

工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程

张乐涛^{1,2}, 高照良^{1,3}, 田红卫⁴

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

摘要: 工程堆积体产生的新增水土流失严重威胁工程建设区及其附近区域的生态安全。该文采用野外放水冲刷试验的方法,对神木—府谷高速公路沿线典型工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程进行了研究,结果表明,1) 水流剪切力、水流功率及径流动能对薄层水流侵蚀土壤剥蚀率的影响皆可用线性方程描述,单位水流功率、过水断面单位能量的影响不显著;2) 水流剪切力、水流功率、过水断面单位能量对细沟侵蚀土壤剥蚀率的影响皆可用线性方程描述,单位水流功率的影响可用幂函数方程描述,径流动能的影响可用对数线性方程描述;3) 水流功率是与土壤剥蚀率关系最好的水动力学参数,是坡面侵蚀的动力根源;4) 发生细沟侵蚀的临界水流功率为 3 N/(m·s),细沟可蚀性参数为 $8 \times 10^{-3} \text{ s}^2/\text{m}^2$ 。该结果可为工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀模型的建立奠定基础,为生产建设项目区新增水土流失治理提供科学依据。

关键词: 土壤, 侵蚀, 径流, 工程堆积体, 陡坡, 水动力学过程, 水流功率

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.24.013

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-24-0094-09

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)

0 引言

伴随着生态环境对建设活动的进一步制约及工程建设区水土保持工作实际需求的增加,生产建设项目区新增水土流失已成为土壤侵蚀研究所关注的焦点之一^[1]。生产建设项目中的工程建设类型主要包括线型工程和点型工程^[2],挖、填、埋、占、压等不同扰动方式重塑了建设区地表形态,形成的弃土弃渣、裸露地貌、堆垫地貌及裂隙地貌等扰动地貌单元,是生产建设项目区新增水土流失的重要来源^[3]。弃土弃渣堆置形成的工程堆积体由于具有不同的堆积方式和分布特点,造成局部水土流失加剧的现象^[4],公路建设过程中弃土、弃渣堆积体对土壤流失总量的贡献达 78%~90%^[5]。

当前,不同建设类型条件下的工程侵蚀研究涵

盖了路堑、路堤、矿区扰动地面等不同下垫面条件^[6-8],以人工降雨、天然降雨及放水冲刷条件下径流小区的短期观测为主;缺乏长期、定位监测数据的积累,致使 USLE 在中国工程侵蚀领域的适应性修正难以形成系统化研究,无法直接应用于中国的生产建设实际。相关理论在工程建设区水土流失监测及预测、水土保持方案编制等水土保持实践中的指导作用降低,限制了土壤侵蚀经验模型的推广。建立基于过程的土壤侵蚀模型是弥补上述不足的重要途径之一,探讨生产建设背景下扰动土体侵蚀产沙的动力过程尤为必要。

深刻理解坡面径流侵蚀产沙对不同水动力学参数的响应特征是建立土壤侵蚀过程模型的重要基础。针对径流对土壤剥蚀能力的预测,当前的土壤侵蚀模型主要采取 3 种途径^[9]:简单水力学参数预测、水流挟沙能力模型及概率密度函数,其中,控制径流剥离土壤的主要水力学参数包括水力坡度、流速、流深、水力糙率等,不同水力学参数的组合构成土壤剥蚀率的预测变量包括水深、流量(单宽流量)、水流剪切力、单位长度剪切力、剪切流速、水流功率、有效水流功率及弗劳德数等,常见模型为临界剪切力模型和临界水流功率模型,由于试验测试条件的多样性,关于何种水动力学参数能够更好地描述土壤侵蚀动力过程尚无统一的

收稿日期: 2013-06-05 修订日期: 2013-11-26

基金项目:“十二五”农村领域国家科技计划课题:农田水土保持关键技术研究与示范(2011BAD31B01)

作者简介:张乐涛(1988-),男,山东临沂人,博士生。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所,712100。

Email: letao_20062006@126.com

通信作者:高照良(1969-),男,河南灵宝人,博士,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为土壤侵蚀与水土保持研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所 水利部水土保持生态工程技术研究中心,712100。Email: gzl@ms.iswc.ac.cn

明确结论，也并无直接证据表明某一种水力学参数相较于其他参数更具描述土壤侵蚀过程的优势^[10]。

基于以上所述，本文以对神木—府谷高速公路沿线弃土场的全面调查为基础，以高速公路沿线典型弃土场为例，采用野外放水冲刷试验的方法，对工程堆积体陡坡坡面径流侵蚀的水动力学过程进行了研究，旨在分析工程建设区堆积体陡坡坡面径流侵蚀与水动力学参数之间的关系，探讨适宜描述工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀过程的最佳水动力学参数，以期为工程堆积体侵蚀预报模型的建立奠定基础，并为工程堆积体的新增水土流失治理提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验区自然概况

试验区位于 38°56'15.5"N, 110°53'10.0"E，黄河支流—石马川沿岸，海拔高度 966 m。地貌类型主要为黄土梁峁丘陵沟壑。多年平均降水量为 440 mm，主要集中在 6~9 月。原生植被以柠条、沙棘、酸枣等落叶阔叶灌丛为主，土壤类型主要为黄绵土、红土、风沙土和淤土。土壤侵蚀形式以水蚀为主，年侵蚀模数在 $2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$ t/(km²·a) 之间，水土流失严重^[11]。

1.2 工程堆积体特征

堆积体位于神木—府谷高速公路沿线一弃土场，为“平台—陡坡”结构，平台面积 2.796 hm²，边坡坡度为 30°~50°，陡坡斜长 70~80 m，平均 78 m。自然恢复的植被类型主要为沙蓬、沙柳等沙地植被，沙棘极少，植被覆盖率低。堆积体陡坡表层土壤类型主要为黄绵土与绵沙土，土石比超过 9:1，粒径多在 1 mm 以下（表 1）。

表 1 土壤颗粒组成

Table 1 Soil particle composition

粒径 Particle size/mm	颗粒组成 Particle composition/%	粒径 Particle size/mm	颗粒组成 Particle composition/%
0.2~0.1	6.35	0.01~0.005	5.95
<0.1~0.05	23.82	<0.005~0.002	2.31
<0.05~0.02	34.95	<0.002	13.29
<0.02~0.01	13.33		

1.3 试验设计与观测

坡度的选取基于对神府高速公路沿线共计 120 处弃渣（土）场的实地调查结果确定（表 2），试验供水流量依据该区暴雨产流在试验小区产生的单宽流量和前期预实验的结果确定。

试验系统由试验小区、供水装置、集流装置组成（图 1）。供水装置包括潜水泵、分水器、溢流槽、流量计等，集流装置主要为置于小区出口之下

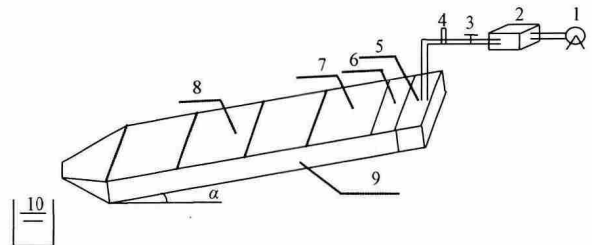
的径流桶。试验供水引自河水。

表 2 工程堆积体边坡坡度

Table 2 Slope grade of engineering soil deposits

坡度 Gradient/(°)	30~35	>35~40	>40~45	>45~50
堆积体数量 Number of accumulations	9	81	14	16
所占比例 Proportions/%	7.5	67.5	11.7	13.3

设计试验小区坡度为 36°，长 12 m，宽 2.5 m；设计供水流量为别为 10，15，20，25 和 30 L/min。小区四周采用 35 cm 高、2 mm 厚的钢板垂直打入坡面控制边界条件，露出地表 15 cm。试验期间，土壤容重为 1.28~1.52 g/cm³，前期质量含水率为 8%~19.2%。



1.潜水泵 Submersible pump; 2.分水器 Water segregator; 3.阀门 Valve; 4.流量计 Flowmeter; 5.溢流槽 Overflow tank; 6.防渗布 Impermeable fabric; 7.径流小区 Runoff plot; 8.观测断面 Observation section; 9.小区界面钢板 Steel plate; 10.径流桶及接样器 Bucket and samplers

图 1 野外放水试验装置示意图

Fig.1 Device sketch for experiments outdoors

试验开始前，用标有刻度的标准径流桶率定放水流量 2~3 次，以准确控制供水流量。试验小区坡面设置 4 个等间距相同观测断面，并在各断面附近测定土壤容重、土壤含水量等。试验开始后，通过调节回水管及出水管上的阀门和开关控制流量，水流经溢流槽稳流、消能后从出水端溢出，流经防渗布均匀地流入堆积体坡面，并随机汇集为股流，小区出口产流后记录产流时间，在各断面处测定流速、流宽，并接取径流泥沙样品。流速测定采用高锰酸钾示踪法，测距为 2 m^[12]，表面流速乘以修正系数 0.75 作为该断面的流速值^[13]。同一观测时段内 4 个观测断面的流速值取其平均作为观测时段内的坡面平均流速值。细沟出现以后，径流深用薄钢尺测量，观测断面处的流宽用直尺测量。试验开始前和结束后分别用温度计测量水温，以计算水动力粘滞系数。径流泥沙样品处理采用比重瓶法，径流含沙量使用混合表达形式。各场次试验视情况持续时间为 40~50 min。依据径流桶中水位变化及各时间段内泥沙径流样的测定，推算小区径流、泥沙过程，计算不同侵蚀产沙特征及坡面径流不同水动力学

参数特征。

1.4 数据分析方法

1) 土壤剥蚀率 (D_r)。单位时间单位面积水流剥蚀土壤的质量。

$$D_r = \frac{M}{bLT} \quad (1)$$

式中, D_r 为土壤侵蚀率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; M 为观测时段内的产沙量, kg ; b 为观测时段内的平均流宽, m ; L 为坡长, m ; T 为取样的时间间隔, s 。

2) 水流剪切力 (τ)。引起土壤颗粒分离并输移泥沙的径流冲刷动力。

$$\tau = \gamma_m g R J \quad (2)$$

式中, τ 为水流剪切力, Pa ; γ_m 为浑水密度, kg/m^3 , 由含沙量 S 进行单位换算取得; g 为重力加速度, $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; R 为水力半径, m , $R=A/P$, A 为过水断面面积, m^2 ; P 为湿周, m ; J 为水力坡度, m/m , 可用坡度的正弦值近似代替。

3) 水流功率 (ω)。表征作用于单位面积的水流所消耗的功率。

$$\omega = \tau V \quad (3)$$

式中, ω 为水流功率, $\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$; V 为坡面平均水流流速, m/s 。

4) 单位水流功率 (P)。表征单位质量水体势能随时间的变化率。

$$P = V \times J \quad (4)$$

式中, P 为单位水流功率, m/s 。

5) 径流动能 (F)。表示径流侵蚀力。

$$F = \frac{\gamma Q V^2}{2g} \quad (5)$$

式中, F 为水流动能, J ; γ 为径流容重, N/m^3 ; Q 为径流量, m^3 。

6) 过水断面单位能量 (E)。为以过水断面最低点作基准面的单位水重的动能及势能之和。

$$E = \frac{aV^2}{2g} + h \quad (6)$$

式中, E 为断面单位能量, cm ; h 为水深, cm ; a 为校正系数, 取为 1。

2 试验结果及分析

2.1 水流剪切力对侵蚀产沙的影响

细沟侵蚀是水流剪切力的函数, 与水流剪切力及临界水流剪切力之差成正比^[14-15]。

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \quad (7)$$

式中, D_r 为土壤剥蚀率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; K_r 为土壤可蚀性参数, s/m , 与土壤性质有关; τ_c 为临界水流剪切力, Pa 。

试验条件下在坡面径流不同阶段坡面侵蚀方式有所变化, 自坡面开始产流至 3 min 时, 表层物质结构松散, 基本为薄层水流条件下的面蚀过程; 自 3 min 以后至产流结束, 主要为股流条件下的细沟侵蚀过程, 薄层水流及细沟水流条件下土壤剥蚀率与水流剪切力之间的关系如图 2。

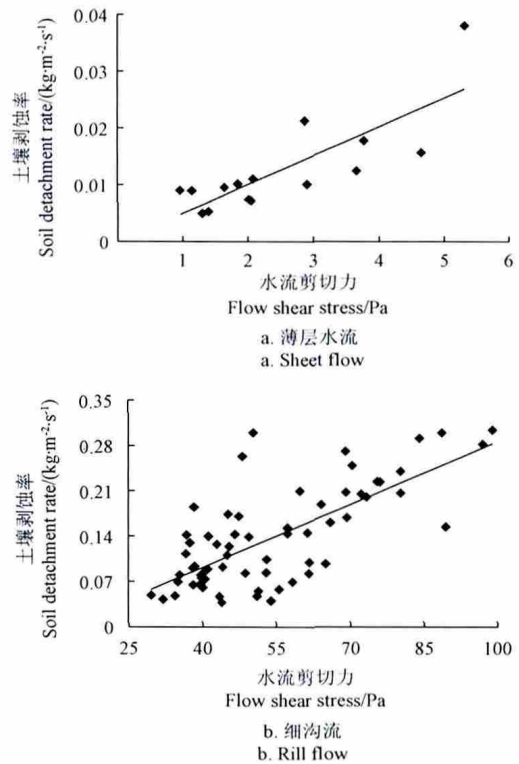


图 2 土壤剥蚀率与水流剪切力的关系

Fig.2 Relationships between soil detachment rate and flow shear stress

回归分析可得如下方程:

$$D_{rs} = 0.005(\tau_s - 0.02)(R^2 = 0.6479, P < 0.01) \quad (8)$$

$$D_{rr} = 0.003(\tau_r - 12.8)(R^2 = 0.5178, P < 0.01) \quad (9)$$

式中, τ_s 、 τ_r 分别表示薄层水流侵蚀及细沟侵蚀条件下的水流剪切力; D_{rs} 、 D_{rr} 分别表示与之相对应的土壤剥蚀率, 符号意义及单位同前。

由式 (8)、(9) 可知薄层水流侵蚀的土壤可蚀性参数为 $5 \times 10^{-3} \text{ s}/\text{m}$, 薄层水流搬运表层松散堆积物的临界水流剪切力 0.02 Pa; 细沟侵蚀的土壤可蚀性参数为 $3 \times 10^{-3} \text{ s}/\text{m}$, 侵蚀性细沟开始剥离土壤颗粒产生侵蚀的临界水流剪切力为 12.8 Pa。

土壤可蚀性参数介于 $1 \times 10^{-3} \sim 8.4 \times 10^{-3} \text{ s}/\text{m}$ 之间^[16-18], 与张光辉^[17]的结果 ($5^\circ \sim 25^\circ$, 原状土) 接近, 随侵蚀过程的延续, 可蚀性降低; 薄层水流侵蚀的临界水流剪切力为相关研究结果的 1/10^[19], 更不足农地原状土条件下的 1/100, 表明堆积体坡面易于发生土壤侵蚀的脆弱性和敏感性; 发生细沟侵蚀的临界水流剪切力接近赵海滨^[20]的结果 ($10^\circ \sim$

30°，装填土），大于张科利等^[21]的研究结果（6°~15°），表明随着坡面侵蚀形态由面蚀向沟蚀的转变，发生侵蚀的临界水流剪切力在增大。上述结果存在较大差异性的原因主要在于堆积体的陡坡结构和表层松散的物质组成。

2.2 水流功率对侵蚀产沙的影响

水流功率表征水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^[22]。

$$D_r = K_d(\omega - \omega_c) \quad (10)$$

式中， K_d 为土壤可蚀性参数， s^2/m^2 ，与土壤性质有关； ω_c 为临界水流功率， $N/(m \cdot s)$ 。

土壤剥蚀率与水流功率之间的关系如图 3。

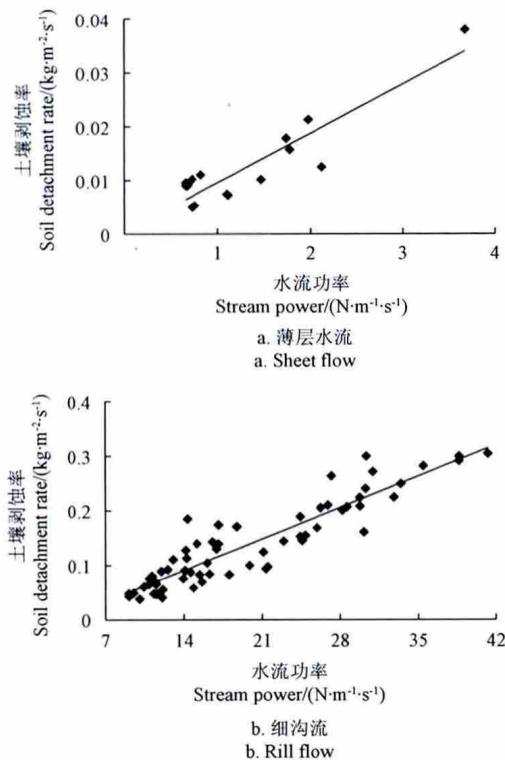


图 3 土壤剥蚀率与水流功率的关系

Fig.3 Relationships between soil detachment rate and stream power

回归分析可得如下方程：

$$D_{rs} = 0.009(\omega_s + 0.04) \quad (R^2 = 0.8301, P < 0.01) \quad (11)$$

$$D_{rr} = 0.008(\omega_r - 3) \quad (R^2 = 0.8433, P < 0.01) \quad (12)$$

式中， ω_s 、 ω_r 分别表示薄层水流、细沟水流过程中的水流功率； D_{rs} 、 D_{rr} 分别表示与之对应的土壤剥蚀率，符号意义及单位同前。

由 (11) 式可知，薄层水流侵蚀的土壤可蚀性参数为 $9 \times 10^{-3} s^2/m^2$ ，薄层水流侵蚀发生的临界水流功率为 $-0.04 N/(m \cdot s)$ ，出现偏差的原因在于：第一，细沟产沙量主要来源于水流剪切、溯源侵蚀和沟壁坍塌三部分作用^[23]，本试验的坡度和流量条件下侵

蚀过程中的重力作用不可忽视^[24]，已不仅属水蚀范畴；第二，薄层水流侵蚀及细沟侵蚀仅是按试验现象进行的人为划分（试验的局限性），薄层水流侵蚀出现时间极短（2~3 min），后期即出现溯源侵蚀，其所占比例随放水流量的增加而提高（试验系统误差放大了这种影响），超出控制方程的调节范畴；第三，计算的土壤剥蚀率并非净土壤剥蚀率，沿程存在沉积过程的影响，导致对水流功率的作用产生错误估计。由式 (12) 可知，细沟侵蚀的土壤可蚀性参数为 $8 \times 10^{-3} s^2/m^2$ ，发生细沟侵蚀的临界水流功率为 $3 N/(m \cdot s)$ 。

土壤可蚀性参数介于 $5.2 \times 10^{-4} \sim 3.13 \times 10^{-2} s^2/m^2$ 之间^[18,25-27]，近似于农田原状土的 10 倍^[18]、室内装填土的 1/30^[26-27]，发生细沟侵蚀的临界水流功率与赵海滨^[20]的结果接近。

2.3 单位水流功率对侵蚀产沙的影响

土壤剥蚀率与单位水流功率之间的关系如图 4。

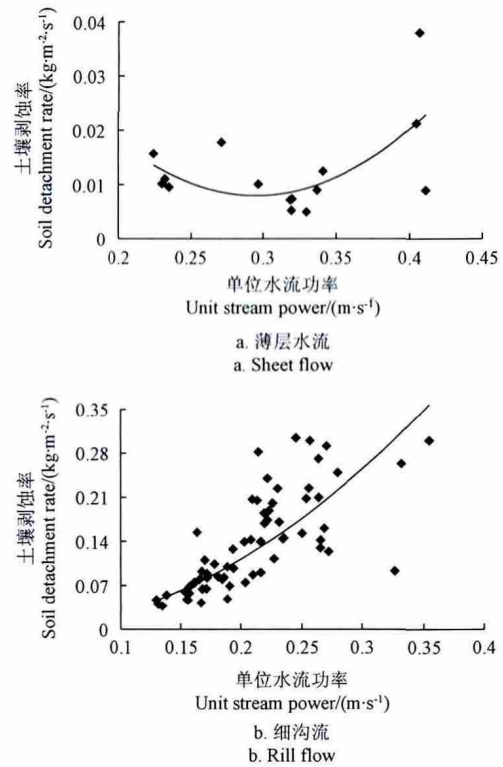


图 4 土壤剥蚀率与单位水流功率的关系

Fig.4 Relationships between soil detachment rate and unit stream power

回归分析可得如下方程：

$$D_{rs} = 1.113P_s^2 - 0.657P_s + 0.105 \quad (R^2 = 0.382, P < 0.01) \quad (13)$$

$$D_{rr} = 2.94P_r^{2.03} \quad (R^2 = 0.6376, P < 0.01) \quad (14)$$

式中， P_s 、 P_r 分别表示薄层水流、细沟水流过程中的单位水流功率； D_{rs} 、 D_{rr} 分别表示与之对应的土壤剥蚀率，符号意义及单位同前。

式 (13) 的形式与某些结果类似^[27]，但可决系

数不高，表明薄层水流侵蚀条件下土壤剥蚀率与单位水流功率的关系并不密切；式（14）表明细沟侵蚀条件下土壤剥蚀率与单位径流功率之间存在显著的幂函数关系，指数与张光辉^[17]的研究结果相比偏大。

2.4 径流动能对侵蚀产沙的影响

哈德逊、摩根分别成功地采用径流动能来表示径流侵蚀力^[28]，土壤剥蚀率与径流动能之间的关系如图 5。

回归分析可得如下方程：

$$D_{rs}=0.005F_s+0.007 (R^2=0.7891, P < 0.01) \quad (15)$$

$$D_{rr}=0.06\ln(F_r)+0.01 (R^2=0.510, P < 0.01) \quad (16)$$

式中， F_s 、 F_r 分别表示薄层水流、细沟水流过程中的径流动能； D_{rs} 、 D_{rr} 分别表示与之对应的土壤剥蚀率，符号意义及单位同前。

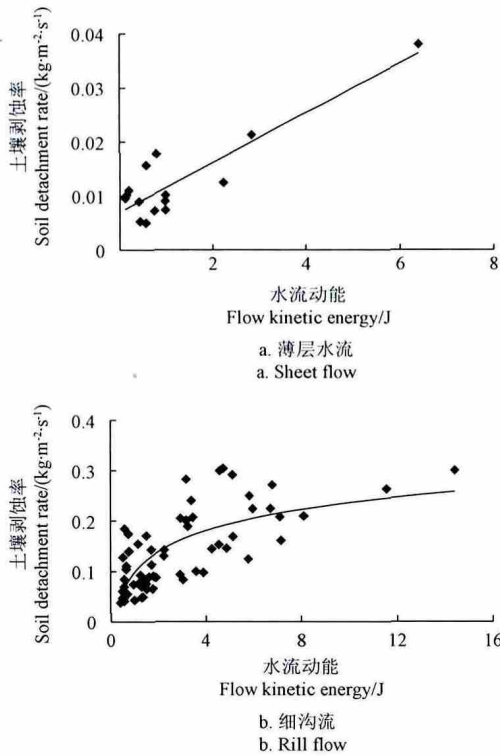


图 5 土壤剥蚀率与径流动能的关系

Fig.5 Relationships between soil detachment rate and flow kinetic energy

式（15）的形式与张永东^[29]的研究结果相似，式（16）的形式与吴淑芳^[28]的研究结果相似，图 5 的结果体现了坡面侵蚀的 2 个阶段，随着侵蚀形态由薄层水流侵蚀向细沟侵蚀的转变，土壤剥蚀率的变化趋势也发生了改变。

由于工程堆积体表层物质松散，薄层水流阶段入渗率高而产流率低，径流动能小，土壤剥蚀率低；在此阶段径流的分离作用并不强烈，随径流动能增加土壤剥蚀率发生陡增，主要是径流搬运堆积体表

层松散堆积物的结果，此时的侵蚀以搬运过程为主；细沟侵蚀阶段，产流率增大且逐渐趋于稳定，随着径流动能的增加土壤剥蚀率增速减小，侵蚀相对较为稳定，主要是由于水流搬运带走堆积物表层松散物质后，坡面侵蚀过程已转为以分离-搬运过程为主的阶段。

2.5 过水断面单位能量对侵蚀产沙的影响

过水断面单位能量是反映坡面侵蚀程度及侵蚀方式变化的重要参数^[30]。土壤剥蚀率与断面单位能量的关系曲线如图 6。

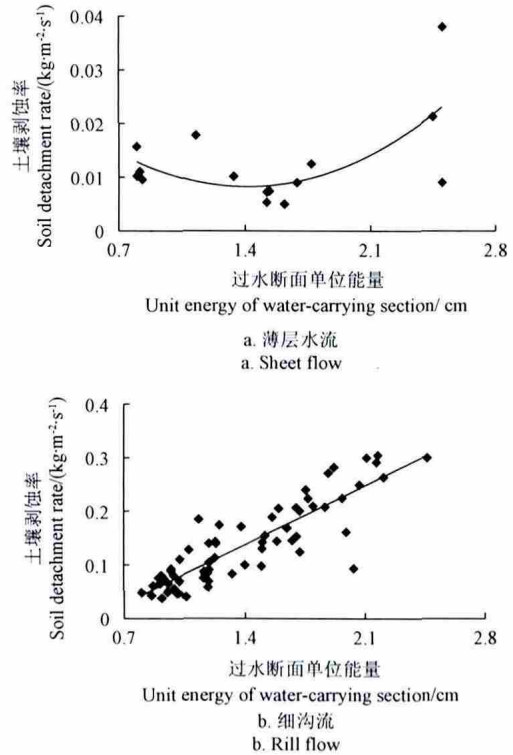


图 6 土壤剥蚀率与过水断面单位能量的关系

Fig.6 Relationships between soil detachment rate and unit energy of water-carrying section

回归分析可得如下方程：

$$D_{rs}=0.013E_s^2-0.035E_s+0.03 (R^2=0.4285, P < 0.01) \quad (17)$$

$$D_{rr}=0.16(E_r-0.53) (R^2=0.7624, P < 0.01) \quad (18)$$

式中， E_s 、 E_r 分别表示薄层水流、细沟水流过程中的径流动能； D_{rs} 、 D_{rr} 分别表示与之对应的土壤剥蚀率，符号意义及单位同前。

式（17）与某些研究结果类似^[31]，但可决系数不高，表明薄层水流侵蚀条件下土壤剥蚀率与过水断面单位能力的关系并不密切，不具有普遍性；由式（18）可知细沟侵蚀条件下土壤剥蚀率与过水断面单位能量之间存在着良好的线性关系，符合 $D_r=(E-b)$ 的一般表达式^[32]，其中， b 表示坡面土壤被剥蚀时的临界过水断面单位能量。试验条件下发生

细沟侵蚀的临界过水断面单位能量为 0.53 cm，小于黄土坡面细沟侵蚀的 1.4 cm^[30]，大于红壤及紫色土坡面土壤剥蚀的 0.24 cm 及 0.23 cm^[32]。

3 讨 论

从上述分析可知，试验坡度及流量条件下，工程堆积体陡坡坡面侵蚀过程中的侵蚀方式表现为短时间的薄层水流侵蚀和随后的细沟侵蚀。水流剪切力 τ 、水流功率 ω 、单位水流功率 P 、径流动能 F 及过水断面单位能量 E 在不同程度上均可用以描述工程堆积体陡坡坡面侵蚀动力过程，就拟合效果 R^2 而言，薄层水流侵蚀条件下： $\omega > F > \tau > E > P$ ；细沟侵蚀条件下： $\omega > E > P > \tau > F$ 。因此，水流功率是描述试验条件下工程堆积体陡坡坡面薄层水流侵蚀及细沟侵蚀动力过程的最佳水动力学参数，是坡面侵蚀的动力根源。同时，不同条件下运用不同理论产生的土壤可蚀性参数与临界侵蚀动力参数的大小之间并无必然联系，表明采用原状土（包括工程建设中的原始扰动土）进行土壤侵蚀动力学机制研究的重要性。

综观近年来的土壤侵蚀动力学机理研究，对土壤侵蚀动力学过程的描述主要涉及两类参数：力学参数及能量参数，水流剪切力、单位长度剪切力等均属力学参数；径流流速、单宽能耗、径流能量、断面单位能量、水流功率及单位水流功率等均属能量参数。张光辉^[33]的研究认为，控制土壤分离速率的水动力参数为能量而不是力，也有相关研究指出，坡面径流能耗理论相对简便且误差较小，更利于对坡面土壤侵蚀过程进行描述^[34]。本文的结果表明上述不同理论中控制方程的运用要受坡面不同侵蚀形态的影响，径流分离、搬运作用对坡面泥沙产出的贡献区分也是建立方程的关键。试验条件下，作为水蚀的开端，薄层水流侵蚀持续时间较短，以表层松散物质的搬运为主；细沟侵蚀阶段以径流分离-搬运过程为主。不同水动力参数的有效性似因侵蚀方式、侵蚀物质等而有异。实际应用过程中具体参数的选择要依实际问题加以判定，不可一概而论。

本文对工程堆积体陡坡坡面的薄层水流侵蚀及细沟侵蚀的动力学过程从力学参数及能量参数的角度进行了分析研究。关于单宽能耗理论在工程堆积体陡坡坡面侵蚀动力过程研究中的运用，限于本文开展的工作量较少，仍需进一步探索和不断完善。

4 结 论

采用野外放水试验的方法对线形生产建设项目典型工程堆积体陡坡坡面的土壤侵蚀水动力学过程进行了试验研究，得出的主要结果如下：

1) 土壤剥蚀率与水流剪切力之间存在较好的线性关系，薄层水流侵蚀可蚀性参数为 5×10^{-3} s/m，临界剪切力为 0.02 Pa；细沟侵蚀可蚀性参数为 3×10^{-3} s/m，临界剪切力为 12.8 Pa。

2) 水流功率对土壤剥蚀率的影响可用线性方程描述，薄层水流侵蚀可蚀性参数为 9×10^{-3} s²/m² ($R^2=0.83$)；细沟侵蚀可蚀性参数为 8×10^{-3} s²/m²，临界剪切力为 3 N/(m·s) ($R^2=0.8$, $P < 0.014$)。

3) 薄层水流侵蚀土壤剥蚀率与单位水流功率之间的关系并不密切，细沟侵蚀土壤剥蚀率与单位水流功率之间存在较显著的幂函数关系 ($R^2=0.64$, $P < 0.01$)。

4) 薄层水流侵蚀土壤剥蚀率与径流动能之间的关系可用线性方程描述 ($R^2=0.79$, $P < 0.01$)，而细沟侵蚀土壤剥蚀率与径流动能之间的关系可用对数线性方程描述 ($R^2=0.51$, $P < 0.01$)。

5) 过水断面单位能量对薄层水流侵蚀的描述状态远弱于细沟侵蚀。细沟侵蚀土壤剥蚀率与过水断面单位能量之间存在良好的线性关系 ($R^2=0.76$, $P < 0.01$)，发生细沟侵蚀的临界过水断面单位能量为 0.53 cm。

致谢：郑世清研究员在野外试验选址及前期试验准备中予以指导和大力协助，王占礼研究员在论文修改过程中提出了宝贵意见，张少佳、王凯参与部分野外试验工作，在此一并表示感谢。

[参 考 文 献]

- [1] Harbor J. Engineering geomorphology at the cutting edge of land disturbance: erosion and sediment control on construction sites[J]. *Geomorphology*, 1999(1): 247 - 263.
- [2] 贺康宁, 王治国, 赵永军. 开发建设项目水土保持[M]. 北京: 中国林业出版社, 2009: 1 - 3.
He Kangning, Wang Zhiguo, Zhao Yongjun. The water and soil conservation of development and construction projects[M]. Beijing: China Forestry Press, 2009: 1 - 3. (in Chinese with English abstract)
- [3] 蔺明华. 开发建设项目新增水土流失研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008: 10 - 18.
- [4] 王文龙, 李占斌, 李鹏, 等. 神府东胜煤田开发建设弃土弃渣冲刷试验研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 68 - 71.
Wang Wenlong, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Scouring experiment on residues of shenfu dongsheng coalfield during exploitation[J]. *Journal of soil and water conservation*, 2004, 18(5): 68 - 71. (in Chinese with English abstract)

- [5] Yang H, Lin L, He Y. Soil erosion caused by highway construction in expansive soils districts and its prevention measures[C]//Proceedings of the 2nd International Conference GEDMAR08. Beijing: Science Press, 2008: 781 - 789.
- [6] 徐宪立, 张科利, 庞玲, 等. 青藏公路路堤边坡产流产沙规律及影响因素分析[J]. 地理科学, 2006, 26(2): 211 - 216.
Xu Xianli, Zhang Keli, Pang Ling, et al. Laws of soil erosion on side slopes of qinghai-tibet highway[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(2): 211 - 216. (in Chinese with English abstract)
- [7] 奚成刚, 杨成永, 许兆义. 铁路工程施工期路堑边坡面产流产沙规律研究[J]. 中国环境科学, 2002, 22(2): 79 - 83.
Xi Chenggang, Yang Chengyong, Xu Zhaoyi. Studies on rules of runoff and sediment yield on the road cutting slope during construction of the railway[J]. China Environmental Science, 2002, 22(2): 79 - 83. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王文龙, 王兆印, 李占斌, 等. 神府东胜煤田开发中扰动地面径流泥沙模拟研究[J]. 泥沙研究, 2006(2): 60 - 64.
Wang Wenlong, Wang Zhaoyin, Li Zhanbin, et al. Study on the simulation of runoff and sediment yield on the disturbed lands during the Shenfu-Dongsheng coalfield exploitation[J]. Journal of Sediment Research, 2006(2): 60 - 64. (in Chinese with English abstract)
- [9] Knapen A, Poesen J, Govers G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2007(80): 75 - 109.
- [10] Nearing M A. A probabilistic model of soil detachment by shallow turbulent flow[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(1): 81 - 85.
- [11] 府谷县志编纂委员会. 府谷县志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1994: 312 - 318.
- [12] 罗榕婷, 张光辉, 沈瑞昌, 等. 染色法测量坡面流速的最佳测流区长度研究[J]. 水文, 2010, 30(3): 5 - 9.
Luo Rongting, Zhang Guanghui, Shen Ruichang, et al. Study on optimal length for measuring velocity of overland flow with dye tracing[J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(3): 5 - 9. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李占斌, 秦百顺, 亢伟, 等. 陡坡面发育的细沟水动力学特性室内试验研究[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)
- [14] Nearing M A, Parker S C. Detachment of soil by flowing water under turbulent and laminar conditions[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(6): 1612 - 1614.
- [15] Zhu X, Risse L M, Mccutcheon S C, et al. Laboratory investigation of rill erosion on compost blankets under concentrated flow conditions[J]. Transactions of the ASABE, 2010, 53(4): 1077 - 1086.
- [16] 雷俊山, 杨勤科. 坡面薄层水流侵蚀试验研究及土壤抗冲性评价[J]. 泥沙研究, 2004(6): 22 - 26.
Lei Junshan, Yang Qinke. Experimental research on sheet flow erosion of loessial slope and evaluation on soil anti-scourability[J]. Journal of Sediment Research, 2004(6): 22 - 26. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 48 - 52.
Zhang Guanghui, Liu Baoyuan, He Xiaowu. Study on hydro-dynamic mechanism of natural soil detachment in loess region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(4): 48 - 52. (in Chinese with English abstract)
- [18] 何小武, 张光辉, 刘宝元. 坡面薄层水流的土壤分离实验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 52 - 55.
He Xiaowu, Zhang Guanghui, Liu Baoyuan. Soil detachment by shallow flow on slopes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(6): 52 - 55. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘俊娥, 王占礼, 高素娟, 等. 黄土坡面片蚀过程动力学机理试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 144 - 149.
Liu Jun'e, Wang Zhanli, Gao Sujuan, et al. Experimental study on hydro-dynamic mechanism of sheet erosion processes on loess hillslope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(7): 144 - 149. (in Chinese with English abstract)
- [20] 赵海滨, 闫国新, 姚文艺, 等. 黄土坡面径流输沙能力试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 41 - 44.
Zhao Haibin, Yan Guoxin, Yao Wenyi, et al. Experimental study on sediment transport capacity of sheet flow over loess slope[J]. Journal of soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 41 - 44. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张科利, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(1): 9 - 15.

- Zhang Keli, Tang Keli. A study on hydraulic characteristic of flow for prediction of rill detachment capacity on loess slope[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(1): 9 - 15. (in Chinese with English abstract)
- [22] Elliot W J, Laflen J M. A process-based rill erosion model[J]. *Transactions of the ASAE*, 1993, 36(1): 65 - 72.
- [23] 韩鹏, 倪晋仁, 李天宏. 细沟发育过程中的溯源侵蚀与沟壁崩塌[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2002, 10(2): 115 - 125.
- Han Peng, Ni Jinren, Li Tianhong. Head cut and bank landslip in rill evolution[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2002, 10(2): 115 - 125. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张乐涛, 高照良, 李永红, 等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(8): 145 - 153.
- Zhang Letao, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope under simulated runoff conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(8): 145 - 153. (in Chinese with English abstract)
- [25] 管新建, 李占斌, 王民, 等. 坡面径流水蚀动力参数室内试验及模糊贴近度分析[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(6): 1 - 6.
- Guan Xinjian, Li Zhanbin, Wang Min, et al. Laboratory experiment and fuzzy nearness degree analysis of runoff hydrodynamic erosion factors on slope land surface[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(6): 1 - 6. (in Chinese with English abstract)
- [26] 王瑄, 李占斌, 李雯, 等. 土壤剥蚀率与水流功率关系室内模拟实验[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 185 - 187.
- Wang Xuan, Li Zhanbin, Li Wen, et al. Indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and stream power[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(2): 185 - 187. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王瑄, 李占斌, 尚佰晓, 等. 坡面土壤剥蚀率与水蚀因子关系室内模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(9): 22 - 26.
- Wang Xuan, Li Zhanbin, Shang Baixiao, et al. Indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and water erosion factor[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(9): 22 - 26. (in Chinese with English abstract)
- [28] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 黄土坡面径流剥离土壤的水动力学过程研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(2): 223 - 228.
- Wu Shufang, Wu Pute, Song Weixiu, et al. Hydrodynamic process of soil detachment by surface runoff on loess slope[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2): 223 - 228. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张永东, 吴淑芳, 冯浩, 等. 黄土陡坡细沟侵蚀动态发育过程及其发生临界动力条件试验研究[J]. *泥沙研究*, 2013(2): 25 - 32.
- Zhang Yongdong, Wu Shufang, Feng Hao, et al. Experimental study of rill dynamic development process and its critical dynamic conditions on loess slope[J]. *Journal of Sediment Research*, 2013(2): 25 - 32. (in Chinese with English abstract)
- [30] 雷阿林, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀的动力条件[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(3): 40 - 44.
- Lei A'lin, Tang Keli. Kinetic condition of rill erosion on loess sloping face[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998, 4(3): 40 - 44. (in Chinese with English abstract)
- [31] 谭贞学, 王占礼, 刘俊娥, 等. 黄土坡面细沟径流输沙对水动力学参数的响应[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(5): 1 - 6.
- Tan Zhenxue, Wang Zhanli, Liu Jun'e, et al. Response of runoff-induced sediment discharge to hydrodynamic parameters of rill on loess slope[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(5): 1 - 6. (in Chinese with English abstract)
- [32] 丁文峰. 紫色土和红壤坡面径流分离速度与水动力学参数关系研究[J]. *泥沙研究*, 2010(6): 16 - 22.
- Ding Wenfeng. Relationships between soil detachment rate and runoff hydrodynamic indexes of purple soil slope and red soil slope[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(6): 16 - 22. (in Chinese with English abstract)
- [33] 张光辉, 刘宝元, 张科利. 坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J]. *土壤学报*, 2002, 39(6): 882 - 886.
- Zhang Guanghui, Liu Baoyuan, Zhang Keli. Experimental simulation of hydraulic mechanism of soil detachment by surface runoff on slope land[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(6): 882 - 886. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李鹏, 李占斌, 郑良勇, 等. 坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 66 - 69.
- Li Peng, Li Zhanbin, Zheng Liangyong, et al. Comparisons of dynamic mechanics of soil erosion and sediment yield by runoff on loess slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 66 - 69. (in Chinese with English abstract)

Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation

Zhang Letao^{1,2}, Gao Zhaoliang^{1,3}, Tian Hongwei⁴

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

Abstract: Soil erosion newly derived from engineering accumulation severely threatens ecological safety of construction sites and surrounding areas. It is of great necessity to carry out researches on hydrodynamic process of soil erosion originated from engineering soil deposits, and develop prediction model of soil erosion in production and construction areas. A set of field pouring water scouring experiments were conducted on the experimental plot with 72.7% gradient and 12-meter length, which lies in a steep slope of a typical spoil ground along the line of Shenfu freeway, to investigate the hydrodynamic process of soil erosion of the engineering accumulation. At the upper slope of runoff plot, a watering system consisting of submersible pump, water segregator, valves, flowmeter, overflow tank and impermeable fabric was set up to achieve desired discharges. Inflow discharges were designed according to calculated unit discharge occurred on experimental plot under a certain rainstorm frequency and determined by pre-experiment. During the whole experimental process, 4 evenly spaced observation sections were down slope arranged to conduct soil sampling, flow velocity measurement and water-crossing section observations. At the bottom of experimental plot, a bucket was designed to collect all the runoff and sediment, and take samples during different intervals at different stages of experimental process. The process of runoff producing and sediment yielding can be deduced and calculated from the water level recording in the bucket and samples. A single trial persisted 40-50 minutes. Preliminary result reveals that: 1) relationships between flow shear stress, stream power, flow kinetic energy and soil detachment rate under sheet flow erosion all can be expressed by linear equation, except that effects of unit stream power and unit energy of water-carrying section on sheet flow erosion rates are not significant; 2) soil detachment rate under rill erosion conditions can be described with log-linear equation of runoff kinetic energy, and also linearly relates to flow shear stress, stream power, and unit energy of water-carrying section respectively; 3) stream power is the best hydrodynamic parameter simulating changing trend of soil detachment, and should be the power source of slope erosion; 4) critical unit stream power for rill erosion is $3 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, the value of rill erodibility parameter is $8\times 10^{-3} \text{ s}^2\cdot\text{m}^{-2}$. In terms of fitting effect, the parameters tested should be ranked in the order of stream power>runoff kinetic energy>flow shear stress>unit energy of water-carrying section>unit stream power for sheet flow erosion, and stream power>unit energy of water-carrying section>unit stream power>flow shear stress>runoff kinetic energy for rill erosion, which indicates that mechanics parameters and energy parameters have different advantages on descriptions of dynamic process of soil erosion in steep slope of engineering soil deposit, which should be determined on practical considerations instead of lumped together. The result obtained may lay the foundation for the establishment of process-based model of soil erosion initiated by engineering accumulation, and provide scientific guidance for comprehensive control of newly arising soil & water loss in production and construction areas.

Key words: soil, erosion, runoff, engineering accumulation, steep slope, hydrodynamic process, stream power

(责任编辑: 曾懿婷)