

王之君,何瑶龄,周兆书.沟谷型沙漠泥流堆积体起动过程中的孔压变化特性[J].中国沙漠,2022,42(5):212-220.

# 沟谷型沙漠泥流堆积体起动过程中的孔压变化特性

王之君<sup>ab</sup>,何瑶龄<sup>a</sup>,周兆书<sup>b</sup>

(兰州理工大学 a.能源与动力工程学院, b.白银新材料研究院,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**以黄河上游宁蒙段典型风水复合侵蚀流域为研究区域,重点针对堆积体堵塞沟道极端条件下的沟谷型沙漠泥流,从堆积体起动成灾的环节入手,开展直槽概化模型试验,并采用基于有效应力原理的流固耦合模型,概化模拟上游暴雨洪水入渗条件下堆积体内孔隙水压力变化特性及其起动过程,从微观角度揭示其成灾机理。结果表明:堆积体起动过程中孔隙水压力与时间呈指数为0.5的幂函数关系;流固耦合作用下堆积体内经历了应力场→体积应变→孔隙率→孔隙水压力→渗流场→塑性应变→屈服破坏的复杂非线性变化过程。

**关键词:**沟谷型沙漠泥流;风水复合侵蚀;流固耦合;孔隙水压力;起动过程

**文章编号:** 1000-694X(2022)05-212-09

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00025

**中图分类号:** TV142

**文献标志码:** A

## 0 前言

泥(石)流是植被发育不良山区常见的自然灾害,是土体在水力侵蚀作用下十分活跃的现代动力学地貌过程<sup>[1-2]</sup>。沙漠流域的泥流灾害则大多为风水复合侵蚀作用的产物。季节交替的风蚀、水蚀过程使得大量风沙土堆积物充填于沟道,并由上游暴雨洪水裹挟起动,形成典型的沟谷型沙漠泥流,乃至演变为泥流灾害,威胁着流域生态系统稳定,一直以来都是干旱、半干旱区土壤侵蚀及水土流失防控研究的热点<sup>[3-6]</sup>。

近年来,以泥沙搬运堆积历史过程反演<sup>[7-9]</sup>、野外观测与遥感分析<sup>[3-6,10-12]</sup>等为主要手段的相关研究,针对以中国北方干旱区和黄河上游“十大孔兑”区域等为代表的沙漠流域在风水交互作用下的泥流灾害过程等方面,取得了诸多有益的成果。Ta等<sup>[5]</sup>基于黄河上游“十大孔兑”高含沙洪水(泥流)过程原型观测数据,通过理论分析,首次明确了该区域风水复合侵蚀诱发泥流灾害的环境因子等,进而从气候、地形等宏观方面揭示了其发生条件。然而,有关其微观角度的发育条件、形成机制及灾害防控等研究,却鲜有报道。

部分学者以山区泥石流为研究对象,采用模型试验等手段<sup>[13-15]</sup>,通过改变试验土体物质组成、沟床坡度、模拟降雨强度等,分析降雨量变化下泥沙颗粒体的稳定性以及初始运动<sup>[16-19]</sup>等,一定程度上揭示了其发生发展的动态机制<sup>[20-21]</sup>,对于研究沙漠泥流微观发生机理而言,具有方法上的可借鉴性。但山区泥石流流体中的细颗粒成分以黄土为主<sup>[22]</sup>,且常夹杂有大石块;而干旱区沙漠沟道中的地表物质组成则为黄土与沙漠粗沙掺混后的堆积物,这种堆积体结构上不但具备黄土颗粒的细观连续性,又具备沙漠粗沙颗粒的突变性。这种非均质且不连续的特征使得流域沟道内的泥流堆积体在水流作用下的失稳破坏模式和运动机理较普通的堆积体有所差异,即常规的堆积体破坏模式很难直接解释沟谷型沙漠泥流堆积体的运动。

鉴于此,本文基于团队前期研究基础,以黄河上游宁蒙河段典型风水复合侵蚀流域为研究区域(图1),重点针对堆积体堵塞沟道极端条件下的沟谷型沙漠泥流,从堆积体起动这一成灾的首要环节入手,通过模型试验和数值模拟等方法,概化模拟上游暴雨洪水入渗条件下堆积体内孔隙水压力变

收稿日期:2022-01-25; 改回日期:2022-02-22

资助项目:国家自然科学基金项目(42167043, 51269009);甘肃省重点研发计划项目(20YF8ND141)

作者简介:王之君(1980—),男,甘肃武威人,理学博士,副教授,主要从事泥沙灾害机理与防治研究。E-mail: wzj1159@163.com

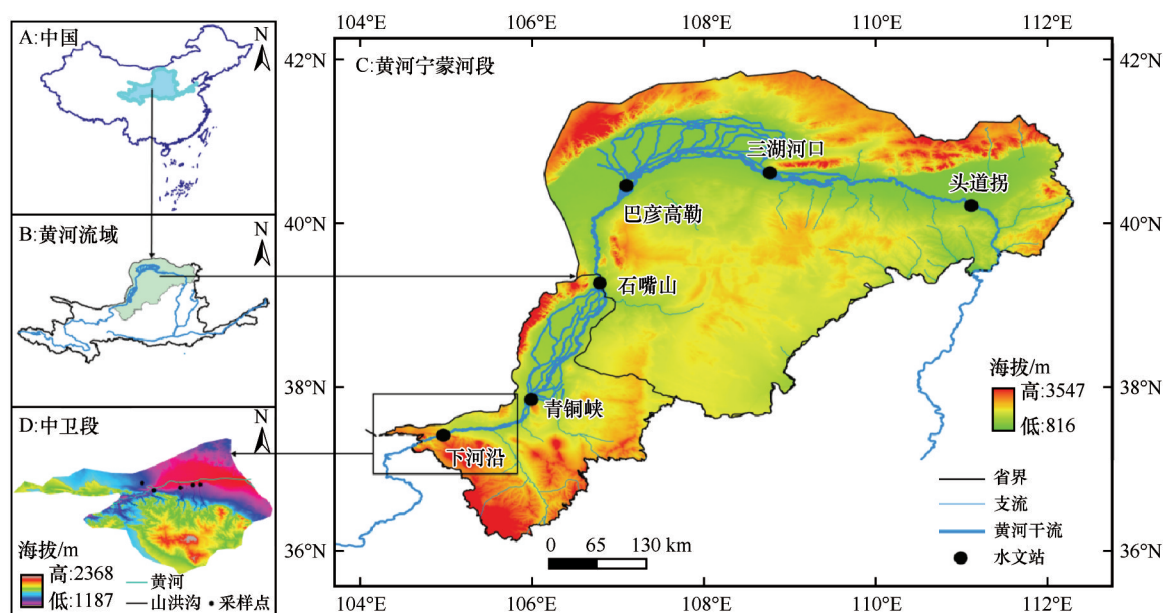


图1 黄河上游宁蒙河段地理位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of geographical location of Ningxia-Inner Mongolia reach in the Upper Yellow River

化特性及其起动过程,以期从微观角度指征其成灾机理,进而为灾害预警、防控奠定理论基础。该区域风蚀水蚀交替,风沙水沙过程剧烈,发育典型的沙漠宽谷,分布着中国乃至世界上地表风水复合侵蚀强度最大的区域<sup>[6,23-24]</sup>,对本研究而言,具有不可替代的地域优势。

## 1 研究区域概况

黄河上游宁蒙段上起下河沿,下至头道拐,全长1 080 km,是沙漠、河流交互演化过程的典型区域。该河段沿岸山洪沟众多,均为狭长型,且大多与黄河垂直相接,沟道内固体物质组成自西向东由黄土向沙漠粗沙过渡,风蚀、水蚀作用的主导地位亦有所差异。风水复合侵蚀诱发的高含沙洪水乃至泥流灾害入黄,严重影响着黄河健康,尤其以“十大孔兑”最为显著,风水复合侵蚀强度比例可达1:1<sup>[6,25-26]</sup>。

本文选取宁蒙河段最西端的中卫段作为主要研究区域。该区域黄河北岸为腾格里沙漠,黄河南岸山洪沟道地势南高北低,固体物质组成以黄土为主,掺混有部分沙漠粗沙。采样分析发现,沙漠粗沙颗粒含量为0—20%,泥流灾害以水蚀作用为主导。冬春两季风力作用搬运沙漠粗沙至沟道底部,与沟道两侧岸坡重力侵蚀滑塌产生的黄土混为一体,或形成新的堆积体,或将历史洪水残留的泥流堆积体加高培厚,形成足以堵塞沟道的沙漠泥流堆积体。雨季来临时,上游暴雨洪水裹挟泥流堆积体

起动,逐渐演变为高含沙洪水乃至泥流灾害。

## 2 研究方法

### 2.1 采样分析

研究区域中黄河南岸四条山洪沟道相对比较顺直。经实地量测,沟道内残留的泥流堆积体形状虽不规则,但总体为梯形;故结合前人工作经验<sup>[27-28]</sup>,最终概化为梯形堆积体开展模型试验;在四条山洪沟道中采集堆积体土样,取样点位置分别为37°27′00″N、105°00′40″E,37°28′25″N、105°09′40″E,37°28′49″N、105°13′43″E,37°29′44″N、105°16′47″E,主要在中游及沟口处;在北岸腾格里沙漠中(37°28′55″N、104°57′28″E)采集沙漠粗沙试样;分析样本主要物理性能指标,作为本文试验和数值模拟中5种工况的设计依据。

### 2.2 模型试验

为精准控制边界条件,便于试验量测起见,将研究区域的顺直沟道概化为直槽,设计制作可变坡度的有机玻璃直槽概化模型试验装置(长2 000 mm、宽300 mm、高300 mm,图2);自制梯形模具,作为堆积体成型的侧限,用以制备顶宽50 mm、高210 mm、上下游坡比均为1:1.4、顺水流底部长度650 mm的试验堆积体。堆积体初始质量含水率经由前期测验设定为满足堆积体成型要求的最小值

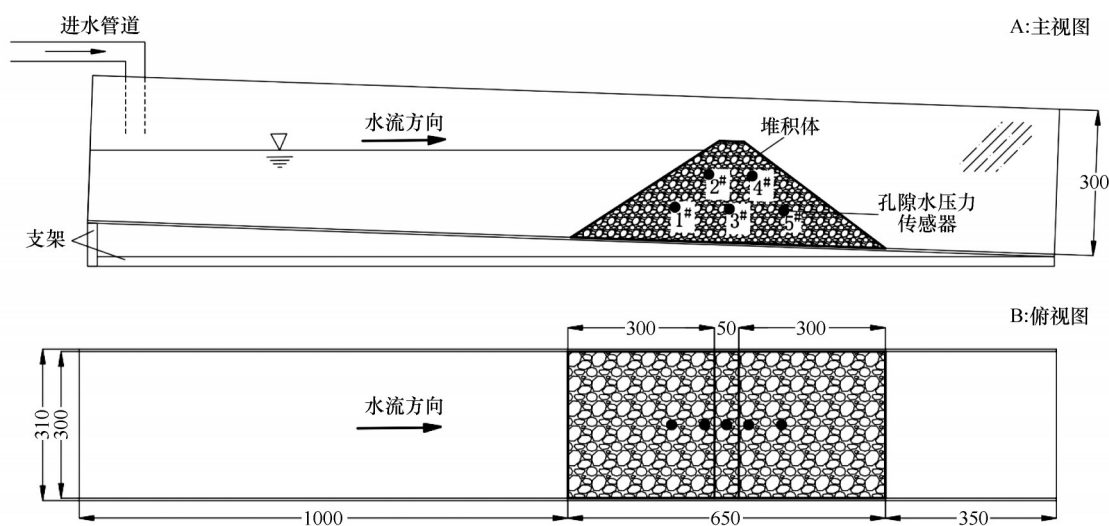


图2 试验水槽装置示意图(单位:mm)

Fig.2 Schematic diagram of the test flume device (unit: mm)

1.3%,用以还原研究区域气候干旱、沟道堆积体初始含水量小的真实物理图景。试验前将土体分3次填入模具,每层厚70 mm,使用木槌夯实,直至达到设计干表观密度(环刀法测定)后停止,拆模并整平处理后开始试验。前期预试验发现,上游来水条件下,堆积体上游坡脚处首先发生入渗,但最终出现位移变形的区域位于下游坡脚处,因此,在试验堆积体内上中下游分别布设了5个DMKY系列应变式孔隙水压力传感器,并配套相应的DM-YB1808动静态电阻应变仪进行孔隙水压力的实时监测。

根据研究区域的土体物质组成将试验工况设为不同质量比例下黄土与沙漠粗沙的混掺物,共5组:沙漠粗沙0掺混、5%掺混、10%掺混、15%掺混、20%掺混。据此开展上游来水条件下的堆积体内孔压特性及起动过程研究。

### 2.3 数值模拟

本文采用基于有限元分析软件ABAQUS 2020中Mohr-Coulomb本构模型<sup>[29]</sup>和有效应力原理的堆

$$R_{mw} = \frac{4(1-e^2)\cos^2\Theta + (2e-1)^2}{2(1-e^2)\cos\theta + (2e-1)\sqrt{4(1-e^2)(\cos\theta)^2 + 5e^2 - 4e}} R_{mc}\left(\frac{\pi}{3}, \varphi\right) \quad (4)$$

式中: $e$ 为 $\pi$ 平面上的偏心率,控制 $\pi$ 平面 $\Theta=0^\circ$ — $60^\circ$ 的塑性势面形状。

反映土体中流固耦合效应的有效应力原理可表达为:

$$\sigma_{ij} = (1-\phi)\sigma_{ij}^s + \phi p_w \delta_{ij} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{ij}^s$ 为固体颗粒之间的应力; $p_w$ 为孔隙水压力; $\phi$ 为孔隙度。

积体流固耦合模型<sup>[30]</sup>,其中,反映土体应力场变化导致破坏的剪切屈服面函数为:

$$F = R_{mc}q - p \tan \varphi - c = 0 \quad (1)$$

式中: $\varphi$ 为 $q$ - $p$ 应力面上Mohr-coulomb屈服面的倾斜角,称为材料的摩擦角, $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ ;  $c$ 为材料黏聚力,kPa; $R_{mc}(\Theta, \varphi)$ 控制屈服面在 $\pi$ 平面上的形状,由式(2)进行计算。

$$R_{mc} = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \varphi} \sin\left(\Theta + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{3} \cos\left(\Theta + \frac{\pi}{3}\right) \tan \varphi \quad (2)$$

式中: $\Theta$ 为极偏角; $\cos(3Q) = r^3/q^3$ , $r$ 是第三偏应力不变量 $J_3$ 。

为避免屈服面尖角导致塑性流动方向不唯一的问题,采用连续光滑的椭圆作为塑性势面,计算式如下:

$$G = \sqrt{(\varepsilon c|_0 \tan \psi)^2 + (R_{mw}q)^2} - p \tan \psi \quad (3)$$

式中: $\psi$ 为剪胀角; $c|_0$ 为初始黏聚力; $\varepsilon$ 为子午面上的偏心率。

网格划分方案采取关键部位加密划分方案,并为了避免积分运算时的“沙漏现象”,选取流固耦合分析中有着较强收敛性的孔压单元CPE6MP。模拟工况分别为:①改变相应于模型试验中5种混掺比例堆积体的密度和渗透性等条件,提取特征点A处的孔隙水压力变化,结合模型试验对所得结果进行分析验证;②设置5种水位上升速率,以堆积体上游



侧水位蓄至堆积体高度的95%为准,分别为10、20、50、80、110 min,用来间接表征降雨强度的变化,通过特征点A处的孔隙水压力变化反映堆积体起动中的孔隙水压力变化特性。

## 2.4 基本假设

为简便计算,本文将水位上升过程中的孔隙水压力近似地看作不同水位作用下的静水压力来计算,可将水位与时间的关系转换为孔隙水压力与时间的关系,再结合试验中的孔隙水压力实测数据进行拟合分析,以验证其正确性。

就水位与时间的关系而言,首先假设堆积体迎水面封闭(不发生渗流),结合上游来水量等试验工况,对得到的数据进行拟合,拟合结果为:

$$h = 9.665 \times 10^{-3} t^{0.5096} (0 < h < h_{\max}) \quad (6)$$

式中: $h$ 为上游的蓄水位高度,m; $t$ 为时间,s。

其次,真实试验现象表明,堆积体前的槽蓄水近似于三角形变化区域 $S$ (图3)。根据堆积体前的汇水面积的几何关系可得:

$$S = \frac{bh}{2} \quad (7)$$

$$Q = qt = SL \quad (8)$$

$$b = \frac{h[\tan \alpha + \tan(\theta - \alpha)]}{\tan(\theta - \alpha) \tan \alpha} \quad (9)$$

式中: $S$ 为上游蓄水截面面积, $m^2$ ; $b$ 为上游蓄水区域长度,m; $Q$ 为上游蓄水量, $m^3$ ; $q$ 为水流流量, $m^3 \cdot s^{-1}$ ; $L$ 为试槽宽度,即堆积体垂直于水流方向上的尺寸,m; $\alpha$ 为试槽与水平面的夹角,即沟道的坡度; $\theta$ 为堆积体坡脚的角度。

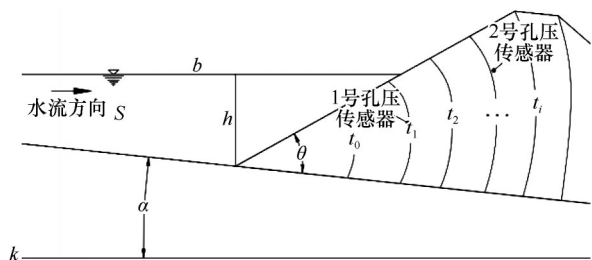


图3 堆积体前水位变化与湿润锋运移示意图

Fig.3 Schematic diagram of water level change and wetting front shift in front of the accumulation body

结合式(7)~(9)可得堆积体前水位与时间变化关系为:

$$h = \left\{ \frac{2q \tan(\theta - \alpha) \tan \alpha}{L[\tan \alpha + \tan(\theta - \alpha)]} t \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

将试验的各项物理参数代入式(10)可得:

$$h = 9.908 \times 10^{-3} t^{\frac{1}{2}} (0 < h < h_{\max}) \quad (11)$$

对比式(6)和式(11)发现,堆积体前所积水位与时间呈幂函数关系。但考虑到实际堆积体入渗时需要消耗部分水量,时间一定的情况下,式(11)得出的水位较小,因此,本文中水位与时间的变化关系可按式(11)表达。

结合式(11)可得孔隙水压力与时间变化关系为:

$$P = \gamma_w h = 0.099 t^{0.5} \quad (12)$$

式中: $P$ 为孔隙水压力,kPa; $\gamma_w$ 为水的容重, $kN \cdot m^{-3}$ 。

## 3 试验结果与模型验证

根据基本假设与试验现象建立堆积体起动中孔隙水压力随时间变化模型(图3)。前期预试验表明,上游蓄水位到达限定水位之前,即 $t_0$ — $t_i$ 的蓄水阶段,湿润锋从上游坡脚处(1#传感器附近)开始,在堆积体内呈圆弧状推进至堆积体中部(2#传感器附近),该阶段孔隙水压力变化最为显著,因此,对5种试验工况下渗流过程中1#、2#孔隙水压力传感器实测变化曲线进行了拟合分析,并对流固耦合数学模型进行验证。

### 3.1 试验结果

两个测点处在5种工况下的孔隙水压力均随时间呈现出先增大,后趋于稳定的变化特性(图4)。拟合结果表明,其变化规律与时间呈指数为0.5的幂函数模型关系,模型系数0.041—0.088,且决定系数 $R^2$ 大于0.709,吻合良好。

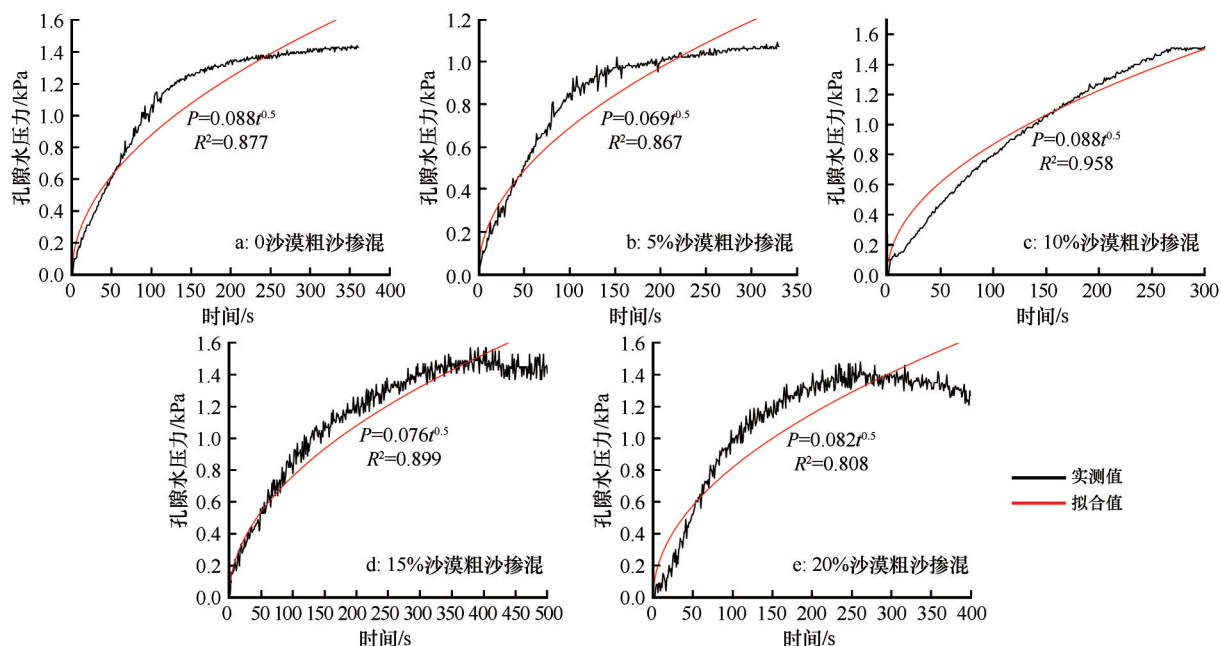
1#测点处的孔隙水压力测量值普遍大于2#测点处,这是由于两个测点处的孔隙水压力传感器埋设高度不同,静水压力、水土压力、内部应力等存在差异。

随着堆积体中粗沙颗粒的增加,渗流过程中孔隙连通性增强,通气孔隙度增大,故较之纯黄土堆积体而言,孔隙水压力达到峰值后率先开始产生下降趋势,而黄土颗粒间因为黏聚力强,孔隙水压力达到峰值后尚有一定的维持稳定的能力。

### 3.2 模型验证

为验证本文所采用的流固耦合模型,开展与模型试验堆积体同尺寸、同工况的数值模拟,并选取上游侧1#传感器附近的A点作为特征点进行孔隙水压力变化特性分析(图5)。

A: 1#孔压传感器



B: 2#孔压传感器

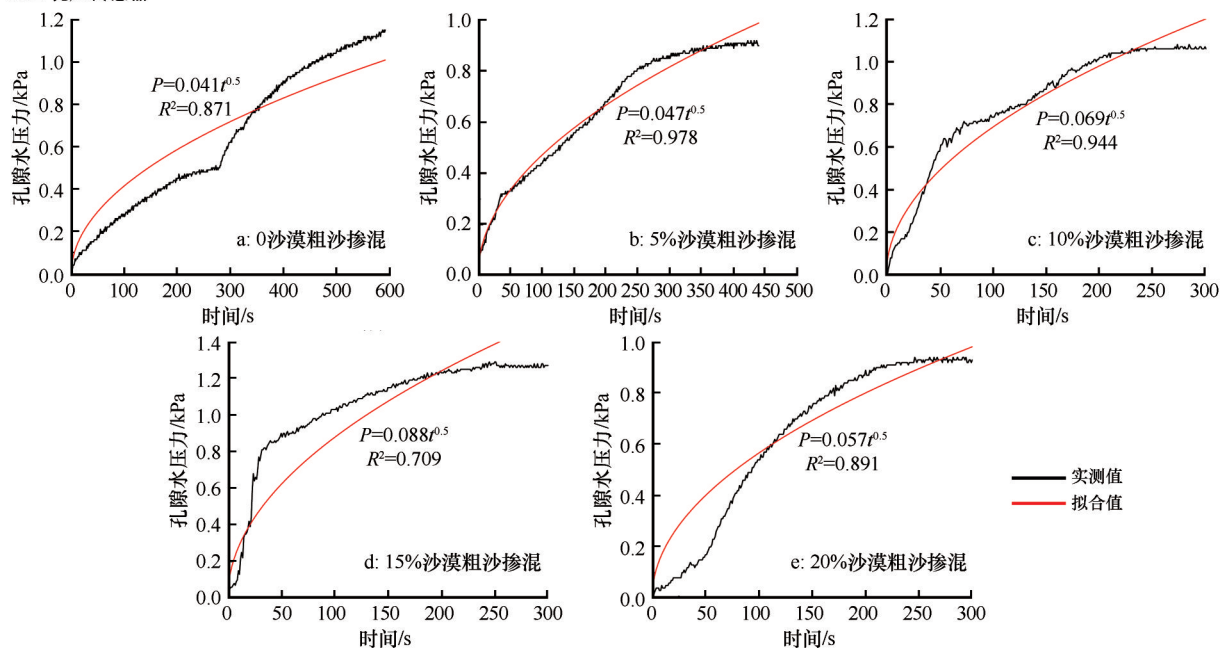


图4 孔隙水压力随时间变化关系

Fig.4 Relationship between pore water pressure and time

孔隙水压力变化特性仍与时间呈现为指数为0.5的幂函数关系,决定系数 $R^2$ 均大于0.843,拟合程度良好,进一步验证了堆积体起动过程中孔隙水压力随时间的幂函数关系模型。再经与模型试验结果对比,模拟值与试验值的拟合结果定量吻合,进而验证了本文所建立的堆积体流固耦合模型的正确性和适用性。

## 4 数值模拟

由于受野外泥石流灾害突发性强、泥石流过程危险度高、观测不便、边界条件复杂、参数量测困难等因素限制,尚无法开展真实沟道中的泥石流堆积体起动试验,故根据野外量测结果,将本文试验条件下的泥石流堆积体尺寸放大10倍,并基于本文采用的流固耦合模型,分析起动过程中孔隙水压力变化特性。

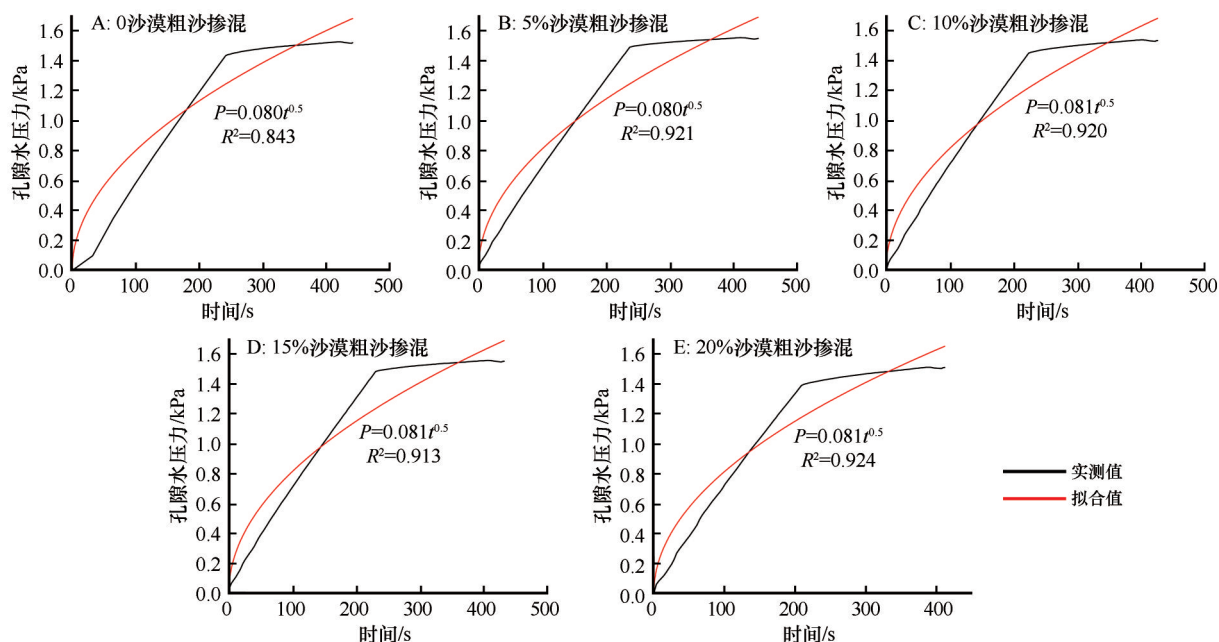


图5 沙漠粗沙混掺工况下特征点A处孔隙水压力随时间变化关系

Fig.5 Relationship between pore water pressure and time at the feature point A (coarse desert sands mixed)

为进一步还原降雨因素对堆积体起动的影响,模拟以堆积体前水位上升速率间接表征上游降雨强度的变化,5种工况如上文所述。提取各工况下A特征点处的孔隙水压力变化曲线,并对曲线进行指数为0.5的幂函数拟合,拟合结果如图6所示。

由图6中的结果可知,孔隙水压力随时间仍呈现出指数为0.5的幂函数递增关系,决定系数 $R^2$ 均

在0.929以上,拟合程度良好。对比5种工况下的孔隙水压力变化过程发现,上游降雨强度大、产汇流过程迅速,堆积体前蓄水位上升速率快,初期水流渗透不够充分,因而孔隙水压力值较小;随着堆积体前水位壅高时间的持续,堆积体前静水压力持续增大,孔隙水压力有增大的趋势,堆积体发生起动破坏的概率变大。

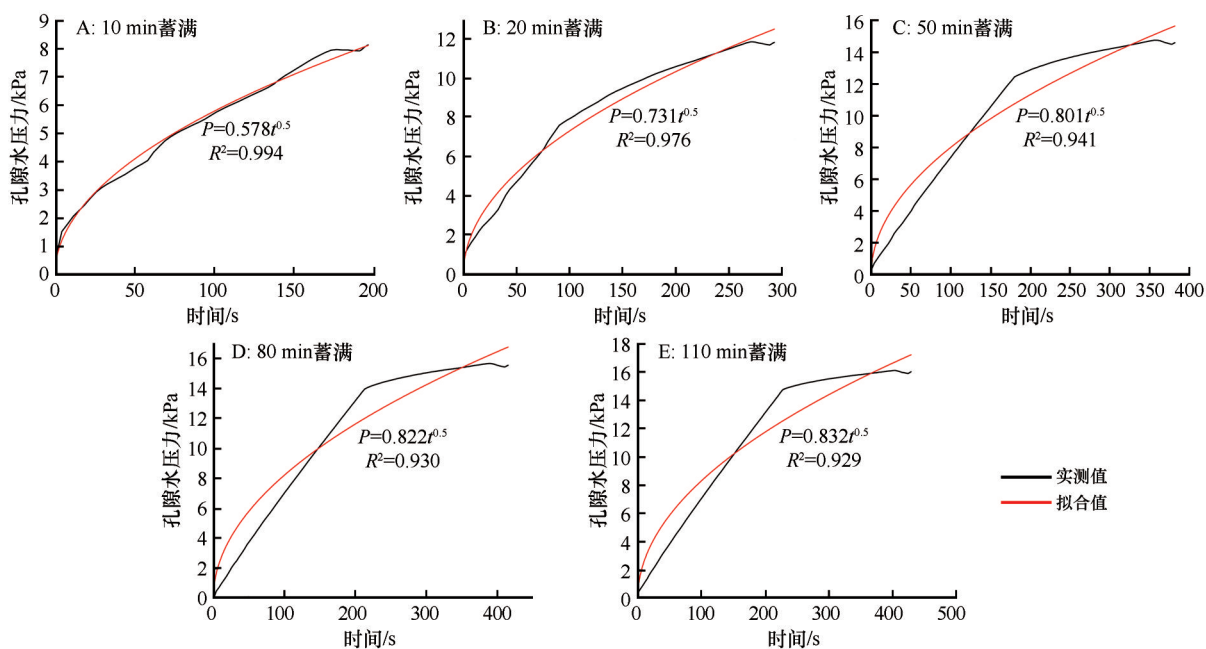


图6 水位上升速率工况下特征点A处孔隙水压力随时间变化关系

Fig.6 Relationship between pore water pressure and time at the feature point A (water level rising rate)



## 5 讨论

沟谷型沙漠泥流的起动是堆积体内渗流作用下孔隙水压力变化导致土体饱和液化,进而破坏失效的复杂非线性过程。王如宾等<sup>[31]</sup>研究了降雨入渗对堆积体变形失稳破坏的影响,认为孔隙水压力是重要的诱发因素,且通过模型试验发现孔隙水压力随降雨强度和时间的增长而增大。除此之外,部分学者<sup>[32-34]</sup>对堆积体的失稳破坏做了大量的研究,均指出孔隙水压力随湿润锋到达后会首先呈现出增大的趋势。本文研究结果与上述学者观点一致,但进一步建立了孔隙水压力增大过程中随时间变化的幂函数模型。

由传感器实测的实时孔隙水压力变化曲线波动剧烈,真实反映了土体应力场与水流渗流场之间复杂的动态耦合响应过程(图4)。图4—6中拟合的

幂函数模型曲线系数变化范围较大(0.041—0.832),笔者初步分析认为,该系数或许综合反映了野外真实沟道中的堆积体型态尺寸、混掺均匀度、复杂地形、水流流态等复杂条件。下一步通过系数拟合优化后的幂函数模型将更加精确地指示堆积体中孔隙水压力的变化特性,本文不再赘述。

左自波等<sup>[35]</sup>通过对多种堆积体土样进行模型试验探究了堆积体的滑坡失稳规律,认为土体颗粒级配对土体破坏模式有显著影响,并指出堆积体湿润锋到达后其孔隙水压力随之增加,达到峰值后稳定,失稳后立即降低。

图7为本文试验过程中1#、2#孔隙水压力传感器记录的全过程变化曲线,结果同样表明,孔隙水压力随时间先增大,直至达到渗流饱和,孔隙水压力达到峰值后趋于稳定,继而迅速减小,反映了堆积体屈服失效后的瞬间起动过程。

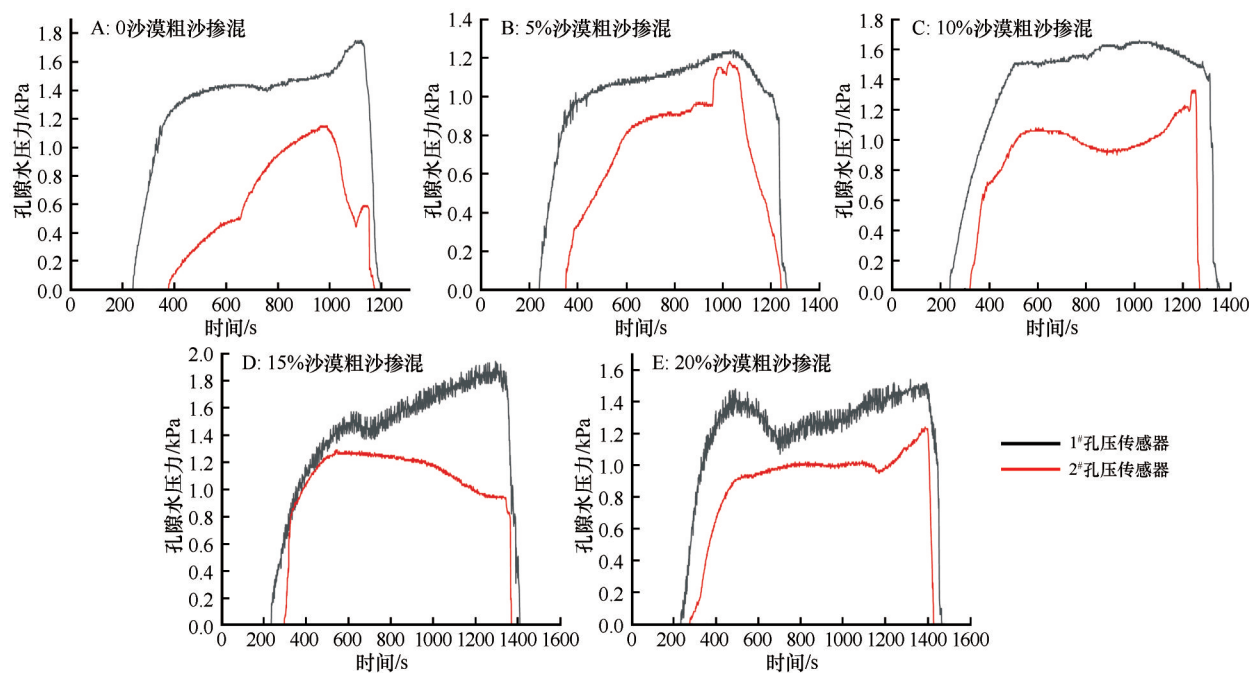


图7 堆积体起动试验全过程中的孔压变化特性

Fig.7 Pore water pressure variation characteristics during the whole experimental initiation processes

分析其原因,笔者认为,随着孔隙水压力的增大,堆积体内孔隙连通性增强、孔隙度动态变化、土体应力场相应变化,经历了应力场→体积应变→孔隙率→孔隙水压力→渗流场→塑性应变→屈服破坏的系列复杂变化过程。

团队前期对黄河上游宁蒙段泥流过程的野外观测数据<sup>[5-6,26]</sup>表明,洪峰涨退最剧烈的时段平均持续约50 min,该时段也是堆积体前蓄水的关

因此本文选取了50 min蓄满和20%沙漠粗沙混掺堆积体,深入开展上游水位上升过程中堆积体的塑性变形及位移数值模拟研究,以期分析其起动机制。

计算终止时,孔隙水压力的最大值出现在堆积体上游坡脚处,最小值则位于坡顶处(图8)。由于水流与土体之间的耦合作用,形成了如图8B所示的堆积体塑性应变区,其最危险区域位于下游坡脚

处,并不断向上延伸,直至变形发展到一定程度后,形成塑性贯通区,最终表现为如图8C所示的堆积体下游侧边坡首先出现脱离整体向下游滑动变形的趋势,继而堆积体整体起动,这与试验现象高度一致,进而揭示了流固耦合作用下沟谷型沙漠泥流堆积体的起动模式与机制。

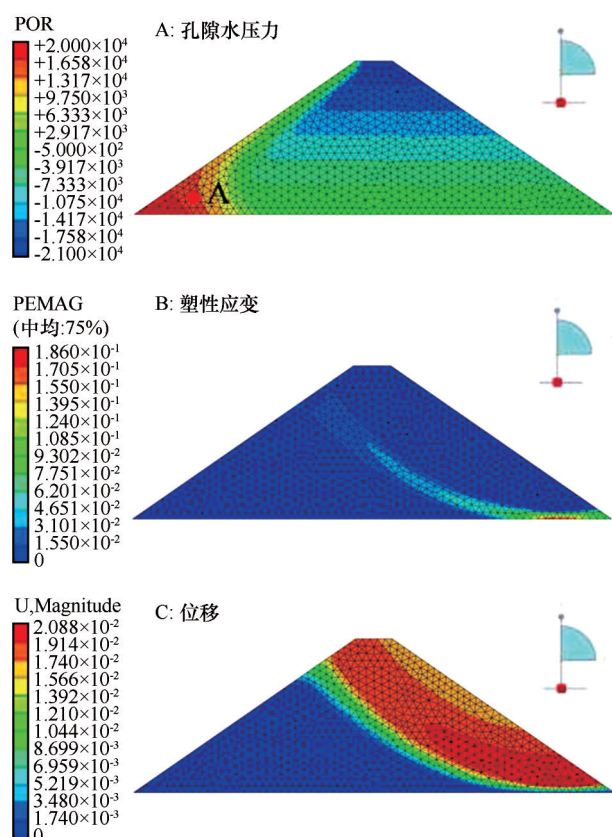


图8 50 min蓄满工况下堆积体起动参数模拟结果云图

Fig.8 Numerical simulation results of the initiation parameters (full filled within 50 min)

## 6 结论

本文通过对沟谷型沙漠泥流堆积体起动中的孔隙水压力变化特性试验分析,并采用基于Mohr-Coulomb本构模型和有效应力原理的流固耦合模型,揭示了孔隙水压力变化作用下堆积体起动过程的细观机理,建立了水位上升时堆积体起动过程中孔隙水压力与时间二者之间指数为0.5的幂函数模型,揭示了流固耦合作用下堆积体内应力场→体积应变→孔隙率→孔隙水压力→渗流场→塑性应变→屈服破坏的复杂非线性变化过程和起动机理。

本文从起动这一成灾的首要环节入手,为沟谷型沙漠泥流预警防控提供了基于孔隙水压力变化监测的新方法和新途径,为未来结合信息化手段进

行泥流灾害的防治奠定了坚实的理论基础。

## 参考文献:

- [1] 姜程,霍艾迪,朱兴华,等.黄土水力侵蚀-滑坡-泥流灾害链的研究现状[J].自然灾害学报,2019,28(1):38-43.
- [2] 马鹏辉.黄土地质灾害链链生演化特征及机制研究[D].西安:长安大学,2020.
- [3] 王之君,拓万全,王昱,等.黄河上游“十大孔兑”高含沙洪水灾害过程与输沙特性[J].灾害学,2019,34(3):93-96.
- [4] 许炯心.“十大孔兑”侵蚀产沙与风水两相作用及高含沙水流的关系[J].泥沙研究,2013(6):28-37.
- [5] Ta W, Wang H, Jia X. Aeolian process-induced hyper-concentrated flow in a desert watershed [J]. Journal of Hydrology, 2014, 511: 220-228.
- [6] Wang Z J, Ta W Q. Hyper-concentrated flow response to aeolian and fluvial interactions from a desert watershed upstream of the Yellow River [J]. Catena, 2016, 147: 258-268.
- [7] Harrison Y. Late Pleistocene aeolian and fluvial interactions in the development of the Nizzana dune field, Negev Desert, Israel [J]. Sedimentology, 2010, 45(3): 507-518.
- [8] Lancaster N, Tchakerian V. Linkages between fluvial, lacustrine, and aeolian systems in drylands: a contribution to IGCP Project 413 [J]. Quaternary International, 2003, 104(1): 1-11.
- [9] 宋阳,刘连友,严平.风水复合侵蚀研究述评[J].地理学报,2006(1):77-88.
- [10] Yan P, Li X M, Ma Y F, et al. Morphological characteristics of interactions between deserts and rivers in northern China [J]. Aeolian Research, 2015, 19: 225-233.
- [11] Zhang X, Zhan B. A model to study the grain size components of the sediment deposited in aeolian-fluvial interplay erosion watershed [J]. Sedimentary Geology, 2015, 330: 132-140.
- [12] 许炯心.黄河内蒙古古段支流“十大孔兑”侵蚀产沙的时空变化及其成因[J].中国沙漠,2014,34(6):1641-1649.
- [13] 胡凯衡,韦方强.基于数值模拟的泥石流危险性分区方法[J].自然灾害学报,2005,14(1):10-14.
- [14] 崔鹏,何易平,陈杰.泥石流输沙及其对山区河道的影响[J].山地学报,2006(5):539-549.
- [15] 苟印祥.泥石流动力特性的数值模拟研究[D].重庆:重庆大学,2012.
- [16] Zulfequar A, Umesh K, Singh A K. Incipient motion for gravel particles in clay-silt-gravel cohesive mixtures [J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(10): 3082-3093.
- [17] Umesh C, Kothiyari R K J. Influence of cohesion on the incipient motion condition of sediment mixtures [J]. Water Resources Research, 2008, 44(4): 1-15.
- [18] 王之君,拓万全,李仁年,等.粘性泥流沟道内堆积特性的直槽概化模型试验分析[J].自然灾害学报,2015,24(5):83-91.
- [19] 朱崇林,雷孝章,叶飞,等.坡面径流对斜坡散粒体稳定性影响的试验分析[J].工程科学与技术,2020,52(3):133-140.
- [20] 董辉,罗潇.强降雨作用下堆积碎石土渗流规律研究[J].工程



- 地质学报, 2015, 23(4): 616–623.
- [21] 韩培锋, 樊晓一, 田述军, 等. 降雨强度与含石量对松散堆积体失稳影响研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 112–120.
- [22] 郭瑞, 丁宏伟, 包骊军, 等. 黄土高原区地质环境特征及灾害发育类型分析: 以甘肃省环县为例[J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2016, 32(5): 35–42.
- [23] 贾晓鹏, 王海兵, 李永山, 等. 风沙对黄河宁蒙河段的影响研究进展[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 152–157.
- [24] Yao Z, Ta W, Jia X, et al. Bank erosion and accretion along the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the Yellow River from 1958 to 2008[J]. *Geomorphology*, 2011, 127(1): 99–106.
- [25] 许炯心. 风水两相作用对黄河流域高含沙水流的影响[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2005(9): 103–110.
- [26] Ta W, Wang H, Jia X. The contribution of aeolian processes to fluvial sediment yield from a desert watershed in the Ordos Plateau, China[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(1): 80–89.
- [27] 赵暄, 谢永生, 景民晓, 等. 生产建设项目弃土堆置体的类型与特征[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(1): 88–94.
- [28] 王雪松, 谢永生, 陈曦, 等. 模拟降雨条件下工程堆积体产流产沙特征研究[J]. 泥沙研究, 2015(4): 74–80.
- [29] 费康, 彭劼. ABAQUS 岩土工程实例讲解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
- [30] 李培超, 孔祥言, 卢德唐. 饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2003(4): 419–426.
- [31] 王如宾, 夏瑞, 徐卫亚, 等. 滑坡堆积体降雨入渗过程物理模拟试验研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(4): 47–54.
- [32] 缪海波, 柴少峰, 王功辉. 强降雨下无黏性土坡破坏的影响因素试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(2): 300–308.
- [33] 李安润, 邓辉, 肖宇月, 等. 降雨条件下某堆积体边坡稳定性分析[J]. 人民珠江, 2019, 40(11): 56–61.
- [34] 石振明, 赵思奕, 苏越. 降雨作用下堆积层滑坡的模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(4): 135–140.
- [35] 左自波, 张璐璐, 王建华. 降雨触发不同级配堆积体滑坡模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1319–1327.

## Pore water pressure variation characteristics during the initiation processes of the accumulation body of the gully desert mud flows

Wang Zhijun<sup>ab</sup>, He Yaoling<sup>a</sup>, Zhou Zhaoshu<sup>b</sup>

(a. College of Energy and Power Engineering / b. Baiyin New Materials Research Institute, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Taking one of the typical aeolian-fluvial interaction dominated watersheds in the Ningxia-Inner Mongolia reach of the Upper Yellow River as the study area, while focusing on the gully desert mud flows characterized as a extreme pattern that the accumulation body blocks the channel, straight channel generalized model tests were carried out on the pore water pressure variation characteristics and the initiation processes of the accumulation body under the upstream runoff infiltration condition. Meanwhile, the fluid-solid coupling model based on the effective stress principle was adopted to simulate the catastrophic micro-mechanism from the perspective of the primary initiation stage of the mud flow disasters. The results indicated that the relationship between pore water pressure and time is a power function with an exponent of 0.5. Under the effects of fluid-solid coupling, the accumulation body experienced a complex nonlinear process of stress field → volume strain → porosity → pore water pressure → seepage field → plastic strain → yield failure. Our results can also provide a new method and approach for early warning and prevention of the gully desert mud flow disasters in terms of pore water pressure monitoring.

**Key words:** gully desert mud flow; aeolian-fluvial interaction; fluid-solid coupling; pore water pressure; initiation process