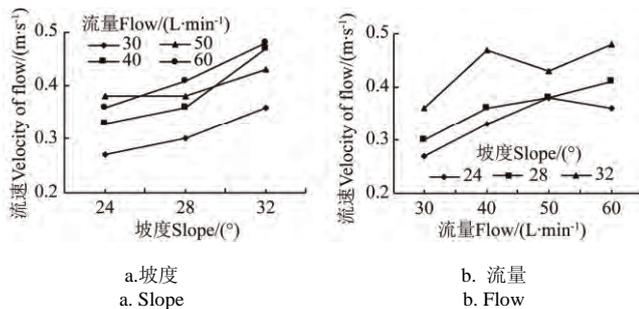
2.3 各水力要素间的关系

2.3.1 坡度和流量与流速之间的关系

由图 5a 可以看出,在 24°~32°的坡度范围内,流速随坡度的增加逐渐增加,而且不同流量变化趋势也基本一致。本试验条件下,坡面流速随流量的增加也呈现增加趋势,虽然,从图 5b 可以看出,随着流量的增大,流速随流量的变化出现了波动,但总体趋势基本一致。为了揭示坡度和流量对流速的影响的程度差异,用式 (8) 进行拟合流速与坡度和流量之间的关系。

$$V=2.00q^{0.37} \cdot S^{0.95} \quad R^2=0.70 \quad n=132 \quad P<0.01 \quad (8)$$

式中, V 表示流速, m/s; q 表示流量, L/min; S 表示坡度, (°)。可以看出对于工程堆积体坡面而言,坡度对坡面流速的影响要大于流量的影响。



a. 坡度
a. Slope
b. 流量
b. Flow

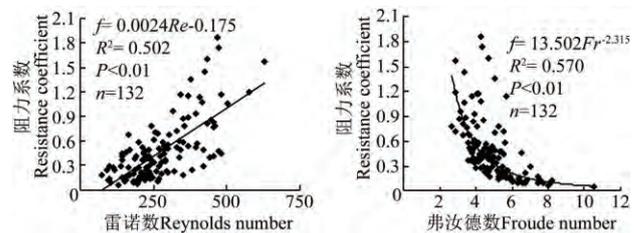
图 5 坡度和流量与流速之间的关系

Fig.5 Relationship between flow velocity with slope and flow

2.3.2 阻力系数 f 与雷诺数 Re 和弗汝德数 Fr 之间的关系

有研究表明,坡面雷诺数 Re 与阻力系数 f 之间的关系比较复杂,有直线也有曲线,有递增也有递减^[7-10],而本试验结果则表明两者之间为正相关关系(见图 6a)。由于以往试验多在缓坡条件下进行,土壤质地均一、结构完整,而本试验是在陡坡进行,而且土壤粒径组成和结构特殊。图 6a 中关系式可以看出, Re 和 f 之间存在线性正相关关系,表明,在本试验条件下,随着侵蚀的不断持续,坡面水流逐渐由层流向紊流过渡,坡面阻力系数也相应随之增大。

图 6b 为弗汝德数 Fr 与阻力系数 f 之间的关系图,由图可以看出,随着 Fr 逐渐增大, f 逐渐减小。这是因为坡面径流受到的阻力 f 越大,对水流的阻滞作用越强,水流将越缓。由图 6b 中关系式可以看出, Fr 和 f 之间存在幂函数关系,表明,在本试验条件下,随着侵蚀的不断持续,水流逐渐由急流向缓流发展,坡面阻力系数也随之增大。



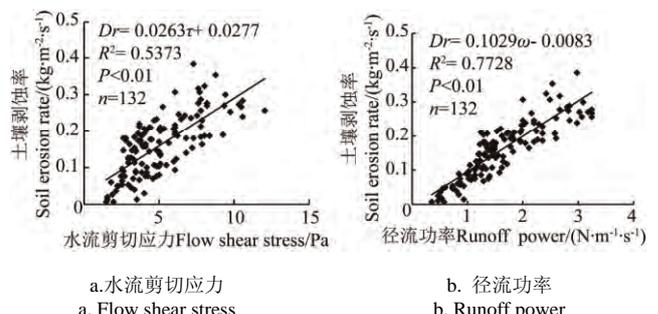
a. 雷诺数
a. Reynolds number
b. 弗汝德数
b. Froude number

图 6 雷诺数和弗汝德数与阻力系数之间的关系

Fig.6 Relationship between resistance coefficient with Reynolds number and froude number

2.3.3 水流剪切应力 τ 和径流功率 ω 与土壤剥蚀率 Dr 之间的关系

土壤剥蚀率在土壤侵蚀量化研究,尤其在土壤侵蚀的预测预报研究中很重要。当水流剪切应力大于土壤临界剪切应力时,土壤颗粒被剥蚀^[13-14]。由图 7a 中土壤剥蚀率与水流剪切应力之间的关系式可以得到,在试验坡度和流量条件下工程堆积体坡面细沟侵蚀土壤可蚀性参数为 2.63×10^{-2} s/m,侵蚀性细沟开始剥离土壤颗粒产生侵蚀的临界水流剪切应力为 -1 Pa。临界水流剪切应力出现负值的主要原因是试验坡度已经属于陡坡范畴,重力侵蚀对坡面产流产沙产生影响,坡面细沟发育初始就伴随着坍塌,导致临界水流剪切应力表现为负值。



a. 水流剪切应力
a. Flow shear stress
b. 径流功率
b. Runoff power

图 7 水流剪切应力和径流功率与土壤剥蚀率之间的关系

Fig.7 Relationship between soil erosion rate with flow shear stress and runoff power

径流功率表征径流损失能量而做功的速率,是影响侵蚀的重要水动力学参数,能准确的预测径流分离能力^[11]。从图 7b 中土壤剥蚀率与径流功率之间的关系式可以看出,在试验坡度和流量条件下工程堆积体坡面细沟侵蚀土壤可蚀性参数为 $0.1 \text{ s}^2/\text{m}^2$,侵蚀性细沟开始剥离土壤颗粒产生侵蚀的临界径流功率为 $0.8 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。综上所述,与水流剪切应力相比,径流功率与土壤剥蚀率之间的线性关系相关性更高,径流功率刻画工程堆积体土壤可蚀性参数更加合理。

3 结 论

综合来看,堆积体坡面产流产沙的时空变化规律为:径流侵蚀位置主要集中在坡面上部(0~10 m),侵蚀时段主要集中在产流后期(12~30 min 之间),该结论可以为对应雨强和坡度条件下堆积体坡面措施的配置提供理论支撑,也可以为坡面排水渠断面尺寸的设计提供参考。

流速随坡度和流量的增大而增大,坡度对坡面流速的影响要大于流量,随着水流逐渐由层流向紊流、急流向缓流的过渡,坡面径流阻力系数随之增大,试验条件下,工程堆积体坡面细沟侵蚀的土壤可蚀性参数分别为 $2.63 \times 10^{-2} \text{ s}/\text{m}$ 和 $0.1 \text{ s}^2/\text{m}^2$,侵蚀性细沟开始剥离土壤颗粒产生侵蚀的临界径流功率为 $0.8 \text{ N}/(\text{m}\cdot\text{s})$,该结论可以为陡坡条件下工程堆积体土壤侵蚀预报模型的建立提供基础参数。

由于生产建设项目数量众多,必然造成数量巨大的弃土弃渣,及时有效的拦蓄工程堆积体坡面的径流是防治堆积体水土流失的关键,在工程堆积体坡面布设有效地防护措施是减少侵蚀的重要举措。本文通过野外现场模拟堆积体边坡在径流冲刷过程中的产流产沙过程,着重分析水动力参数的时空变化过程,得出坡面侵蚀的主要位置和主要时段,可以为防护措施的布设提供理论支撑;另外,通过拟合得出坡面水动力学参数与土壤剥蚀率之间的关系曲线以及堆积体坡面细沟侵蚀的土壤可蚀性参数和临界径流功率,可以为工程堆积体坡面侵蚀预报模型的建立提供基础参数。限于野外试验,试验存在不足,测量断面不够密集,时间间隔不够精确,坡面侵蚀产沙时空变化的具体数值只能得到大概界定范围,进一步研究可以从单个细沟形态发育和侵蚀产沙过程着手,细化测量断面和时间点,研究细沟形态指标与产流产沙以及水动力学参数之间的关系,为侵蚀预报模型的建立提供参考。

[参 考 文 献]

[1] 张乐涛,高照良,田红卫. 工程堆积体陡坡坡面径流水动力学特性[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 34—38.
Zhang Letao, Gao Zhaoliang, Tian hongwei. Hydro-dynamic characteristics of steep slope runoff of engineering accumulation under simulated runoff conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 34—38. (in Chinese with English abstract)

[2] 丁文峰,李占斌,丁登山,等. 坡面细沟侵蚀产沙时空分布规律试验研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 19—23.

Ding Wenfeng, Li Zhanbin, Ding Dengshan, et al. Study on spatial and temporal characters of rill erosion on slope[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(1): 19—23. (in Chinese with English abstract)

[3] 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 395—402.
Zhang Guanghui. Advances in study of runoff detachment processes based on hydraulice[J]. Advances in Water Science, 2001, 12(3): 395—402. (in Chinese with English abstract)

[4] Lei Tingwu, Pan Yinghua, Liu Han, et al. A run off-on-ponding method and models for the transient infiltration capability process of sloped soil surface under rainfall and erosion impacts[J]. Journal of Hydrology, 2006, 319: 216—226.

[5] 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.
Pan Chengzhong, Shanguan Zhouping. Hydraulic characteristics of silt-laden flow on different gradient grassplots and its mechanism of sediment retention[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(4): 490—495. (in Chinese with English abstract)

[6] 李鹏,李占斌,郑良勇. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 444—449.
Li Peng, Li Zhanbin, Zheng Liangyong. Hydrodynamics process of soil erosion and sediment yield by runoff on loess slope[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 444—449. (in Chinese with English abstract)

[7] 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[J]. 水利学报, 2004, 35(5): 46—51.
Zheng Liangyong, Li Zhanbin, Li Peng. Experimental study on hydraulic characteristics of runoff on steep slope in loess area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(5): 46—51. (in Chinese with English abstract)

[8] 李占斌,秦百顺,亢伟,等. 陡坡面发育的细沟水动力学特征性室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 64—68.
Li Zhanbin, Qin Baishun, Kang Wei, et al. Indoor experimental studies on hydrodynamic characteristics of runoff in rill erosion procession steep slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(6): 64—68. (in Chinese with English abstract)

[9] 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特征的研究[J]. 泥沙研究, 1999(1): 56—61.
Zhang Keli. Hydrodynamic characteristics of rill flow on loess slopes[J]. Journal of Sediment Research, 1999(1): 56—61. (in Chinese with English abstract)

[10] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等. 模拟植被盖度条件下坡面流水水动力学特性[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 825—834.
Zhang Kuandi, Wang Guangqian, Sun Xiaomin, et al. Hydraulic characteristic of overland flow under different vegetation coverage[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6): 825—834. (in Chinese with English abstract)

[11] 张乐涛,高照良,田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 94—102.

- Zhang Letao, Gao Zhaoliang, Tian Hongwei. Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(24): 94–102. (in Chinese with English abstract)
- [12] 罗榕婷, 张光辉, 曹颖. 坡面含沙水流动力学特性研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 567–574.
Luo Rongting, Zhang Guanghui, Cao Ying. Progress in the research of hydrodynamic characteristics of sediment-laden overland flow[J]. Progress in Geography, 2009, 28(4): 567–574. (in Chinese with English abstract)
- [13] 雷廷武, 张晴雯, 赵军. 陡坡细沟含沙水流剥蚀率的试验研究及其计算方法[J]. 农业工程学报, 2001, 17(3): 24–27.
Lei Ting Wu, Zhang Qing wen, Zhao Jun. Laboratory experiments and computational method of soils detachment rate of sediment loading flow in rills[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2001, 17(3): 24–27. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 7–13.
Zhang Keli, Peng Wenying, Yang Hongli. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in china[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 7–13. (in Chinese with English abstract)

Hydrodynamic parameters and their relationships of runoff over engineering accumulation slope

Li Yonghong^{1,2}, Niu Yaobin^{1,3}, Wang Zhengzhong^{2*}, Gao Zhaoliang¹, Zhang Shaojia^{1,3}, Liu Zizhuang⁴

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. College of Water Conservation and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Resource Environmental Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Engineering accumulation generated during the process of engineering construction has a unique soil composition and complex underlying surface. This sort of deposit is characterized by weaken anti-scourability attributed to loose texture, which may result in the runoff conditions easily causing severe soil erosion. Hydrodynamic parameters and their relationships of runoff from steep engineering slope show different characteristics in response to hydrodynamic conditions. A detail study of the hydrodynamic characteristics is a premise and foundation to understand erosion processes on engineering accumulation. For this reason, a field study was conducted for the simulation of erosion process by runoff in order to reveal the mechanisms of erosion by runoff on engineering accumulation slope. Flow patterns and the characteristics of hydrodynamic parameters were investigated by studying runoff velocity, depth, Reynolds number, Froude number, resistance coefficient, flow shear stress, stream power and other relevant parameters and analyzing the spatiotemporal variations of the main hydrodynamic parameters and their relationships. The study area is located in the Changwu Agricultural Ecological Experimental Station on the Loess Plateau (35°14'24.5"N, 107°41'21.24"E). The established plot was 20 m long and 5 m wide, with 0.5 m thickness of soil generated from slope excavation. Weeds and organic residues were cleaned away at beginning. Three slope degrees of 24°, 28° and 32° and 4 flow rates of 30, 40, 50 and 60 L/min, a total of 12 field trials, were designed in this study. Results showed that in the processes of erosion by runoff on the engineering accumulation, dramatic changes of the Reynolds number and resistance coefficient were observed in the upper slope (0-10 m) in 12-30 min after runoff generation. For the Froude number, the dramatic change was found in the lower slope (6-18 m) in 0-18 min after runoff generation. Flow shear stress and stream power abruptly increased in the upper slope (0-10 m) in 12-30 min after runoff generation. In the slope range from 24° to 32°, velocity increased with slope degree and flow rate and their relationship can be expressed by a binary linear equation. The Reynolds number was positively correlated with the resistance coefficient. The Froude number had an exponentially negative correlation with resistance coefficient. Under the experimental conditions of slope degrees and flow rates, the rill erodibility of engineering accumulation was calculated to be 2.63×10^{-2} s/m for shear stress and 0.1 s²/m² for stream power. The critical stream power for rill erosion occurring was 0.8 N/(m·s). A large number of production projects will inevitably lead to a large amount of dregs and thus, a key measure to prevent engineering accumulation should impound runoff timely and effectively. In this paper, we obtained primary location and main periods of slope erosion by the field simulation of erosion on engineering accumulation slope. Meanwhile, fitting the relations of hydrodynamic parameters to soil erosion rate, rill erodibility and critical runoff power can also provide basic parameters for the construction of soil erosion model in engineering accumulation. Limited by the field conditions, the experiment had some shortcomings. For example, selected section was less intensive, time interval for measuring was not precise enough, and the determined values for the spatiotemporal variation of erosion were only a rough range.

Key words: hydrodynamics; runoff; erosion; spatial and temporal variation; erosion forecasting model; engineering accumulation