

降雨冲刷下黄土堆填边坡土水参数变化规律

张座雄^{1,2}, 刘兴荣^{1*}, 王之君³, 黄金燕¹, 马彦杰^{1,3}

(1. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 兰州 730000; 2. 中国建筑第四工程局有限公司, 广州 510665;
3. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050)

摘要: 黄土区城市工程建设产生了大量黄土堆填边坡, 因其结构松散, 缺乏必要防护, 水土流失严重。该研究基于野外调查, 设计室内堆填边坡降雨冲刷模型试验, 分析其侵蚀破坏过程中含水率和基质吸力的响应变化规律, 结合水土动力学原理, 分析了降雨切沟侵蚀阶段沟坡坍塌破坏机理, 并揭示了坡度对侵蚀产沙量的影响。结果表明: 1) 随坡度增大, 坡顶含水率饱和和速率加快, 边坡基质吸力响应速率先增后减, 且在 40° 范围内响应速率最快, 在此坡度附近需更加注重坡面防护和坡脚排水。2) 切沟侵蚀阶段, 沟坡坍塌破坏为水力-重力复合侵蚀过程, 且坡度越大, 越容易达到临界破裂角, 沟坡重力侵蚀现象越普遍。3) 黄土堆填边坡在极端降雨条件下, 其临界坡度在 41° 附近。该研究成果可为黄土区工程堆积体的地质灾害防治及水土流失综合治理提供理论支持。

关键词: 边坡; 降雨; 侵蚀; 黄土堆填; 土水参数; 切沟; 临界坡度

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305167

中图分类号: P628.8

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-23-0075-10

张座雄, 刘兴荣, 王之君, 等. 降雨冲刷下黄土堆填边坡土水参数变化规律[J]. 农业工程学报, 2023, 39(23): 75-84. doi:

10.11975/j.issn.1002-6819.202305167 <http://www.tcsae.org>

ZHANG Zuoxiong, LIU Xingrong, WANG Zhijun, et al. Change characteristics of soil and water parameters of loess landfill slopes during rainfall scouring[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(23): 75-84. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305167 <http://www.tcsae.org>

0 引言

近年来, 随着“一带一路”“西部大开发”等国家战略的大力推进, 黄土高原的城市化进程加快, 城市用地需求增加, 但黄土区以沟壑丘陵为主, 地形破碎, 沟道纵横, 严重制约了当地的城市建设与经济发展^[1]。为拓展城市空间, 诸多城市进行了平山造地工程, 如延安新区、兰州新区等。在工程实施过程中, 黄土弃渣通常沿沟堆积, 形成数量较多、面积较大的黄土堆填边坡。该类边坡主要由黄土构成, 伴有少量碎石及渣体, 一般结构松散、植被覆盖低, 属低压实度的工程堆积体, 易被降雨侵蚀, 已成为城市水土流失的重要来源之一^[2]。

黄土工程堆积体已成为土壤侵蚀领域的研究热点之一。陈卓^[3]通过模拟黄土堆积体不同浓度含沙水流冲刷过程, 发现坡面产流产沙率及其波动性随放水流量、坡度的增大而增大; 张乐涛等^[4]通过野外试验模拟了 36° 工程堆积体坡面冲刷侵蚀过程, 得出水流剪切力、水流功率及径流动能与土壤剥蚀率具有良好的线性关系的结论; 牛耀彬等^[5]研究了不同降雨强度与上方来水组合分

析堆积体坡面侵蚀特征; 张少佳等^[6]基于 3 个坡度的工程堆积体放水冲刷试验, 表明产沙量坡度之间存在线性正相关关系; 丁亚东等^[7-8]通过室内模拟降雨试验, 得出侵蚀总量与雨强呈正指数关系。王志强等^[9]基于实地测量数据, 表明细沟侵蚀产沙模数与坡长呈幂函数关系; 王睿等^[10]基于室内冲刷试验, 研究了沟头高度和土壤质地对边坡侵蚀产沙量和细沟形态的影响。当前研究主要关注坡度、雨强、冲刷流量、坡长等因子对堆积体产流产沙量的影响规律, 鲜有从坡体内部相关土水参数变化视角出发的研究。而降雨冲刷侵蚀破坏过程中往往伴随着土水参数的改变^[11-13], 定量描述土水参数变化对边坡侵蚀的影响, 对于人工堆填边坡降雨冲刷侵蚀规律及机理研究具有重要的意义。

边坡侵蚀机理是土壤侵蚀的核心问题之一。肖海等^[14]研究了雨滴机械打击和消散作用对土壤团聚体的破坏特征; 李芦嶝等^[15]等综述了国内外片蚀研究现状, 并指出了未来的研究方向; 倪世民等^[16]分析了不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力学特性、侵蚀产沙的定量关系。前人对边坡降雨侵蚀过程中溅蚀、片蚀、细沟侵蚀的机理已有较为深入的研究, 而对切沟阶段的水力-重力复合侵蚀产沙机理研究较少, 开展相关研究可丰富土壤侵蚀理论, 也可为流域侵蚀产沙模型的深化做出贡献。

因此, 本文基于野外调查, 以兰州市区典型黄土堆填场碱水沟为例, 开展室内降雨冲刷模拟试验, 探究降雨冲刷过程中不同坡度土坡内部土水参数变化规律, 并结合水土动力学原理分析边坡切沟侵蚀破坏机理, 以期

收稿日期: 2023-05-18 修订日期: 2023-07-26

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK0903); 甘肃省科技重大专项(23ZDFA009); 甘肃省科学院重点科技研发项目(2023ZDYF-03); 甘肃省重点研发计划项目(20YF8ND141)

作者简介: 张座雄, 研究方向为流域水土保持。

Email: 1781795556@qq.com

*通信作者: 刘兴荣, 研究员, 研究方向为流域水土保持与灾害防治。

Email: 402794885@qq.com

为工程建设及水土流失综合治理提供现实指导与理论支持。

1 研究区及试验方法

1.1 研究区黄土堆填概况

兰州市地处黄土高原,受“两山夹一河”的地形限制,土地严重短缺,为拓展城市用地,缓解人地矛盾,南北两山涌现出大量“平山造地”工程。主城区(主要包括城关区、七里河区、安宁区和西固区)东起桑园峡,西至宣家沟(西柳沟),地域狭长,沟壑发育,面积大于 0.1 km^2 的泥石流沟道共发育105条,其中,72条沟道内有不同程度的人工堆放的渣土,2018年之前工程弃渣场总面积达 4.47 km^2 ^[17],近年来面积有所增长,已成为当前兰州市泥石流沟道中主要的固体物质补给源。在降雨作用下,极易引发并演变为泥石流灾害,不仅对附近居民生命财产安全造成巨大威胁、破坏当地生态环境,还可能沿支沟汇入黄河,输入大量泥沙,影响黄河流域生态健康。

如图1a所示,碱水沟位于城关区青白石,是黄河一级支沟,流域面积约为 1.18 km^2 ,呈“树枝状”,主沟道长度约为 2.41 km ,沟床比降约为 52.06% ,流域高差约为 250 m ,谷坡坡度为 30° 左右,沟谷断面呈“V”字型。碱水沟下游地带主要为侵蚀堆积沟谷地貌,发育有I、II级沟台地,台面高出沟床 $2\sim 10\text{ m}$ 。根据兰州市气象台多年降雨资料,区内多年平均气温为 $10.4\text{ }^\circ\text{C}$,年平均降水量为 293.5 mm ,且多集中于7—9月,占全年降水量的61%以上;最大日降水量为 150 mm ,最大小时降水量为 51.9 mm ,10 min最大降水量为 18.6 mm ,暴雨频率为 1.4 a/次 。近年来,在气候变化和人类活动的影响下,西北地区降雨量呈增大趋势,极端降雨事件频发^[18]。

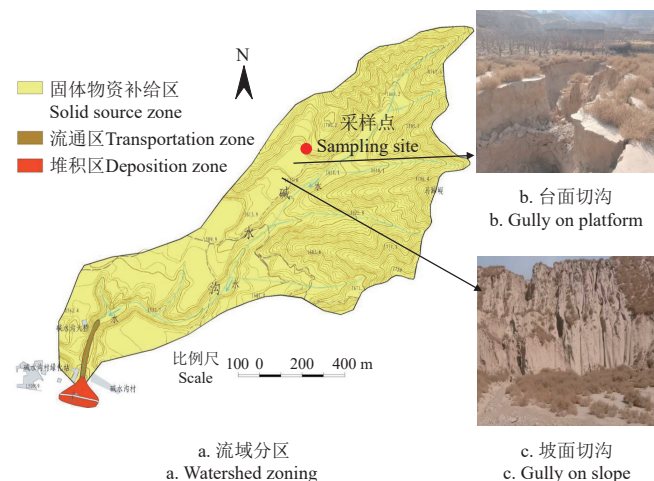


图1 兰州碱水沟流域及黄土堆填边坡

Fig.1 Jianshui gully watershed and loess landfill slope in Lanzhou

沟内受平山造地工程影响,台面破坏较严重,部分地段呈断续状态。平山造地形成的黄土堆填场面积较大(约 0.2 km^2),厚度深($15\sim 40\text{ m}$),坡度在 $30^\circ\sim 45^\circ$ 之间(图1c)。受降雨和周围果园灌溉影响,区内水土流失严重,切沟、落水洞等广泛发育(图1b),若处

理不当,极易引发各类地质灾害。因此,本文以此沟为研究区域,开展黄土堆填边坡降雨冲刷侵蚀破坏相关研究。

1.2 试验方法

为进行土样各项物理力学参数的测定及为模型试验提供充足的土样,选定碱水沟流域一典型黄土堆填边坡($36^\circ 4' 40''\text{N}$, $103^\circ 55' 5''\text{E}$)进行采样,土样总质量约 2 000 kg 。通过筛分法绘制土样的累积级配曲线(图2),经计算,堆填黄土中值粒径 $d_{50}=0.08\text{ mm}$,不均匀系数 $C_u=6$,曲率系数 $C_c=1.0$,级配良好,主要以粉黏粒为主,颗粒较细,易于冲刷侵蚀。环刀法测得土样的密度为 1.38 g/cm^3 ,体积含水率为 6% ,土样各项物理指标如表1。

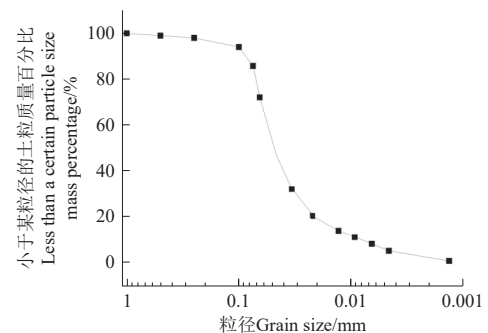


图2 堆填黄土颗粒级配曲线

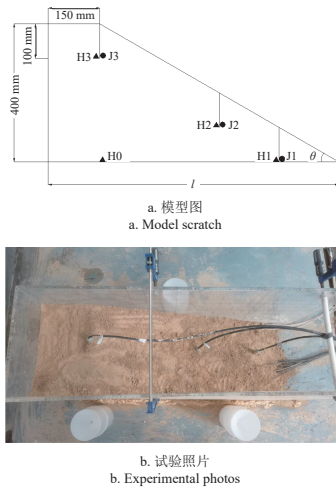
Fig.2 Particle gradation curve of landfill loess

表1 碱水沟堆填黄土物理指标

物理指标 Physical index	数值 Value
初始含水率 Initial water content/%	6
天然密度 Natural density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.38
塑限 Plastic limit/%	16
液限 liquid limit/%	26
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/($\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$)	0.03
饱和含水率 Saturated water content/%	45

人工降雨模拟装置采用甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所研制的静止下喷式降雨装置。降雨装置可通过水泵从蓄水箱内供水,水泵与降雨机通过水管相连,水管装有截水阀门与水压计,通过阀门自由控制降雨强度,水压计实时监测降雨稳定性,四周布有防风帘。为保证土样均匀受降雨冲刷,将模型槽置于降雨装置内,模型槽由 10 mm 厚有机玻璃板组合而成,其内壁净尺寸为 1 000 mm (长) $\times 300\text{ mm}$ (宽) $\times 500\text{ mm}$ (高),为防止箱体变形,于箱体中部、底部各设1处工字夹,在玻璃外壁刻画有边长为 50 mm 的正方形网格,方便观察边坡侵蚀发育情况。

试验前将土样过 10 mm 筛,为便于边坡成型,加水将土样的含水率配制为 15% 左右,然后进行分层夯实、刮毛、修坡处理。为防止水分蒸发,成型后在坡面覆上一层保鲜膜,静置一昼夜(24 h),使边坡充分固结,达到自重应力平衡状态。参照野外堆填边坡坡度范围,试验共设置5组,依次为 25° 、 30° 、 35° 、 40° 、 45° ,边坡模型尺寸见图3。



注：H0-H3 代表坡脚、坡中、坡顶的含水率传感器；J1-J3 代表坡脚、坡中、坡顶的土水势传感器；H0 为坡底含水率传感器； θ 为坡度，($^{\circ}$)； l 为坡长，cm。

Note: H0-H3 stands for water content sensor at the foot, the middle and the top of the slope, respectively; J1-J3 stands for soil water potential sensor at the foot, the middle and the top of the slope, respectively; H0 is the water content sensor at the bottom of the slope; θ is the slope, ($^{\circ}$); l is slope length, cm.

图 3 边坡模型尺寸及传感器位置图

Fig.3 Dimensions of slope model and sensor location

根据研究区的降雨特点，考虑极端降雨条件下降雨强度设为 2 mm/min，拟降雨历时 2 h，视坡面冲刷破坏情况可延长时间。试验开始前，用水准仪对坡面进行校准，并采用雨量筒对降雨强度进行率定，均匀度在 85% 以上开始试验。

通过体积含水率传感器 (GS-3, 1%)、土水势传感器监测 (MPS-2, 0.1 kPa) 记录边坡降雨冲刷侵蚀过程中土水参数响应变化情况。传感器埋设位置如图 3 所示，试验共设置 4 个含水率传感器、3 个土水势传感器。含水率、土水势传感器沿边坡中轴线布设于距坡面 10 cm 处，另增设一组含水率传感器 H0，布设于坡体底部，用于监测雨水是否完全入渗至坡底。为尽量减少传感器导线对坡面侵蚀的干扰，导线采取分类绑扎处理。同时采用高清摄像机 (Pocket 2, 4K) 于正面、侧面双机位记录边坡冲刷侵蚀发育过程。利用 Origin 2017 软件对采集的数据进行制图。

1.3 研究方法

1.3.1 非饱和土抗剪强度理论

本文采用 LU 等^[19]提出的非饱和土抗剪强度计算公式来计算黄土的抗剪强度，该公式将吸应力与 VG 模型结合，并将非饱和土与饱和土抗剪强度计算公式统合在同一计算模型内，得到学界广泛认可^[20-21]，其表达式为

$$s_e = \frac{\theta_1 - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + (\alpha h_1)^n} \right)^m \quad (m = 1 - \frac{1}{n}, 0 < m < 1) \quad (1)$$

$$\sigma^s = s_e h_1 \quad (2)$$

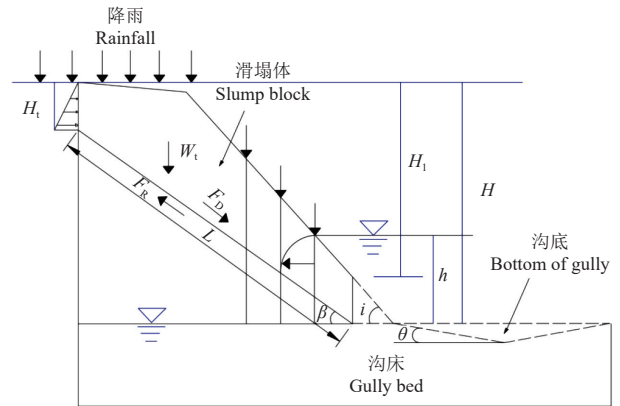
$$\tau_f = (\sigma - \sigma^s) \tan \varphi' + c' \quad (3)$$

式中 s_e 为有效饱和度； θ_1 为体积含水率； θ_s 为饱和含水率； θ_r 为残余含水率； h_1 为水头，kPa； α 为进气值函数的土性参数； m 和 n 为拟合参数； σ^s 为吸应力，kPa； τ_f

为抗剪强度，kPa； σ 为正应力，kPa； φ' 为有效内摩擦角，($^{\circ}$)； c' 为土的有效黏聚力，kPa。

1.3.2 黄土边坡切沟侵蚀模型

为分析黄土边坡水土复合侵蚀发育机理，本文采用王光谦等提出的黄土沟坡重力侵蚀力学模型^[22]中的沟坡下滑力与非饱和土抗剪强度理论进行耦合分析。黄土沟坡重力侵蚀过程，如图 4 所示，降雨条件下崩滑体受到重力 W_i ，其由土体自重与雨水入渗带来的重力增量组成；后缘裂隙对土体产生的裂隙水压力 T ，其大小沿深度方向线性分布；坡脚处的径流剪切力 τ ，其掏蚀坡脚使直立高度增大，同时将沟床展宽，使沟坡稳定性下降；滑动面上的抗滑力 F_R 与土体的抗剪强度参数有关，随含水率发生改变。在上述各力作用下，沟坡超过临界平衡状态发生失稳破坏。



注： H 为坡高，m； H_i 为裂隙深度，m； H_1 为坡高与坡脚直立面的差值； h 为沟内径流高度，m； β 为破裂角，($^{\circ}$)； i 为沟坡原状线与水平面的夹角，($^{\circ}$)； L 为滑动面长度，m； W_i 为滑塌体所受重力，kN； F_D 为沟坡下滑力，kN； F_R 为沟坡抗滑力，kN。

Note: H is the slope height, m; H_i is the fissure depth, m; H_1 is the difference between the slope height and the upright surface at the foot of the slope; h is the height of the runoff in the ditch, m; β is the angle of rupture, ($^{\circ}$); i is the angle between the original line of the ditch slope and the horizontal, ($^{\circ}$); L is the length of the slide surface, m; W_i is the gravitational force exerted on the slide, kN; F_D is the downsiding force of the ditch slope, kN; and F_R is the anti-slide force of the ditch slope, kN.

图 4 沟坡滑塌受力分析图

Fig.4 Analysis of the force of gully slope landslide

1) 沟坡侧向冲刷距离

龚政等^[23]在研究泥沙起动规律时提出的黏性颗粒起动时的切应力表达式：

$$\tau_c = \frac{1}{77.5} \left[31.36(\gamma_s - \gamma_w) d_{50} + \frac{k_b}{d_{50}} \right] \quad (4)$$

式中 τ_c 为起动切应力，N/m²； γ_s 为土体的容重，kN/m³； γ_w 为水的容重，kN/m³； d_{50} 为土体的中值粒径，m； k_b 为常数项，大小为 2.84×10^{-4} N/m²。

沟坡坡脚处土颗粒启动后，受径流切应力作用后继续向下游运移，此时其受到的切应力为^[24]

$$\tau = \gamma_w h J \quad (5)$$

式中 τ 为径流切应力，N/m²； h 为沟内径流高度，m； J 为水力坡降。

此时，对沟坡的横向展宽计算时引入 Osman

公式^[25]:

$$\Delta B = \frac{C_1(\tau - \tau_c)e^{-1.3\tau_c}}{\gamma_s} \quad (6)$$

式中 ΔB 为坡脚处土体在单位时间内受水流侧向侵蚀而后退的距离, m; C_1 为横向冲刷系数, 一般取 3.64×10^{-4} 。

2) 沟坡下滑力

在降雨作用下, 沟坡的下滑力主要由坡面垂直裂隙中的水压力、沟坡土体重力在滑动面上的分力组成。

裂隙水压力 T (kN):

$$T = \frac{1}{2}\gamma H_i^2 \quad (7)$$

式中 γ 为入渗雨水容重, kN/m³; H_i 为裂隙深度, m。

土体重力 W_t (kN):

$$W_t = \frac{\gamma_{wm}}{2} \left[\frac{H^2 - H_i^2}{\tan\beta} - \frac{H_i^2}{\tan i} \right] \quad (8)$$

其中, 由几何关系可知:

$$i = \alpha_1 + \theta \quad (9)$$

$$H_1 = H - \Delta B \tan i \quad (10)$$

$$\beta = 0.5 \times \left\{ \tan^{-1} \left[\left(\frac{H}{H_1} \right) (1 - k^2) \tan(i) \right] + \varphi' \right\} \quad (11)$$

式中 γ_{wm} 为相应于某一土体含水率时的土体容重, kN/m³; H_1 为直立转折面上的沟坡高度, m; i 为沟坡原状线与水平面的夹角, (°); α_1 为沟坡相对于沟床的坡度, (°); θ 为沟床坡度, (°); β 为滑动面与水平面的夹

角, 即破裂角, (°); k 为最大裂隙深度与沟坡高度的比值, 无资料时可取 0.3。

结合图 4, 得沟坡下滑力 F_D (kN):

$$F_D = W_t \sin\beta + T \cos\beta \quad (12)$$

1.3.3 土壤侵蚀产沙理论

采用土壤侵蚀产沙理论, 进行坡度对黄土边坡侵蚀产沙量影响分析。土壤侵蚀产沙模型为^[26]:

$$D_r = K_r(\tau - \tau_c) \quad (13)$$

式中 D_r 为剥蚀率, kg/m²·s; K_r 为土壤可蚀性参数, s/m²; τ 为径流剪切应力, Pa; τ_c 为土的临界抗剪切应力, Pa。其中, 径流剪切力与径流流深呈正相关关系, 本文采用曹文洪^[27] 推导得出径流流深公式:

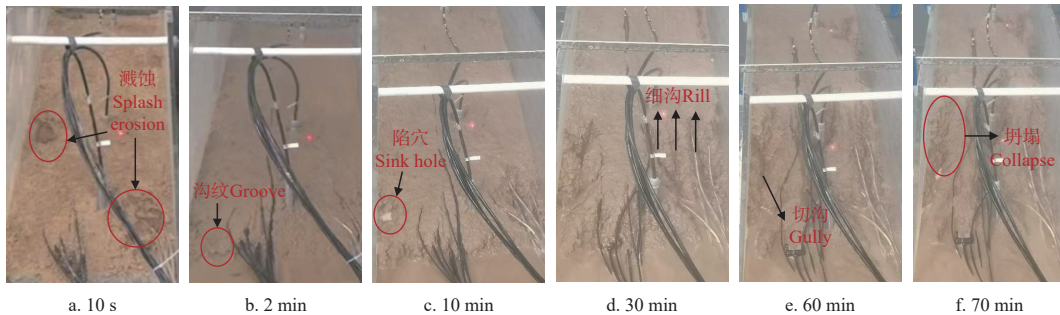
$$h_a = [n_1(R - i_1)l]^{3/5} \frac{\cos^{0.6}\theta}{\tan^{0.3}\theta} \quad (14)$$

式中 n_1 为坡面糙率; R 为降雨强度, cm/min; i_1 为雨水入渗速率, cm/min; l 为坡长, cm。

2 结果与分析

2.1 黄土堆填边坡侵蚀演变过程

不同坡度下黄土堆填边坡坡面侵蚀发育过程大致相同, 以 30° 边坡为例, 如图 5 所示, 边坡侵蚀过程按照侵蚀发育阶段划分为溅蚀、片蚀阶段 (图 5a 和图 5b); 细沟侵蚀阶段 (图 5c 和图 5d); 切沟侵蚀、坍塌破坏阶段 (图 5e 和图 5f)。边坡侵蚀发育阶段与前人研究结果一致^[28-29]。



注: 黑线为传感器导线。
Note: The black wire is the sensor wire.

图 5 边坡侵蚀演变过程 (30°)
Fig.5 Evolution of slope erosion at 30°

降雨开始表现为溅蚀、片蚀阶段, 此阶段持续时间较短, 约为 0~5 min。溅蚀阶段发生在整个坡面, 在雨滴的击溅作用下, 使坡体表土层结构被破坏 (液化), 呈现稀泥化。降雨 2 min, 坡面径流受坡面微结构起伏影响, 被分散且动能小, 因此冲蚀能力较弱, 只能夹带微小土颗粒, 即发生片蚀。片蚀一般只能在坡体表面形成细小的沟纹, 为细沟发育的起点 (图 5b)。

如图 5c 和图 5d 所示, 随着降雨持续汇入, 径流流量不断增大, 其侵蚀能力增强, 于坡面抗侵蚀强度较差处产生小沟状股流, 坡面侵蚀进入细沟侵蚀阶段, 持续

时间为 6~50 min。如图 5c 所示, 降雨 10 min, 径流流经陡坎, 水流紊乱, 侵蚀力增强, 陡坎继续拓展, 形成较明显的侵蚀陷穴。陷穴作为细沟发育的沟头, 以此为基点做放射状延伸形成较明显的细沟。降雨 30 min, 伴随着细沟的发育, 径流进一步汇集, 二者相互促进, 径流的侧蚀与下切能力不断增强, 细沟不断发生溯源侵蚀, 形成数条完整的长沟 (图 5d)。

当坡面侵蚀整体上由面状侵蚀转化为以围绕几条切沟 (主沟) 为主的线状侵蚀, 说明坡面侵蚀进入后期, 即切沟侵蚀、坍塌破坏阶段 (图 5e 和图 5f)。切沟内汇

集的径流具有较大的流量与流速，因此亦被称为表面优势流^[30]，其侵蚀能力极强。如图 5e 所示，主沟两侧土体进行剧烈下切与侧蚀，最深处约 7 cm，最大宽度约 8 cm，断面形态为“V”型。当下切到一定深度后，切沟深度基本稳定，径流主要沿沟壁进行侧蚀，逐渐将沟壁掏空，在重力作用下发生滑塌落入沟底（图 5f），大部分被后续径流冲散、携带于坡脚淤积。

2.2 黄土堆填边坡土水参数变化规律

2.2.1 边坡体积含水率变化

图 6 为不同坡度体积含水率变化图，整体呈先增后降，最后趋于稳定的变化趋势。如图 6a 所示，25°边坡降雨 500 s 后，H3 最先响应，达到峰值含水率 35% 之后，缓慢降低至 25% 并趋于稳定；H1 滞后 H3 约 600 s，其峰值含水率约为 47%，随后缓慢下降稳定至约 45%（土体饱和含水率）；H2 与 H1 几乎同时响应达到约 25%，稳定一段时间后，继续增加至约 50%，这主要是由于侵

蚀后期，坡中细沟发育，径流沿细沟汇流，传感器部分露出导致含水率增加。

如图 6b 所示，30°边坡传感器响应时间 $H3 < H1 < H2$ 。H1 峰值含水率为 60%，此时传感器已部分露出。H3 与 H1 几乎同时达峰，峰值约为 50%，1 000 s 后 H2 开始响应，约在 2 000 s 时达到峰值 40%。2 900 s 后 H0 开始缓慢增加至 47%，这主要是由于重塑黄土边坡湿陷性的不均匀性和随机性，右侧坡顶处发育为较大的落水洞，雨水直接入渗至坡体内部。

如图 6c 所示，约 300 s 后，H1 与 H3 几乎同时响应，峰值含水率分别约为 50%、30%；H2 响应时间滞后 H1、H3 约 300 s，但在 3 000 s 时，其峰值含水率约 70%，表明形成侵蚀细沟且雨水汇流于沟中，随着沟壁的侵蚀坍塌及雨水继续沿深部入渗，H2 处含水率开始缓慢降低。H1 处的含水率后期呈“增加-减少”的波动趋势，表明此处附近土体反复经历“坍塌-溃决”过程。

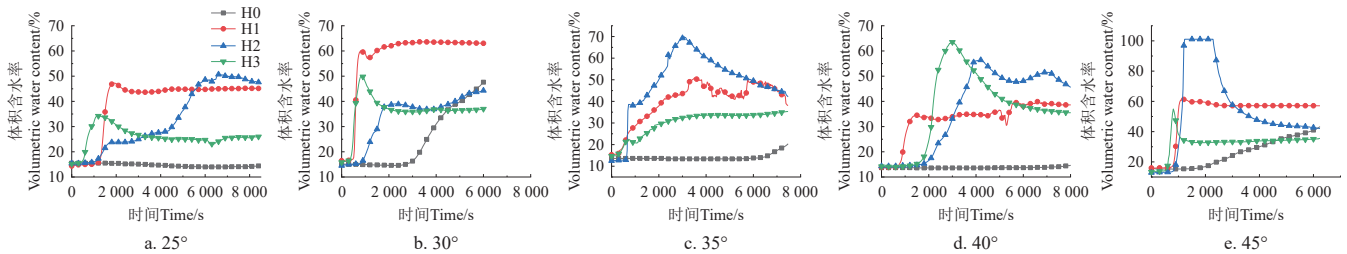


图 6 不同坡度体积含水率响应变化

Fig.6 Variation of volumetric water content at different slopes

如图 6d 所示，40°边坡 H1 最先响应，逐步达到峰值 35%；H2、H3 几乎同时响应，均呈现“单峰”规律，H3 约在 2 500 s 达到峰值含水率 65%，H2 约在 4 000 s 达到峰值含水率 58%。

如图 6e 所示，45°边坡传感器响应时间 $H3 < H1 < H2$ ，峰值含水率分别为 58%、62%、100%，虽各传感器响应间隔时间相对较短，但坡中 H2 已完全暴露，表明此时坡中侵蚀破坏严重。30 min 后，H0 也开始缓慢增加，表明雨水已完全入渗坡体。

试验结果表明：1) 随坡度增加坡面侵蚀程度加剧；

2) 若以含水率超过土体的饱和含水率作为土体破坏标志，则随坡度增大，降雨冲刷侵蚀最先破坏部位由坡底逐渐后移至坡顶。

2.2.2 边坡基质吸力变化规律

图 7 为不同坡度下基质吸力响应变化图。由于黄土基质吸力变化范围广（ $0 \sim 5.0 \times 10^5$ hPa），且达到某一界限含水率后，相应基质吸力快速降低，为直观对比各时间段内基质吸力变化，对吸力值取对数，记为 P_f ，其单位为 hPa。不同坡度基质吸力整体呈先减小后稳定变化趋势。

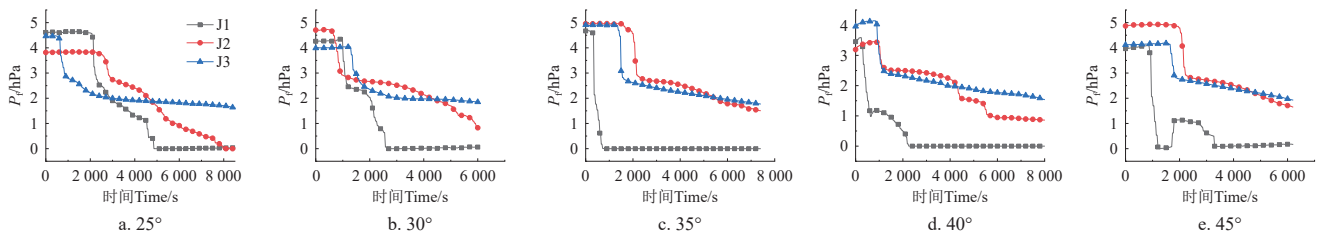


图 7 不同坡度基质吸力（对数 P_f ）响应变化

Fig.7 Variation of matrix suction (its logarithm, P_f) response of substrate at different slopes

如图 7a 所示，25°边坡降雨入渗过程中坡顶 J3 先响应，开始快速降低在 3 000 s 内由 4.5 降至 2，随后坡底 J1 开始响应，在 5 000 s 内由 4.6 降为 0，表明底部土体已完全饱和。对照试验现象，基质吸力传感器已完全暴露，此处土体已被完全剥蚀。随着水分入渗至 J2 附近的

土体含水率开始增加，基质吸力由 3.8 波动下降至 0，产生波动是因为附近坍塌的饱和土体掩埋传感器，导致其下降速率放缓。

如图 7b 所示，30°边坡降雨入渗过程中，坡中的 J2 最先响应，开始快速降低由 800 s 的 4.7 下降至 6 000 s

的0.5,受附近土体微地貌影响,期间下降速率经历了先快后慢再快3个阶段。随后1000s时,J1开始响应,由4.2快速降低,在2500s降为0。J3在1100s开始响应,由4缓慢降低为2。

如图7c所示,35°边坡降雨入渗过程中,300s后,J1最先响应,由4.6迅速降低为0;1500s时,J3开始响应,由4.9缓慢降低至2,J2最后响应,其下降速率快于J3,由4.9下降至1.8。

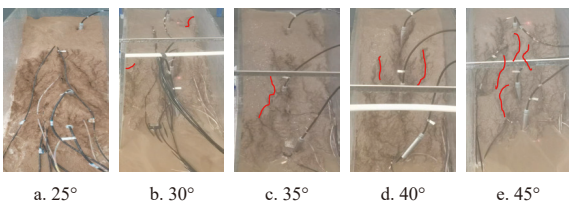
如图7d所示,40°边坡降雨入渗过程中J1快速响应,由4.5迅速降低为0(2300s),J2和J3几乎同时响应,J3最终稳定在2,J2下降速率较快,最终降低为1。此坡度下基质吸力响应速率最快,表明此状态下土体基质势降低最快,土粒间作用力快速减弱,抗侵蚀性降低。

如图7e所示,45°边坡降雨入渗过程中J1先响应,1300s时由4.0下降为0,因为附近大块土体的坍塌掩埋传感器,导致J1增加至1,随后在降雨作用下,3300s时恢复为0。J3由4逐步下降至2,J2最后响应,由4.9以较快速率下降为1.9。

试验结果表明:随坡度增加,基质吸力传感器响应速率先增后减,且在40°附近最快响应,说明随着坡度的增加,边坡的侵蚀速率先增后减。

2.3 切沟阶段坍塌破坏机理分析

由试验现象可知,经过细沟侵蚀阶段、坡面发育出几条主沟(本试验为2~4条),坡面径流以主沟为中心,向周围土体呈线状侵蚀。切沟侵蚀阶段当边坡坡度较大时,还可观察到主沟两侧发生较明显的重力侵蚀(如图8)现象,说明切沟阶段是水力-重力复合侵蚀产沙过程。当前,学界对切沟阶段的水力-重力复合侵蚀过程相关研究相对较少,本节重点讨论该阶段土体的坍塌破坏机理。如图8所示,当坡度在35°以下时,重力侵蚀只在切沟发育后期,切沟内形成较大高差时才偶见;当坡度大于35°时,沟床坡度较大,切沟深,常见沟床重力侵蚀现象。这与前人研究成果相近,杨吉山等^[31]通过野外调查研究,得出桥沟流域的重力侵蚀主要发生在42°以上的陡峭坡面;喻涵等^[32]对极端暴雨下典型小流域的重力侵蚀分布规律进行研究,得出重力侵蚀易发生在30°~50°坡度内。



注:红线为滑动后缘。
Note: Red lines is sliding rear edge.

图8 切沟侵蚀阶段重力侵蚀现象

Fig.8 Gravitational erosion phenomenon in the cut gully erosion stage

基于试验现象对黄土切沟阶段坍塌破坏机理进行分析。如图4所示,当沟坡所受下滑力大于其抗滑力时,

土体便发生坍塌破坏。沟坡下滑力可由式(12)确定,而抗滑力较难确定。因为黄土作为非饱和土体不仅要满足土体本身的应力关系,还受到土体含水率的较大影响。当含水率较低时,由于负孔压的存在,形成较大的基质吸力;当降雨持续入渗土体含水率增加,基质吸力急速下降,同时土的黏聚力也急剧降低,造成土体抗剪强度劣化。当前,黄土的基质吸力与其强度关系是学界的热点问题^[33-34],至今尚未形成统一的认识。本文采用式(3)作为非饱和土抗剪强度,并根据图4所示的几何关系,得出滑动面上的抗滑力:

$$F_R = c'L + (N - \sigma^s L) \tan \varphi' = \frac{(H - H_t)c'}{\sin \beta} + \left\{ W_t \cos \beta - \left[\sigma^s \frac{(H - H_t)}{\sin \beta} \right] \right\} \tan \varphi' \quad (15)$$

式中 N 为滑动面上的法向力,kN; L 为滑动面长度,m; c' 为土的有效黏聚力,kPa;其余量含义同前。

最后,根据极限平衡法,安全系数为

$$F_s = \frac{F_R}{F_D} = \frac{(H - H_t)(c' - \sigma^s \tan \varphi') + W_t \cos \beta \sin \beta \tan \varphi'}{W_t \sin \beta^2 + T \cos \beta \sin \beta} \quad (16)$$

由式(16)可知, F_s 与破裂角 β 呈反比例关系, β 越大,安全系数越小。当 $F_s=1$ 时,沟坡处于极限平衡状态,此时存在临界破裂角 β_0 。将式(9)~式(11)联合可得

$$\beta_0 = 0.5 \times \left\{ \tan^{-1} \left[\left(\frac{H}{H - \Delta B \tan(\alpha_1 + \theta)} \right) (1 - k^2) \tan(\alpha_1 + \theta) \right] + \varphi' \right\} \quad (17)$$

由式(17)可知, β_0 与沟床坡度 θ 成反比,即沟床坡度越大,沟坡越容易达到临界破裂角,因此,越容易发生失稳破坏。这解释了为何边坡坡度越大,切沟侵蚀阶段重力侵蚀现象越常见(图8)。

3 讨论

3.1 坡度对侵蚀产沙量的影响

坡度是影响土壤侵蚀程度的主要地形因素,目前一般认为存在临界坡度^[35],即在此坡度下边坡的侵蚀产沙量最大,因此找出某类边坡的临界坡度,对于坡面防护及水土流失治理都具有重要意义。由式(13)可知,侵蚀产沙量与其所受坡面径流剪切力呈正比,因此可通过径流剪切力间接表征侵蚀产沙量。联合式(5)与式(14)得坡度与坡面径流剪切力的关系式:

$$\tau = \gamma_w h_a J = \gamma_w [n_1(R - i_1)l]^{0.6} \sin^{0.7} \theta \cos^{0.9} \theta \quad (18)$$

由式(18)可求得极大值点 $\theta_c=41^\circ$,即临界坡度,此时径流切应力最大,冲刷能力最强,记为 τ_{max} 。由式

(18)易知,临界坡度与坡面糙率、坡长及降雨强度与入渗率的差值有关。宋朋燃^[36]通过能量法对辽西黄土边坡降雨破坏临界坡度进行研究,得出其范围在36.5°~44°之间,这与本研究结论相近。

通过径流切应力与其最大切应力相除进行归一化处理,得到坡度与侵蚀产沙量的关系图9。如图9所示,

当边坡坡度由 25° 逐渐增加至 41° 附近时，坡面径流剪切力逐渐增强，产沙量逐渐变大；当坡度大于 41° 时，径流剪切力下降，坡面侵蚀产沙量逐渐降低。这可能也是基质吸力（图 7）在 40° 附近响应速率加快的原因：即在此坡度范围内坡面径流剪切力最大（记为 τ_{\max} ，单位： N/m^2 ），坡面沟蚀严重，边坡基质吸力响应速率加快。

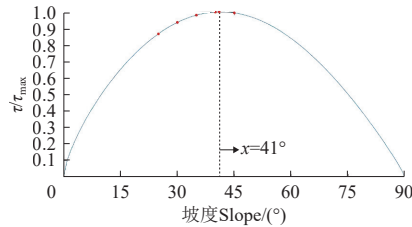


图 9 水流切应力与其最大值的比值 (τ/τ_{\max}) 随坡度变化
Fig.9 Variation of ratio of shear stress to its maximum (τ/τ_{\max}) with slopes

3.2 黄土堆填边坡侵蚀防治措施

堆填黄土边坡具有植被稀疏、压实度低、台面较大等特点，基于此类边坡特点并结合上述研究结果，提出以下侵蚀防治措施：1) 植被护坡：通过多次对兰州碱水沟的野外调查发现，坡度相等时，相较于裸土坡面，有植被覆盖的边坡，其边坡侵蚀程度明显更低。因此，可选择适合当地气候和土壤条件的植被进行种植，能有效减缓雨水对边坡的冲刷侵蚀^[37]。但此措施缺点在于，植被根系生长需一定周期，当植物根系网络尚未完全成型时，若遭遇强降雨，其侵蚀防治效果减弱甚至完全失效^[38]。因此需与其他工程措施相结合，才能发挥其减沙效益。2) 减缓坡度：上述试验结果表明随坡度增大，边坡重力侵蚀程度增大，坡面侵蚀程度加剧，因此，应尽量减缓坡度，可降低坡面侵蚀强度。当放坡场地受限，坡度难以放缓时，可采取分级放坡。3) 分层夯实：黄土堆填边坡结构松散，抗侵蚀能力较弱，可采取分层夯实提升其压实度。为进一步提升其抗冲性，还可在分层夯填过程中添加土工布或秸秆等。4) 排水导流：根据含水率变化规律可知，随坡度增大，边坡侵蚀过程由坡脚向坡顶发育的单向溯源侵蚀演变为由坡底、坡顶同时向坡中发育的双向侵蚀过程。因此不仅要加强坡脚的排水，同时也要注意台面汇集径流的及时导排。同时，坡面径流通常呈泥石流形式，坡脚排水沟若采取明沟形式极易受泥石流堆积堵塞，造成排水失效。因此坡脚宜选取带水沙分离功能的排水沟。5) 加固坡面：对于已经出现严重侵蚀的边坡，可先采取工程加固措施，如土工格栅、护坡等，辅以植被防护，实现水土流失的综合防治。

4 结 论

中国黄土区为拓展城市用地而进行了大量的平山造地工程，由此形成的黄土堆填边坡，在降雨冲刷作用下极易发生侵蚀，水土流失严重。本文通过室内降雨冲刷试验，分析冲刷过程中边坡土水参数响应变化规律，并基于水土动力学原理分析了切沟阶段沟坡水力-重力复合

侵蚀机理及坡度对产沙量的影响，得到以下结论：

1) 在降雨冲刷条件下，随着坡度增大，边坡的基质吸力下降率先增后减，并在 40° 附近下降速率最快。因此，在此坡度范围内更注重坡面防护及坡脚排水处理。

2) 切沟侵蚀阶段，沟坡坍塌破坏为水力-重力复合侵蚀过程，且边坡坡度越大，越容易达到临界破裂角，土体越容易发生失稳破坏，重力侵蚀现象越普遍。

3) 黄土堆填边坡在极端降雨作用下，其临界坡度在 41° 附近，在此坡度下侵蚀产沙量最大。

【参 考 文 献】

- [1] 许强, 蒲川豪, 赵宽耀, 等. 延安新区地面沉降时空演化特征时序 InSAR 监测与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(7): 957-969.
XU Qiang, PU Chuanhao, ZHAO Kuanyao, et al. Time series InSAR monitoring and analysis of spatiotemporal evolution characteristics of land subsidence in Yan'an New District[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(7): 957-969. (in Chinese with English abstract)
- [2] 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.
- [3] 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]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
CHEN Zhuo. Study on Runoff and Sediment and Hydrodynamics Characteristics in the Scour Process of Muddy Water on Slope of Loess Engineering Accumulation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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)
- [5] 牛耀彬, 吴旭, 高照良, 等. 降雨和上方来水条件下工程堆积体坡面土壤侵蚀特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 69-77.
NIU Yaobin, WU Xu, GAO Zhaoliang, et al. Characteristics of soil erosion on engineering accumulation slope under the rainfall and inflow conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2020, 36(8): 69-77.(in Chinese with English abstract)
- [6] 张少佳, 高照良, 李永红, 等. 高边坡工程堆积体产流产沙特性研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 107-110.
ZHANG Shaojia, GAO Zhaoliang, LI Yonghong, et al. Study on characteristics of runoff and sediment yield on steep slope of engineering accumulation body[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 107-110.(in Chinese with English abstract)
- [7] 丁亚东, 谢永生, 景民晓, 等. 轻壤土散乱锥状堆置体侵

- 蚀产沙规律研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 31-36.
- DING Yadong, XIE Yongsheng, JING Minxiao, et al. Study on sediment erosion law of conical scattered spoilbank of light loam[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5): 31-36.(in Chinese with English abstract)
- [8] 戎玉博, 白玉洁, 王森, 等. 含砾石锥状工程堆积体坡面径流侵蚀特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 109-115.
- RONG Yubo, BAI Yujie, WANG Sen, et al. Characteristics of slope runoff erosion on the cone shaped engineering accumulation with gravel[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1): 109-115.(in Chinese with English abstract)
- [9] 王志强, 杨萌, 张岩, 等. 暴雨条件下黄土高原长陡坡耕地细沟侵蚀特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 129-135.
- WANG Zhiqiang, YANG Meng, ZHANG Yan, et al. Rill erosion of long and steep cropland on the Loess Plateau under heavy rainstorm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2020, 36(12): 129-135.(in Chinese with English abstract)
- [10] 王睿, 李鹏, 韩建纯, 等. 沟头高度和土壤质地对细沟溯源侵蚀特征和形态发育的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 91-99.
- WANG Rui, LI Peng, HAN Jianchun, et al. Effects of gully head height and soil texture on headward erosion characteristics and topography evolution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2021, 37(10): 91-99.(in Chinese with English abstract)
- [11] 张健乐, 史东梅, 刘义, 等. 土壤容重和含水率对紫色土坡耕地耕层抗剪强度的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 162-167, 174.
- ZHANG Jianle, SHI Dongmei, LIU Yi, et al. Effects of soil bulk density and water content on shear strength of cultivated-layer in purple soil sloping farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 162-167,174.(in Chinese with English abstract)
- [12] DENG YS, DUAN XQ, DING W, et al. Suction stress characteristics in granite red soils and their relationship with the collapsing gully in south China[J]. Catena, 2018, 171:505-522.
- [13] 史倩华, 王文龙, 郭明明, 等. 董志塬沟头溯源侵蚀过程及崩塌中孔隙水压力变化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 110-117.
- SHI Qianhua, WANG Wenlong, GUO Mingming, et al. Headcut erosion processes and pore water pressure variation on Dongzhi tableland of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(18): 110-117.(in Chinese with English abstract)
- [14] 肖海, 刘刚, 赵金凡, 等. 雨滴机械打击和消散作用对土壤团聚体的破坏特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 827-835.
- XIAO Hai, LIU Gang, ZHAO Jinfan, et al. Characteristics of mechanical impact and slaking effect of rain drops on soil aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(4): 827-835.(in Chinese with English abstract)
- [15] 李芦岷, 吴冰, 李鑫璐, 等. 土壤侵蚀中的片蚀研究综述[J]. 地球科学进展, 2021, 36(7): 712-726.
- LI Ludi, WU Bing, LI Xinlu, et al. Sheet erosion study in soil erosion: A review[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(7): 712-726.(in Chinese with English abstract)
- [16] 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.
- NI Shimin, FENG Shuyue, WANG Junguang, et al. Relationship between rill erosion morphology and hydraulic characteristics and sediment yield on artificial soils slope with different[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2018, 34(15): 149-156.(in Chinese with English abstract)
- [17] 王喜红. 工程弃渣对半干旱区小流域泥石流形成与加剧影响—以兰州市区为例[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- WANG Xihong. Influence of Engineering Slag on Formation and Aggravation of Debris Flow in A Small Watershed in Semi-arid Area- Take Lanzhou Urban Area as Example [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张强, 杨金虎, 王朋岭, 等. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望[J]. 科学通报, 2023, 68: 1814-1828.
- ZHANG Qiang, YANG Jinhua, WANG Pengling, et al. Progress and prospect on climate warming and humidification in Northwest China [J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68: 1814-1828.(in Chinese with English abstract)
- [19] LU N, GODT J. Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions[J]. Water Resources Research, 2008, 44(11): 63-75.
- [20] SHAO Wei, YANG Zongji, Ni Junjun, et al. Comparison of single- and dual-permeability models in simulating the unsaturated hydro-mechanical behavior in a rainfall-triggered landslide[J]. Landslides, 2018, 15(12):2449-2464.
- [21] 孙乾征, 江兴元. 非饱和理论下各因素变化对浅层滑坡影响[J]. 公路, 2020, 65(4): 36-41.
- SUN Qianzheng, JIANG Xingyuan. Influence of various factors on shallow landslide under unsaturated theory[J]. Highway, 2020, 65(4): 36-41.(in Chinese with English abstract)
- [22] 王光谦, 薛海, 李铁键. 黄土高原沟壑重力侵蚀的理论模型[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005(4): 335-344.
- WANG Guangqian, XUE Hai, LI Tiejian. Mechanical model for gravitational erosion in gully area[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005(4): 335-344.(in Chinese with English abstract)
- [23] 龚政, 葛冉, 冯骞, 等. 泥沙颗粒间黏结力作用及其对泥沙起动影响研究进展[J]. 水科学进展, 2021, 32(5): 801-812.

- GONG Zheng, GE Ran, FENG Qian, et al. Cohesive forces between sediment particles and its impact on incipient motion of sediment: A review[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(5): 801-812.(in Chinese with English abstract)
- [24] 陆绍娟, 王占礼, 谭贞学. 黄土坡面细沟水流剪切力及其侵蚀效应研究[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(6): 46-50.
- LU Shaojuan, WANG Zhanli, TAN Zhenxue. Shear stress of rill flow and surface erosion effect on loess hillslope[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(6): 46-50.(in Chinese with English abstract)
- [25] OSMAN A M, THORNE C R. Riverbank stability analysis I: Theory[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1988, 114(2): 134-150.
- [26] 黄钰涵, 杨梦格, 雷廷武, 等. 饱和状态下黄绵土坡面细沟侵蚀可蚀性和临界剪切应力特征[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(17): 83-90.
- HUANG Yuhan, YANG Mengge, LEI Tingwu, et al. Characteristics of soil erodibility parameter and critical shear stress on saturated loess soil slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(17): 83-90.(in Chinese with English abstract)
- [27] 曹文洪. 土壤侵蚀的坡度界限研究[J]. *水土保持通报*, 1993(4): 1-5.
- CAO Wenhong. Slope thresholds of soil erosion[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1993(4): 1-5.(in Chinese with English abstract)
- [28] 郑粉莉, 徐锡蒙, 覃超. 沟蚀过程研究进展[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 48-59, 116.
- ZHENG Fenli, XU Ximeng, QIN Chao. A review of gully erosion process research[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 48-59, 116.(in Chinese with English abstract)
- [29] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊. 细沟发育与形态特征研究进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6818-6825.
- SHEN Haiou, ZHENG Fenli, WEN Leilei. A research review of rill development and morphological characteristics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(19): 6818-6825.(in Chinese with English abstract)
- [30] 姚云琦, 曾润强, 马建花, 等. 考虑优势流作用的降雨入渗边坡可靠度分析[J]. *岩土力学*, 2022, 43(8): 2305-2316.
- YAO Yunqi, ZENG Runqiang, MA Jianhua, et al. Reliability analysis of slope under rainfall infiltration considering preferential flow model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(8): 2305-2316.(in Chinese with English abstract)
- [31] 杨吉山, 姚文艺, 王玲玲. 黄土沟道重力侵蚀规律及机理研究[J]. *人民黄河*, 2014, 36(6): 93-96.
- YANG Jishan, YAO Wenyi, WANG Lingling. Study on the regularity and mechanism of gravity erosion in the Loess Gully[J]. *Yellow River*, 2014, 36(6): 93-96.(in Chinese with English abstract)
- [32] 喻涵, 周子渊, 王一, 等. 极端暴雨下典型小流域重力侵蚀的分布及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(4): 1-6.
- YU Han, ZHOU Ziyuan, WANG Yi, et al. Distribution and influencing factors of gravitational erosion in typical small watershed under extreme rainstorm[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4): 1-6.(in Chinese with English abstract)
- [33] 毕银强, 张茂省, 谷天峰, 等. 非饱和黄土土水特征及其强度指标[J]. *防灾减灾工程学报*, 2018, 38(3): 520-527.
- BI Yinqiang, ZHANG Maosheng, GU Tianfeng, et al. Soil-water characteristics and strength indexes of unsaturated loess[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2018, 38(3): 520-527.(in Chinese with English abstract)
- [34] 王腾, 周茗如, 王晋伟, 等. 黄土塬地区非饱和和结构性黄土的强度特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(S1): 189-197.
- WANG Teng, ZHOU Mingru, WANG Jinwei, et al. Experimental study on strength properties of unsaturated intact loess in loess tableland regions[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(S1): 189-197.(in Chinese with English abstract)
- [35] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土坡面水蚀动力与侵蚀产沙临界关系试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2010, 18(3): 435-441.
- LI Peng, LI Zhangbin, ZHENG Liangyong. Experimental study on the critical relation between water erosion dynamics and soil erosion on steep loess slope[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, 18(3): 435-441.(in Chinese with English abstract)
- [36] 宋朋燃. 黄土边坡冲刷破坏特征及数值模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- SONG Penran. The Erosion Damage Characteristics and Numerical Simulation of Loess Slope[D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [37] 董敬兵, 时鹏, 李占斌, 等. 植被和梯田措施对坡沟系统细沟侵蚀调控作用[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(20): 96-104.
- DONG Jingbing, SHI Peng, LI Zhanbin, et al. Effects of the role of vegetation and terraced measures on the rill erosion in slope-gully system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(20): 96-104.(in Chinese with English abstract)
- [38] 冯兰茜, 王文龙, 郭明明, 等. 根系密度对黄土塬沟头溯源侵蚀产沙和形态演化过程的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(6): 88-96.
- FENG Lanqian, WANG Wenlong, GUO Mingming, et al. Effects of root density on gully headcut erosion and morphological evolution process in gully regions of Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(6): 88-96.(in Chinese with English abstract)

Change characteristics of soil and water parameters of loess landfill slopes during rainfall scouring

ZHANG Zuoxiong^{1,2}, LIU Xingrong^{1*}, WANG Zhijun³, HUANG Jinyan¹, MA Yanjie^{1,3}

(1. Geological Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. China Construction Fourth Engineering Bureau Company Limited, Guangzhou 510665, China;

3. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In recent years, with China's "One Belt, One Road" "Western Development" and other national strategies vigorously promoted, the Loess Plateau's urbanization process accelerated, the demand for urban land increased, but the Loess area is dominated by gullies and hills, the terrain is fragmented, and the ditches are longitudinal and transverse, which seriously restricts the local urban construction and economic development, local urban construction and economic development. In order to expand the urban space, many cities have carried out the project of leveling hills to create land, but during the implementation of the project, loess dumps are usually piled up along the gullies, forming a larger number and area of loess landfill slopes. Therefore, in order to investigate the variation rules of soil and water parameters in different slopes of loess landfill slopes during extreme rainfall, this study, based on the field investigation, took the typical loess landfill-Jianshui gully watershed in Lanzhou urban area (an important node city of Loess Plateau) as an example to carry out the simulation test of indoor rainfall, with the slope gradient of the side slopes set at 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, and the water content and substrate suction rate of the side slopes were recorded at different parts of the side slopes in the process of rainfall. During the rainfall process, the water content and matrix suction change data were recorded at different parts of the slope. In order to analyze the damage mechanism of cut-gully slumping of landfill loess slopes, the theory of unsaturated soil shear strength was coupled with the gravity erosion model of loess gully slopes, and the influence of slope gradient on the erosion and sediment yield of slopes was further analyzed. The results showed that: 1) the development process of rainfall erosion on the loess slope of landfill was divided into three stages (spattering and sheet erosion stage; rill erosion stage; and gully-cutting erosion and collapse damage stage), in which the rill erosion stage lasted for the longest time, and the degree of erosion of the slope surface was intensified with the increase of the slope gradient, and the first damage site of rainfall erosion was gradually moved from the bottom of the slope to the top of the slope, and at the same time the more common phenomenon of the gravitational erosion was at the stage of the gully-cutting. 2) With the increase of the slope gradient, the matric suction strength was increased, the sediment yield was increased. slope increased, the response rate of matrix suction sensor first increased and then decreased, and the fastest responded near 40°, indicating that with the increase of slope, the erosion rate of the slope first increased and then decreased. 3) Through theoretical derivation, we obtained the critical rupture angle for the slope of the fill loess, which was inversely proportional to the slope of the gully bed, i.e., the bigger the slope of the gully bed, the more likely the gully slope reached the critical rupture angle, and the more likely to be destabilized and damaged. The larger the slope was, the more likely to occurred gravity erosion in the gully-cutting erosion stage. However, the critical slope was around 40°, i.e., the runoff shear force was the largest in this slope range, the slope surface was seriously eroded by gully, and the response rate of matrix suction on the slope was accelerated. This may also be the reason for the accelerated response rate of matrix suction near 40°. The research results can provide theoretical support for the prevention and control of geologic hazards and the comprehensive management of soil erosion of engineering accumulations in loess areas.

Keywords: slope; precipitation; erosion; loess landfill; soil-water parameters; gully; critical slope