

模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程

张乐涛¹, 高照良^{1,2*}, 李永红^{1,2}, 田红卫³

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

摘要: 工程建设过程中形成的堆积体具有独特的土壤组成及复杂的下垫面条件, 堆积体表面土壤结构体缺失、土质松散、植物根系及有机质缺乏等, 导致其土壤抗冲性极差, 径流条件下堆积体陡坡坡面的土壤侵蚀过程亦表现出不同的特点, 该文通过野外放水试验, 对高速公路沿线典型堆积体陡坡(36°)在模拟径流冲刷条件下的土壤侵蚀过程进行了研究, 结果表明, 次径流过程中径流强度变化与放水强度及径流含沙量密切相关, 三者之间呈多元线性相关; 重力侵蚀对径流含沙量的变化具有重要影响, 试验条件下重力作用的临界放水条件在 20~25 L/min 之间; 坡面产沙过程存在产沙量的突变、波动变化和稳定发展 3 个阶段; 不同坡段产沙量的空间分布存在持续稳定减小和震荡式波动衰减 2 种变化形式; 土壤剥蚀率与单宽流量呈线性关系, 与时段产沙量及流宽呈幂函数关系; 最后, 时段产沙量与时段径流量呈幂函数关系, 累积产沙量与累积径流量呈线性关系。

关键词: 土壤, 侵蚀, 径流, 工程堆积体, 黄土丘陵区, 陡坡

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.08.017

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-08-0145-09

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)

0 引言

弃土弃渣塑造的工程堆积体是工程建设项目新增水土流失的主要来源之一^[1], 基于水土保持的实际需求, 工程建设区土壤侵蚀预报成为近年来的研究重点。当前国内生产建设项目的土壤侵蚀预测多采用经验统计模型, 以通用土壤流失方程(USLE)为模型的基本框架, 进行因子的选择、量化分析及修正, 进而建立各具特色的土壤侵蚀预报方程^[2-4]。研究所涉建设项目类型包括线形工程(公路工程、铁路工程等)和点(片)状工程(水电工程、露天煤矿工程等), 涵盖路堤边坡、路堑边坡、弃渣体、弃土体、施工便道、施工营地、原地面及人为扰动地面等下垫面条件, 囊括挖方、填方、埋压、堆垫等扰动类型, 在研究的深度和广度上均具有代表性和实用性。然而, 由于各类模型的参数不

尽相同, 在实际应用中往往因参数选择的主观性而降低了结果的预报精度, 因而在生产实践中限制了模型的推广。此外, 由于长期动态监测数据的匮乏, USLE 在工程建设区的适用性尚需进一步商榷。

人为扰动具有阶段性的特点, 一次强降雨过程及径流聚集形成了强烈侵蚀的动力条件^[5], 加之目前关于生产建设项目水土流失尚无统一的划分方案^[6], 而对土壤侵蚀过程的正确理解是侵蚀防护措施设计和实施的基本前提^[7], 这实际凸显了研究工程建设区土壤侵蚀过程的时效性和条件性。

近年来我国在坡面流水动力学特性^[8-9]及其与土壤侵蚀的关系方面开展了大量研究^[10], 动力侵蚀过程的研究取得了长足进展。然而, 仍存在诸多不确定性:

1) 室内模拟有其局限性: 人为扰动方式及扰动程度未能涵盖一般情况; 成果虽丰富, 但并未界定结论的使用条件, 须对其进行实际条件下的验证和转化;

2) 土壤侵蚀模型选择的参数应具有代表性强、算法简明、易于获取等特点, 因而, 参数的选择存在取舍问题。

鉴于工程建设区水土流失发生背景条件的深刻变化与侵蚀控制实际需求间的矛盾, 不同扰动形

收稿日期: 2012-12-31 修订日期: 2013-04-01

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题: 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。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, 主要研究方向为农业水土工程和荒漠化防治。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。Email: gzl@ms.iswac.ac.cn

式下水沙关系的研究仍需进一步加强和深入。为此,本文对高速公路沿线典型工程堆积体陡坡在模拟径流冲刷条件下的土壤侵蚀过程进行了研究,以期为建设区土壤侵蚀预报方程的开发提供一定的科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于“神木—府谷”高速公路石马川收费站附近的一处弃土场,地理位置 $38^{\circ}56'15.5''\text{N}$, $110^{\circ}53'10.0''\text{E}$, 平台面积 2.796 hm^2 , 周长约 $1\ 000 \text{ m}$, 边坡坡度 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$, 陡坡斜长 $70\sim 80 \text{ m}$, 平均 78 m , 地处黄河支流—石马川沿岸, 海拔高度 966 m , 周围地貌类型主要为黄土梁峁沟壑区和基座式河谷阶地。

该区位于府谷县西南的府谷镇石马川行政村, 属中温带半干旱大陆性季风气候, 按照府谷县气候区划分, 该区属寒温带半干旱峡谷丘陵区, 降水量处于 440 mm 等降水量线附近, 多年平均蒸发量约为 $1\ 200 \text{ mm}$ 。日降水量在 $50\sim 100 \text{ mm}$ 的暴雨 10 年 8 遇, 一年内暴雨主要集中在 6~9 月, 时间分布不均, 夏季平均降水 284.6 mm , 占全年 62.77% , 又位于黄河边缘易形成山洪。石马川小流域多年平均年径流深为 $110\sim 120 \text{ mm}$, 多年平均流量 $0.68 \text{ m}^3/\text{s}$, 年径流总量 0.2144 亿 m^3 , 年输沙量 597 万 t 。

试验区的植被类型主要为沙棘、沙蓬、沙芥、沙柳等沙生植被, 原地貌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, 石马川多年平均年土壤侵蚀模数为 $3.04 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 试验区年侵蚀模数在 $2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间, 水土流失严重^[11]。

1.2 材料与方法

神府高速公路沿线 120 处弃渣(土)堆积体的调查结果显示堆积体边坡坡度的变化范围为 $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$, $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的陡坡占 67.5% , 其中, $36^{\circ}\sim 39^{\circ}$ 出现的频率最大, 为 53.3% , 基本情况如表 1。

表 1 工程堆积体边坡坡度

Table 1 Side slope grade of engineering soil deposits

陡坡坡度/(°)	30~35	>35~40	>40~45	>45~50
堆积体个数	9	81	14	16
所占比例	7.5%	67.5%	11.7%	13.3%

根据调查结果及研究区域特点, 基于可调坡度及水源地的考虑, 小区布设在石马川沿岸弃土体的陡坡上, 坡度 36° , 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, 土壤粒径组成如表 2 所示。

试验小区长 12 m , 宽 2.5 m , 四周采用 35 cm 高、 2 mm 厚的钢板控制边界条件, 钢板垂直坡面打入, 露出地表 15 cm , 以防径流渗漏。

表 2 土壤颗粒组成

Table 2 Soil particle composition

粒径/mm	颗粒组成/%	粒径/mm	颗粒组成/%
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		

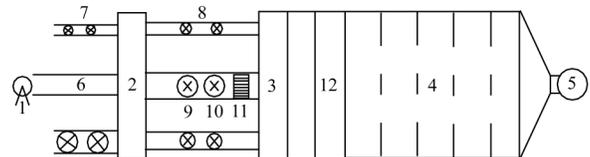


图 1 野外放水冲刷试验系统装置示意图

Fig.1 Device sketch for experiments outdoors

试验装置如图 1 所示, 供水引自河水。根据该区暴雨发生频率在试验小区产生的单宽流量及前期预实验将放水流量设置为 5 个梯度: $10, 15, 20, 25$ 和 30 L/min 。试验期间, 土壤容重变化范围为 $1.28\sim 1.52 \text{ g/cm}^3$, 土壤前期质量含水率的变化范围为 $8\%\sim 19.2\%$ 。

试验开始前, 用标有刻度的径流桶率定放水流量 $2\sim 3$ 次, 沿坡长方向设置 4 个间距相同的观测断面, 在各断面附近测定土壤容重、土壤含水量等。试验开始后, 通过调节回水管及阀门和开关控制流量, 水流经过自制放水槽的稳流、消能, 在出水端溢出, 流经防渗布, 尽可能使水流在坡面上均匀分散, 并随机汇集为股流, 产流后记录产流时间, 在各断面处测定流宽, 并接取径流泥沙样品。径流泥沙样在产流后 3 min 内每 1 min 取 1 次, 3 min 后每隔 3 min 取 1 次, 不设分流设施, 径流桶接收全部泥沙和径流。流宽用直尺测量, 分别取每场试验中 4 个观测断面的平均值。根据径流桶水位变化推算小区径流、泥沙过程。单场次试验视情况持续时间为 $40\sim 50 \text{ min}$ 。

1.3 数据分析方法

1) 泥沙样品处理。限于野外条件, 取样瓶中泥沙的质量采用比重瓶法计算^[5], 含沙量使用混合表达形式

$$G = \frac{\gamma_s(W - V\gamma)}{\gamma_s - \gamma}, \quad S = \frac{G}{V} \quad (1)$$

式中, G 为泥沙质量, g ; γ_s 为泥沙比重, 取 2.65 ; γ 为清水比重; W 为浑水质量, g ; V 为浑水体积, mL ; S 为含沙量, g/mL 。

2) 放水强度与径流强度 (P 、 M)。试验过程中任一时段的放水强度与径流强度分别用该时段内放水流量及径流量在坡面平均过水面积上的平均径流深表示, 放水流量为预设值, 径流量为实测值, 分别按下式计算

$$P = \frac{D}{bL}, \quad M = \frac{V}{bLT} \quad (2)$$

式中, P 、 M 为放水强度及径流强度, mm/min; D 为放水流量, L/min; V 为观测时段内实测径流量, L; b 为某时段内的平均流宽, m; L 为坡长, 为 12 m; T 为取样的时间间隔, min。

3) 土壤剥蚀率与输沙率 (D_r 、 T_r)。表征坡面径流对土壤的分离能力, 以单位时间单位面积在水蚀动力作用下被剥蚀的土壤颗粒质量表示, 计算公式为

$$D_r = \frac{M}{bLT}, \quad T_r = \frac{M}{T} \quad (3)$$

式中, D_r 为土壤剥蚀率, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; T_r 为输沙率, g/s; M 为某时段内产沙量, g。

4) 灰色关联度 (r)。表征各因素之间的关联程度, 按照其基本定义, 以 x_i 、 x_j 表示某两个因素, $x_i(t)$ 、 $x_j(t)$ 分别表示反映因素 x_i 、 x_j 变化特性的数据序列, ($t=1, 2, \dots, N$), 其关联度的近似计算公式如下

$$r_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \xi_{ij}(t) \quad (t=1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

式中, r_{ij} 为关联度; N 为数据列长度, $\xi_{ij}(t)$ 为因素 x_j 对 x_i 在 t 时刻的关联系数, 可由下式计算

$$\xi_{ij}(t) = \frac{\Delta_{\min} + k\Delta_{\max}}{\Delta i_j(t) + k\Delta_{\max}} \quad (t=1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

式中, $\Delta_{\min} = \min_j \min_i \Delta_{ij}(t)$; $\Delta_{\max} = \max_j \max_i \Delta_{ij}(t)$;

$\Delta_{ij}(t) = |x_i'(t) - x_j'(t)|$; k 为介于 [0,1] 区间上的灰数, 取其白化值 0.5。数据的标准化处理采用均值变换

$$x_\lambda'(t) = \frac{x_\lambda(t) - \bar{x}_\lambda}{\bar{x}_\lambda} \quad (\lambda=i, j; t=1, 2, \dots, N) \quad (6)$$

式中, $\bar{x}_\lambda = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_\lambda(t)$ 。

2 试验结果及分析

2.1 堆积体坡面产流特征分析

不同放水条件下各时段产流率的观测结果如图 2, 产流开始时刻记为 0。

径流强度随时间的变化具有以下特征:

第一, 径流强度随时间的变化呈增大趋势。下

垫面条件保持相对不变时, 入渗、蒸发等水量损耗因素逐渐趋于稳定, 径流强度逐渐增大;

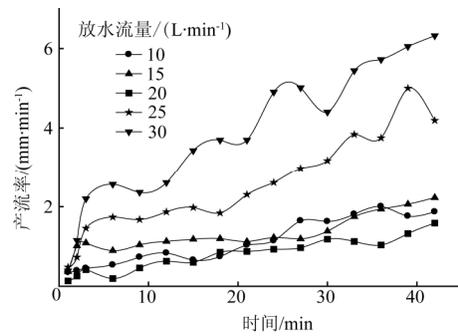


图 2 径流强度随时间变化
Fig.2 Changes of runoff intensity with time

第二, 产流初期, 不同水力条件下的径流强度均有不同程度的跳跃或突变。大流量时 (25、30 L/min) 的突变尤为明显, 跳跃发生在产流后 3 min 内, 也就是面蚀结束沟蚀开始之时, 此时坡面径流的集中效应开始显现, 径流强度增大, 径流冲刷能力陡增;

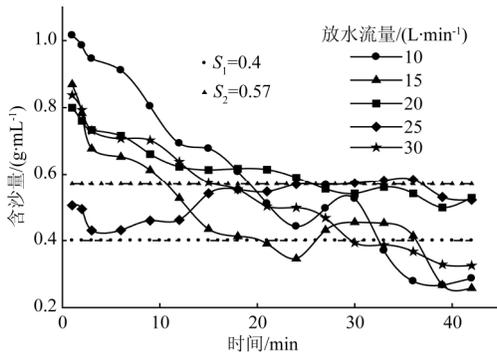
第三, 与降雨产流在产流初期后迅速达到稳定有所不同, 放水条件下的产流过程具有更强的波动性。大流量条件下 (25、30 L/min) 的波动更为显著。根据径流连续理论, 上一断面的产流是下一断面产流的条件, 以保证坡面径流的传递, 对于某一时刻 Δt , 供水率在沿坡长方向上递减, 而在沿坡宽方向的同一断面上却保持相同, 造成的结果是径流强度在沿坡长方向上形成一定的梯度, 而在沿坡宽方向的同一断面上保持相同。因此, 放水条件下的坡面产流是“面产流”的概念; 而降雨产流条件下, 坡面上任一点在同一时刻的供水状况近似一致, 是“点产流”的概念, 这是二者在产流过程中水文现象的重大不同。

2.2 堆积体坡面产沙特征

2.2.1 径流含沙量变化特征

堆积体表土多为废弃的松散土体, 土壤结构体缺失、植物根系及有机质缺乏^[12]、抗冲性差, 极易受到坡面径流的冲刷破坏, 径流含沙量随时间的变化如图 3。

次径流过程中观测到的径流平均含沙量按放水流量的大小依次为 0.61、0.50、0.62、0.52 和 0.55 g/mL, 综合平均为 0.56 g/mL。以悬移质含沙量大于 0.4 g/mL 作为高含沙水流的标准^[13], 试验条件下堆积体坡面流多属于高含沙水流。



注: S_1 、 S_2 为含沙量, g/L。

图 3 径流含沙量随时间变化

Fig. 3 Changes of sediment concentration with time

图 3 显示放水流量为 20 L/min 时的含沙量曲线与 25 L/min 时的含沙量曲线近似关于直线 $S_2=0.57$ g/mL 对称, 该值接近径流含沙量的综合平均值。所以, 平均径流含沙量可以作为反映堆积体土壤侵蚀特征的指标之一。

堆积体坡面径流含沙量的变化过程具有以下特征:

1) 不同放水条件下径流含沙量的变化趋势不同。较小流量时 (10~20 L/min), 径流含沙量随时间呈减小趋势, 在径流过程后期呈波动变化直至接近稳定输沙状态; 中等流量时 (25 L/min), 径流含沙量历经前 3 min 的减小后, 呈现波动增加的特点; 大流量时 (30 L/min), 径流含沙量持续减小。

2) 产流初期径流含沙量随流量的增大而减小, 接近稳定输沙状态时的径流含沙量又随流量的增大而增大。径流过程初期 (产流后的 3 min 内) 以水流对表层松散物质的搬运作用为主, 水流的动力作用并未充分体现; 径流过程稳定后, 以径流克服土壤颗粒阻力的做功过程为主, 泥沙主要来源于水流对土壤颗粒的分散及机械破坏, 随流量的增大径流动力作用的优势逐渐显现: 径流动力与土壤相互作用的动态过程形成了上述径流含沙量的变化过程。

3) 重力侵蚀是导致坡面高含沙水流的重要原因, 放水流量由 20 L/min 增大至 25 L/min 时, 随流量的增加不同侵蚀营力的作用对比发生了变化, 径流含沙量的变化趋势发生重大改变, 表明堆积体陡坡土壤侵蚀过程中重力的作用存在水力临界条件, 试验条件下水力作用与重力作用达到相对平衡的临界放水流量可能在 20~25 L/min 之间; 径流含沙量的波动多由崩塌现象引起, 较大流量时崩塌现象一般会较早发生, 但其效应也可能会被径流作用所掩盖 (30 L/min)。

2.2.2 坡面产沙过程分析

堆积体平台在暴雨条件下易形成高强度径流对其边坡造成强烈冲刷, 这往往是邻近河流在暴雨

季节含沙量陡增的重要原因。不同放水条件下的产沙过程曲线如图 4。

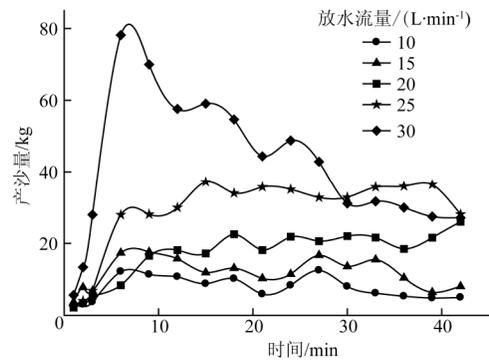


图 4 不同放水条件下的产沙过程

Fig. 4 Process of sediment yield under different discharges

堆积体边坡在试验水力条件下的产沙过程反映了堆积体陡坡的土壤侵蚀特征, 表现出更大的变异性和不确定性, 较之一般意义上的缓坡裸露坡面 (20°) 有明显的不同^[14], 产沙过程大致可以概括为以下几个阶段:

1) 产沙量突变阶段, 随着放水流量的增大, 突变愈加明显。发生在产流后 6 min 内, 期间径流量迅速增加, 径流切应力 τ 迅速增大, 而径流过程初期坡面表层松散物质丰富, 产沙主要动力来自径流侵蚀力, 产沙量陡增。

2) 产沙量的波动变化阶段, 发生在径流过程的 9~30 min, 多为细沟形成后的阶段, 表现为两种相反的趋势, 小流量 (10~15 L/min) 和大流量 (30 L/min) 时表现为波动式减小, 大流量时的波动更为剧烈; 中等流量时 (20~25 L/min) 表现为波动式增加。前者发生在水力与重力的不平衡作用下: 小流量时, 直到径流过程后期才引发重力侵蚀, 泥沙补给作用不明显; 大流量时坡面侵蚀发育迅速, 径流冲刷动力占优势, 重力侵蚀的泥沙补给作用同样被径流作用所掩盖, 随着细沟沟槽的发育和松散物质被剥蚀, 地面物质对泥沙的补给能力下降, 造成产沙量的减少, 形成了产沙量的波动式变化。后者发生在水力与重力相对平衡的作用下, 产沙量的增加多来源于沟壁崩塌的泥沙补给, 同时由于“一次侵蚀, 多次搬运”现象的存在, 产沙量在经历波动增长后达到相对稳定的状态。

3) 产沙量的稳定发展阶段, 细沟发育成熟, 径流侵蚀能力达到稳定, 坡面输沙达到稳定。

由此可见, 由于堆积体陡坡复杂多变的下垫面条件和不同侵蚀营力作用对比的不断发生变化, 造就了堆积体陡坡复杂多变的土壤侵蚀过程。

2.2.3 不同坡段产沙分布规律

试验过程中沿坡长方向以3 m为间距,将12 m长的小区划分为4个断面,用以代表不同坡位,分别以1上坡位(0~3 m)、2中上坡位(3~6 m)、3中下坡位(6~9 m)、4下坡位(9~12 m)表示。试验结束后测量各断面内侵蚀沟的长、宽、深,其断面形状均按矩形考虑^[15],可以近似计算不同坡段内的细沟侵蚀量,计算式如下

$$M_i = B_i \times H_i \times l_i \times \rho \quad (7)$$

式中, M_i 为任一选定坡段内土壤侵蚀量, kg; B_i 为选定坡段内细沟平均宽度, m; H_i 为选定坡段内细沟平均深度, m; l_i 为选定坡段内细沟长度, m; ρ 为土壤干容重, kg/m³。

计算结果如图5所示,不同坡段对坡面侵蚀产沙的贡献不同,整体表现出沿顺坡方向逐渐减小的趋势。较大流量时(25~30 L/min)表现为大幅减小→大幅增加→大幅减小的剧烈波动状态;而中小流量时(10~20 L/min)不同坡段产沙量的变化较为平稳,流量为10 L/min时表现为先增大后平稳减小,流量为15和20 L/min时表现为持续平稳减小。

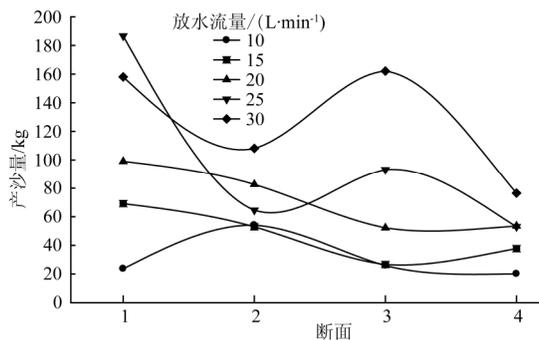


图5 堆积体坡面不同部位的产沙量

Fig.5 Sediment yield on different parts of deposit slope

较大流量时,上坡位径流切应力大,具有最大的剥蚀能力,细沟产沙量达到最大,该坡段沟蚀为主,片蚀所占比例不大;在中上坡位,细沟产生后,随着细沟的增长,径流含沙量迅速增大^[16],形成高含沙水流,径流剥蚀能力急剧下降,沉积现象发生,产沙量减少,该坡段以搬运过程为主,片蚀现象开始增加;在中下坡位,细沟间侵蚀比例进一步加大,细沟两边均有水流汇入沟槽,增加了对细沟的水沙补给,增大了细沟水流对沟床的扰动,径流侵蚀能力增强,并使得沉积的泥沙再次起运,泥沙产出呈增加趋势,该坡段仍以细沟侵蚀过程为主;在下坡位,水流能量进一步减弱,水流被进一步分散,侵蚀形态以细沟间的片蚀占绝对优势,该坡段以细沟的泥沙沉积和细沟间的泥沙搬运过程为主,细沟输沙量减少。

中小流量时,细沟发育相对缓慢,与大流量时的情况相比,随机性和不确定性因素降低,含沙量达到径流挟沙力时,就会出现沉积,沉积现象在任一坡段的细沟产沙过程中均产生重要的影响,形成了产沙量持续稳定的减小过程,由于测量误差较大,放水流量为10 L/min时产沙量的变化,出现了不同于放水流量为15和20 L/min时的特点,理论上这三条曲线应当具有相同的走势。

由上述分析可以看出,各坡段不同的侵蚀形态对不同坡位的产沙量具有重大影响,对土壤侵蚀过程的分析亦不能将其时空变化完全分割开来,二者是相互影响和发展的,在整体把握堆积体坡面土壤侵蚀时空分布格局的基础上,宜对其侵蚀动态进行更深入的研究。

2.2.4 土壤剥蚀率变化特征

土壤剥蚀率包含了细沟间薄层水流的剥蚀率和细沟流的剥蚀率,仅可表征不同水动力条件下土壤剥蚀率的平均情况。计算结果绘于图6。

流量较大(25~30 L/min)时,土壤剥蚀率处于较高的水平,流量较小(10~20 L/min)时,土壤剥蚀率处于较低的水平。

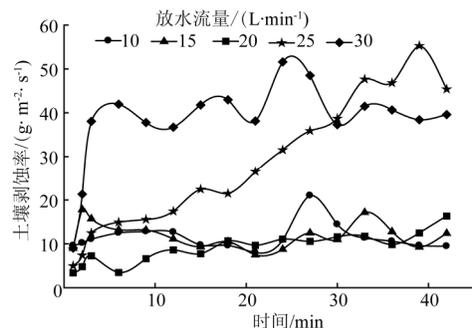


图6 土壤剥蚀率随时间变化

Fig.6 Changes of soil detachment rate with time

不同放水条件下土壤剥蚀率的变化过程有所差异,可能存在以下几个方面的原因:

1) 根据“最小耗能原理”和热力学普遍原则,坡面径流的发育走的是“最小阻力途径”^[17],水流形态与微地形条件始终处于动态的相互作用中,坡面受水面积一旦发生变化,土壤剥蚀率即随之响应。

2) 平均土壤剥蚀率并非水流的净剥蚀率,存在搬运、沉积等动力过程的影响;不同坡段的侵蚀形态存在较大差异,对土壤剥蚀率的贡献不同。

3) 平均剥蚀率的计算依据是各观测时段内的产沙量,因此泥沙来源非常关键,沟壁崩塌现象对产沙量的变化具有较大影响,流量较小时水流作用相对稳定,不足以引起重力侵蚀,沟壁崩塌现象多

出现在径流发育后期，土壤剥蚀率变化较为平稳，仅存在个别突变点。流量较大时，全部侵蚀过程中沟壁崩塌时有发生，随机性强，造成土壤剥蚀率的不规律性变化。

放水流量为 25 L/min 时，重力侵蚀对剥蚀率的贡献较为稳定，放水流量为 30 L/min 时土壤剥蚀率变化的不规律性增强，进一步印证在试验条件下重力作用开始发挥作用的临界放水流量在 25 L/min 附近。

2.3 堆积体坡面水、沙关系

2.3.1 径流强度的数学表达

从水沙过程看，次径流过程中影响径流强度的主要试验参数包括各观测时段内的放水强度、径流量、放水量、产沙量、径流含沙量、流宽及下垫面条件（坡地积水、蒸发、入渗）等，为分析各因子对径流强度影响的重要程度，依次分别计算各因子与径流强度之间的关联度为 $r_1=0.863$ ， $r_2=0.806$ ，

$r_3=0.792$ ， $r_4=0.785$ ， $r_5=0.709$ ， $r_6=0.672$ 。

结果显示放水强度与径流强度具有最显著的相关性，径流量、放水量、产沙量、径流含沙量、流宽对径流强度影响的重要程度依次降低，径流强度可用以下方程描述

$$M=f(P, S)$$

其中， P 为放水强度，反映坡面供水状况； S 为径流含沙量，反映水流对下垫面的作用结果。利用 SPSS16.0 对其进行回归分析，其结果如表 4，建立经验方程如下

$$M = 0.818P - 0.758S - 0.276 \quad (8)$$

$$R^2 = 0.90, n = 80$$

P 、 S 间的偏相关系数为 0.076, $sig=0.503 > 0.05$ ，说明 P 、 S 相关性不显著，证明因子的选取是合理的。 t 检验 $sig < 0.05$ ，说明 P 、 S 对 M 具有显著性影响， F 检验 $sig < 0.001$ ，表明回归方程显著，方程（8）的拟合效果较好。

表 3 径流强度回归分析
Table 3 Regression analysis of runoff rate

自变量	回归系数	均方差	标准化系数	t 值检验	单因子显著性	F 值检验	回归方程显著性	复相关系数 R
P	0.818	1.671	0.910	22.909	<0.001			
S	-0.758	1.687	-0.085	-2.145	0.035	345.745	<0.001	0.949

2.3.2 径流含沙量影响因素及其表达

不同放水条件下影响径流含沙量的主导因素有所差异，小流量（10、15 L/min）时，径流量及输沙率对径流含沙量具有显著影响；放水流量为 20 L/min 时径流量的作用占主导；放水流量为 25 L/min 时，各因素对径流含沙量的影响几乎达到一种平衡，并不存在某单一因素的作用占绝对优势（表 4 仅列出了时间因素），仅从经验描述角度已无法解释径流含沙量变化的原因，可能需从动力学角度对其变化进行理解；大流量（30 L/min）时，

径流含沙量的变化几乎只与时间有关。

表 4 径流含沙量的数学表达
Table 4 Mathematic formulations of sediment concentration

放水流量 / (L·min ⁻¹)	经验方程	样本数	可决系数 R ²
10	$S = -0.0390V + 0.006T_r + 0.756$	$n=16$	0.956
15	$S = -0.015V + 0.003T_r + 0.58$	$n=16$	0.829
20	$S = -0.007V + 0.78$	$n=16$	0.950
25	$S = 0.003t + 0.468$	$n=16$	0.496
30	$S = -0.012t + 0.792$	$n=16$	0.974

表 5 径流含沙量回归分析
Table 5 Regression analysis of sediment concentration

放水流量 / (L·min ⁻¹)	自变量	回归系数	均方差	标准化系数	t 值检验	单因子显著性	F 值检验	回归方程显著性	复相关系数 R
10	V	-0.039	5.279	-0.798	-12.891	<0.001	139.973	<0.001	0.978
	T _r	0.006	14.536	0.361	5.827	<0.001			
15	V	-0.015	8.098	-0.683	-5.565	<0.001	31.549	<0.001	0.911
	T _r	0.003	22.802	0.405	3.303	0.006			
20	V	-0.007	13.275	-0.975	-16.333	<0.001	266.752	<0.001	0.975
25	t	0.003	13.711	0.704	3.710	0.002	13.765	0.002	0.704
30	t	-0.012	13.711	-0.987	-22.706	<0.001	515.567	<0.001	0.987

2.3.3 土壤剥蚀率的描述

土壤剥蚀率的描述可采用以下两种表达方式 $D_r=f(q)$ 或 $D_r=f(b, U)$

其中， q 为单宽流量，代表径流汇集程度； b 为水流宽度，代表径流分散程度； U 为观测时段内的泥沙产出量，表示径流冲刷的作用效果。

建立回归方程如下

$$D_r = 0.693q + 3.97 \quad (R^2=0.781, n=80) \quad (9)$$

$$\ln D_r = 0.671 \ln U - 0.669 \ln b + 0.524 \quad (10)$$

对 (10) 式进行化简, 得

$$D_r = 1.689U^{0.671}b^{-0.669} \quad (R^2=0.799, n=80) \quad (11)$$

式 (11) 所含参数物理意义明确, 与某些模拟

降雨条件下基于径流含沙量建立的土壤剥蚀率方程有所不同^[18], 表明放水条件下堆积体坡面陡坡土壤侵蚀过程较之于降雨条件下缓坡 (15°) 土壤侵蚀的差异性。

t 检验表明所选因子对土壤剥蚀率有显著性影响, *F* 检验表明回归方程显著, 证明回归方程的合理性。

表 6 土壤剥蚀率回归分析
Table 6 Regression analysis of soil detachment rate

方程	自变量	回归系数	均方差	标准化系数	<i>t</i> 值检验	单因子显著性	<i>F</i> 值检验	回归方程显著性	复相关系数 <i>R</i>
(9)	<i>q</i>	0.693	18.023	0.884	16.694	<0.001	278.704	<0.001	0.884
(10)	$\ln U$	0.671	0.87	0.849	16.419	<0.001	152.640	<0.001	0.894
	$\ln b$	-0.669	0.442	-0.43	-8.321	<0.001			

2.3.4 径流量与产沙量间的关系

如图 7, 各观测时段内的产沙量与径流量存在显著的相关关系。

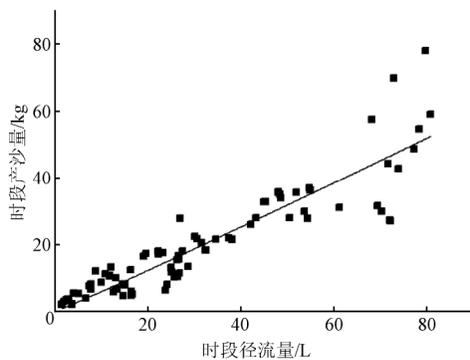


图 7 时段产沙量与时段径流量的关系

Fig.7 Sediment yield versus run-off in different time-intervals

$$U = 0.5548I^{1.036} \quad (R^2=0.822, n=80) \quad (12)$$

F 检验 *sig*<0.001, 回归方程显著。

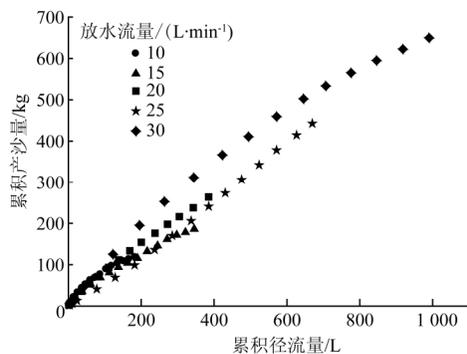


图 8 累积产沙量与累积径流量的关系

Fig.8 Accumulated sediment yield versus accumulated run-off

不同放水条件下累积产沙量与累积径流量存在显著的相关关系, 回归分析结果如下

$$U_s = 0.687Q + 6.123 \quad (R^2=0.975, n=80) \quad (13)$$

式中, U_s 为累积产沙量, kg; Q 为累积径流量, L。

F 检验 *sig*<0.001, 回归方程显著。

方程 (12)、(13) 的结果连同其他某些结论^[6]表明, 堆积体陡坡的产沙量与径流量存在显著的线性关系; 作为水土保持理论的精髓, 坡面径流调控依然是工程建设区水土保持综合治理措施集成的主攻方向和基本目标。按照工程堆积体“平台—陡坡”的结构划分, 在平台拦、蓄径流, 避免上方来水对陡坡的直接冲刷; 在陡坡划分若干小单元, 对上方来水做好截、疏、导、排工作, 使坡面径流尽可能分散, 各径流分散单元同时辅以生物措施, 实现坡面径流泥沙综合调控的目的。简言之, 即把堆积体的后续管理视为与施工建设同等重要的系统工程来掌握, 其水土保持效益会得到立竿见影的体现。

3 结 论

本文通过野外放水试验, 对高速公路沿线典型工程堆积体陡坡在模拟径流冲刷条件下的土壤侵蚀过程进行了研究, 得出的主要结论如下:

1) 放水条件下坡面的“面产流”方式较之降雨条件下的“点产流”方式有所差异, 径流强度的变化更为剧烈; 径流强度与放水强度及径流含沙量之间存在多元线性关系, 随放水流量的增大, 径流强度受时间的影响趋于显著。

2) 重力侵蚀对径流含沙量的变化有重要的贡献, 试验条件下重力作用开始发挥重要影响的临界放水流量在 20~25 L/min 之间; 随放水流量的增加径流含沙量的影响因子由以径流量、输沙率为主转向以时间为主, 其定量关系均可用线性函数进行表达, 平均径流含沙量可以作为反映堆积体侵蚀特征的指标之一。

3) 堆积体坡面产沙过程存在产沙量的突变、波动变化及稳定发展 3 个阶段; 面蚀及细沟侵蚀的

分布对不同坡段的产沙量有重要影响,不同坡段产沙量的空间分布特征随放水流量的增大出现持续平稳减小、震荡式波动衰减2种变化形式。

4) 土壤剥蚀率随放水流量的增加呈现波动式的变化,与单宽流量间存在线性关系,与时段产沙量及流宽呈幂函数关系;各观测时段内的产沙量与径流量呈幂函数关系,累积产沙量与累积径流量之间呈线性关系。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 陈奇伯, 黎建强, 王克勤, 等. 水电站弃渣场岩土侵蚀人工模拟降雨试验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 1—4.
Chen Qibo, Li Jianqiang, Wang Keqin, et al. Artificial rainfall research of rock and soil erosion on dumping pile in the hydropower station[J]. Journal of soil and water conservation, 2008, 22(5): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [3] 杨成永, 王鹏程. 秦沈客运专线路堤边坡土壤侵蚀预报研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 14—16.
Yang Chengyong, Wang Pengcheng. Prediction of soil erosion on embankment slope of Qinhuangdao-Shenyang special line for passenger trains[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2001, 15(2): 14—16. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李忠武, 蔡强国, 吴淑安, 等. 内昆铁路施工期不同下垫面土壤侵蚀模拟研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 5—8.
Li Zhongwu, Cai Qiangguo, Wu Shu'an, et al. Simulation study on soil erosion of different underlying surface in construction period of Nei-Kun Railway[J]. Journal of soil and water conservation, 2001, 15(2): 5—8. (in Chinese with English abstract)
- [5] 周佩华, 郑世清, 吴普特, 等. 黄土高原土壤抗冲性的试验研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 47—58.
Zhou Peihua, Zheng Shiqing, Wu Pute, et al. The study on anti-scourability of soil in Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1997, 4(5): 47—58. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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)
- [7] Harbor J. Engineering geomorphology at the cutting edge of land disturbance: Erosion and sediment control on construction sites [J]. Geomorphology, 1999, 31(1): 247—263.
- [8] 张科利, 张竹梅. 坡面侵蚀过程中细沟水流动力学参数估算探讨[J]. 地理科学, 2000, 20(4): 326—330.
Zhang Keli, Zhang Zhumei, Prediction of hydraulics of rills in erosion processes on hillslope [J]. Scientia Geographica Sinica, 2000, 20(4): 326—330. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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)
- [10] 柳玉梅, 张光辉, 李丽娟, 等. 坡面流水动力学参数对土壤分离能力的定量影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 96—99.
Liu Yumei, Zhang Guanghui, Li Lijuan, et al. Quantitative effects of hydrodynamic parameters on soil detachment capacity of overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(6): 96—99. (in Chinese with English abstract)
- [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] Gilley J E, Gee G W, Bauer A, et al. Runoff and erosion characteristics of surface-mined sites in Western North Dakota [J]. Trans. Am. Soc. Agr. Eng., 1977, 20(4): 697—700, 704.
- [13] 许炯心. 黄土高原的高含沙水流侵蚀研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(1): 28—35.
Xu Jiongxin, Erosion and sediment yield of hyperconcentrated flows on Loess Plateau[J]. Journal of soil and water conservation, 1999, 5(1): 28—35. (in Chinese with English abstract)
- [14] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究[J]. 水利学报, 2010, 41(7): 870—875.
Wu Shufang, Wu Pute, Song Weixiu, et al. Study on the outflow processes of slope regulated by works and its effects on overland flow and sediment reduction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(7): 870—875. (in Chinese with English abstract)
- [15] 丁文峰, 李勉, 张平仓, 等. 坡沟系统侵蚀产沙特征模拟试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 10—14.
Ding Wenfeng, Li Mian, Zhang Pingcang, et al. Experimental study on the sediment yield characteristics in slope-gully system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(3): 10—14. (in Chinese with English abstract)
- [16] 雷廷武, 张晴雯, 赵军, 等. 确定陡坡细沟侵蚀含沙量的解析方法[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 5—8.
Lei Tingwu, Zhang Qingwen, Zhao Jun, et al. Analytic method for computing sediment concentration in eroding rills on steep slope [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2001, 17(6): 5—8. (in Chinese with English abstract)

- [17] 白清俊, 马树升. 细沟侵蚀过程中水流跌坑的发生机理探讨[J]. 水土保持学报, 2001, 15(6): 62—65.
Bai Qingjun, Ma Shusheng. Mechanism of flow drop pit forming during process of rill erosion over slope[J]. Journal of soil and water conservation, 2001, 15(6): 62—65.(in Chinese with English abstract)
- [18] 尚佰晓, 王莉, 王瑄, 等. 坡面土壤剥蚀率及其与水流含沙量的关系研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 28—31.
Shang Baixiao, Wang Li, Wang Xuan, et al. Study on Soil detachment rate and relationship with flow sediment load with REE tracing method [J]. Journal of soil and water conservation, 2009, 23(2): 28—31.(in Chinese with English abstract)

Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope under simulated runoff conditions

Zhang Letao¹, Gao Zhaoliang^{1,2*}, Li yonghong^{1,2}, Tian Hongwei³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yang ling 712100, China; 3. College of Resource Environmental Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Deposits during the process of engineering construction have unique soil constitution and complex conditions of underlying surface, characterized by weaken anti-scourability attributed to loose textures, lacks of soil structures, insufficient plant roots, soil organic matter deficiency and so on. Erosion response of steep deposit slope to hydrodynamic conditions show different characteristics, a set of field pouring water scouring experiments were conducted on steep slope with 72.7% gradient and 12-meter length of typical spoil ground along the line of freeway to investigate the soil erosion process of deposit slope under simulated runoff conditions. Watering system consists of a diving pump, a water knockout vessel, a still well, valves, switches and pressure pipes. During the process of each experiment, the slope was divided into 4 sections by 3-meter-intervals down slope, where flow velocities, flow widths and flow depths were measured by the method of dye tracing and the use of thin steel rule during sampling. The runoff and sediment sample was taken at 1-minute-intervals within 3 minutes after runoff initiates, where after, the sample was taken at 3-minute-intervals, and in the whole experiment all the runoff and sediment were collected. The results show that runoff intensity is closely related to discharge intensity and sediment concentration, presenting multivariate linear correlation by grey correlation degree analysis and correlation analysis of various factors influencing runoff intensity, which can be expressed as follows: $M=0.818 P-0.758S-0.276$ ($R^2=0.90$), indicating that discharge intensity has a positive effect on runoff intensity, on the contrary, the sediment concentration has a negative effect on runoff intensity. Gravitational erosion caused by ascending sediment concentration during erosion process has large influence on the variation of sediment concentration, which has a critical discharge of inflow under test conditions with 20L/min and 25L/min. The process of slope sediment yield falls into three stages: abrupt, fluctuation and stable, and spatial distribution of sediment yield along different slope profiles under different runoff conditions can be reduced to two types: steady decrease and violently fluctuating reduction. Soil detachment rate is linearly related with unit discharge ($Dr=0.693q+3.97$, $R^2=0.781$), which can also be expressed as the power function of sediment yield and flow width in different time-intervals ($Dr=1.689U^{0.671}b^{-0.669}$, $R^2=0.799$). Moreover, sediment yield in any time-interval can be described with power function of run-off in the same time-interval ($M=0.5548V^{1.036}$, $R^2=0.822$) and accumulative sediment yield increases linearly with the increase of cumulative run-off ($Us=0.687Q+6.123$, $R^2=0.975$). The results indicated that Soil erosion characteristics of steep deposit slope formed by engineering construction activities are distinct from that of conventional agricultural soils, indicating that soil erosion researches on production and construction areas should be carried out on the basis of clarifications of disturbance and intensity. The conclusions reveal that regulation of slope runoff is still an important approach to achieve comprehensive control of soil erosion on engineering and construction areas.

Key words: soil, erosion, runoff, engineering accumulation, loess hilly region, steep slope