

引用格式:周琳,胡斐南,许晨阳,王金晓,雷雪儿.典型砒砂岩土壤浆体流变特性[J].山地学报,2023,41(2):204-215.

ZHOU Lin, HU Feinan, XU Chenyang, WANG Jinxiao, LEI Xueer. Rheological properties of typical Pisha sandstone soil slurry [J]. Mountain Research, 2023, 41(2): 204-215.

## 典型砒砂岩土壤浆体流变特性

周琳<sup>1,2</sup>, 胡斐南<sup>1,3\*</sup>, 许晨阳<sup>3</sup>, 王金晓<sup>3</sup>, 雷雪儿<sup>3</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**黄土高原砒砂岩区基岩裸露, 碎屑物源充足, 一旦遇水成泥, 极易形成坡面泥流。过去的研究主要关注坡面泥流(挟沙水流)的前期失稳触发机制和最终泥沙搬运量, 忽略了对泥流运动过程及演化规律的研究。本研究以四种典型砒砂岩土壤为研究对象, 将其制备成不同固体体积浓度的泥浆体, 采用流变仪对各试样进行旋转剪切, 分析典型砒砂岩土壤浆体流变特性变化规律及剪切速率和固体浓度对其流变参数的影响。结果表明:(1)当砒砂岩土壤浆体中固体浓度较高时, 随着剪切速率增加, 砒砂岩土壤浆体剪切应力增加、黏度减小, 表现出剪切变稀的特点; 当固体浓度减小, 偏土类(紫色、棕色)砒砂岩土壤浆体先出现剪切变稀向剪切增稠的转变;(2)随着固体体积浓度增加, 四种砒砂岩土壤浆体的剪切应力和黏度均增加, 偏土类(紫色、棕色)砒砂岩土壤浆体的流变参数变化存在明显的体积浓度拐点( $C_p=0.41$ ); (3)在高浓度样品中, 偏土类(紫色、棕色)砒砂岩土壤浆体的剪切应力和黏度受固体体积浓度影响较大; 在低浓度样品中, 偏砂类(红色、白色)砒砂岩土壤浆体的剪切应力和黏度受固体体积浓度影响较大。本研究可为进一步理解砒砂岩遇水后的流动规律和评估砒砂岩区泥流活动提供一定的理论参考。

**关键词:**泥浆; 流变特性; 旋转剪切; 应力应变; 砒砂岩

**中图分类号:** S152.9

**文献标志码:** A

黄土高原砒砂岩区生态脆弱、土壤侵蚀剧烈、水土流失极为严重且难以治理, 有着“地球生态癌症”和“世界水土流失之最”之称<sup>[1]</sup>。随着全球气候变暖和中国西北强降水极端事件频发, 砒砂岩区水力侵蚀加剧, 造成人员伤亡和财产损失。研究砒砂岩区坡面泥流运动规律有助于认清泥流触发及演化机制, 提高区域泥流灾害预警及减灾水平。

坡面泥流在流动初期为高含沙泥流, 主要以传统方法进行研究<sup>[2-4]</sup>, 例如, 野外调查监测、室内力学试验、室内外模拟实验以及数值模拟, 主要关注泥流失稳模式和形成机制; 在流动后期, 逐渐变成挟沙水流, 则以土壤侵蚀的视角开展坡面水沙径流研究,

通过降雨冲刷试验<sup>[5-6]</sup>, 分析坡面泥沙输移特征、观测坡面径流过程以及建立坡面侵蚀模型, 主要关注坡面产流时间、坡面输沙量、搬运量等参数。针对坡面泥流运动, 传统坡面泥流研究手段和土壤侵蚀学方法不能反映泥流运动过程中的应力应变行为及流动规律, 难以为其演化过程提供理论参考。泥流作为一种高浓度固液混合流体, 其中的固体物质在流动过程中扮演着重要角色, 泥浆体积、运动速度、动能、应力应变特性等也是评估泥流灾害危险性的主要参数。目前的研究对于泥流流动过程及流变特性规律认识仍然不足。

泥浆体流变特性的研究以及流变参数的确定对

收稿日期(Received date): 2022-11-01; 改回日期(Accepted date): 2023-03-21

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(41977024)。[National Natural Science Foundation of China (41977024)]

作者简介(Biography): 周琳, (1997-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 土壤侵蚀机理研究。[ZHOU Lin (1997-), female, born in Nanyang, Henan province, M. Sc. candidate, research on soil erosion mechanism] E-mail: zhoulin20@mails.ucas.ac.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): 胡斐南, (1986-), 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 土壤学与水土保持研究。[HU Feinan (1986-), male, Ph. D., professor, research on soil science and soil and water conservation] E-mail: hufn@nwfu.edu.cn

把握坡面流体的活动规律和演变趋势十分重要<sup>[7]</sup>。本文以四种典型砒砂岩土壤为研究对象,采用原位采样、室内测试、回归分析与理论分析等研究手段,开展流变学试验,研究不同固体浓度和剪切速率对其流变参数的影响,对比分析典型砒砂岩土壤浆体流变参数的变化,并基于实测结果建立定量描述砒砂岩土壤浆体流变特性的经验方程。本研究可为进一步认识砒砂岩土壤浆体活动规律与机理提供一定的理论依据。

# 1 材料与方法

## 1.1 原状砒砂岩的采集

试验中所用的砒砂岩土壤采集自内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗地区,紫色砒砂岩土壤采自准格尔旗五字湾古城梁附近(40°04′28″N,111°00′83″E),棕色砒砂岩土壤采自准格尔旗暖水乡附近(39°43′62″N,110°31′27″E),红、白两色砒砂岩土壤采自准格尔旗沙圪堵镇安定壕村附近(39°69′79″N,110°88′24″E)。准格尔旗位于内蒙古自治区西南部,地处山西、陕西、内蒙古三省区交界处,全旗总面积约7692 km<sup>2</sup>。全区属于典型的中温带半干旱大陆性季风气候,年平均气温为6.2℃~8.7℃,年平均降水量约400 mm,主要集中在7—9月,且多以暴雨出现。全年蒸发量是降水量的5~6倍,约为2093 mm<sup>[8]</sup>。

选取代表性样地采集表层(0~20 cm)砒砂岩土壤样品,带回实验室自然风干,剔除石块和植物残根等杂质后,研磨过2 mm筛装袋备用。砒砂岩土壤样品基本理化性质采用常规土壤分析方法<sup>[9]</sup>,有机质采用K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>加热法测定;pH采用电极法测定,土水比为1:2.5;碳酸钙采用气量法测定;样品

颗粒组成采用吸管法测定,并按照国际制标准分为砂粒(2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)三个粒级。供试样品的基本理化性质见表1。

## 1.2 流变试验仪器与旋转剪切加载方案

流变试验采用奥地利安东帕公司生产的MCR 302流变仪,搭配十字板转子(型号为ST22-4V-40),转子沿转轴方向的长度为40 mm,直径为22 mm,盛放试样的外筒直径为28.92 mm。试验时,温度控制在恒温20℃,流变仪的测量转子在装有试验土样的测量圆筒中转动,对土样进行旋转剪切,分别得到流动曲线(剪切应力随剪切速率变化曲线)和黏度曲线(黏度随剪切速率变化曲线)。具体剪切方案为:首先进行剪切速率为100 s<sup>-1</sup>的预剪切(持续2 min),静置2 min后,剪切速率由0匀速增至200 s<sup>-1</sup>。图1为剪切速率随时间的变化曲线。为了保证试验结果具有可对比性,每次试验中砒砂岩土壤浆体试样的体积都相同,并且保证转子都与泥浆的上表面齐平,使破坏面处于同一位置。每个试样至少三次重复。

## 1.3 流变试验样品制备

由于商业流变仪对测试样品尺寸的限制<sup>[10]</sup>,在样品制备过程中将四种砒砂岩土壤研磨过0.5 mm筛,颗粒级配曲线如图2所示,计算得到颗粒不均匀系数(Coefficient Uniformity, C<sub>u</sub>)和曲率系数(Coefficient of Curvature, C<sub>c</sub>)如表2所示。

加入蒸馏水与砒砂岩土壤混合,配置成含水率为40%~400%的样品,手动搅拌3 min,静置5 min,保证样品充分饱和<sup>[11]</sup>。各试验样品的固体体积浓度C<sub>v</sub><sup>[12]</sup>的计算公式为:

$$C_v = \frac{V_s}{V_s + V_w}$$

(1)

表1 四种砒砂岩土壤基本理化性质  
Tab.1 Basic physicochemical properties of Pisha sandstone

砒砂岩种类	颗粒组成/%			pH	CaCO <sub>3</sub> 含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有机质 SOM 含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )
	砂粒	粉粒	黏粒			
紫色砒砂岩	53.85	37.20	8.95	6.74±0.03	12.01±0.83	3.63±0.13
棕色砒砂岩	64.04	33.06	2.90	7.84±0.04	49.04±1.53	3.49±0.13
红色砒砂岩	90.80	6.90	2.31	6.68±0.06	38.07±1.79	3.36±0.27
白色砒砂岩	95.68	1.42	2.90	6.42±0.05	19.68±2.52	3.45±0.09

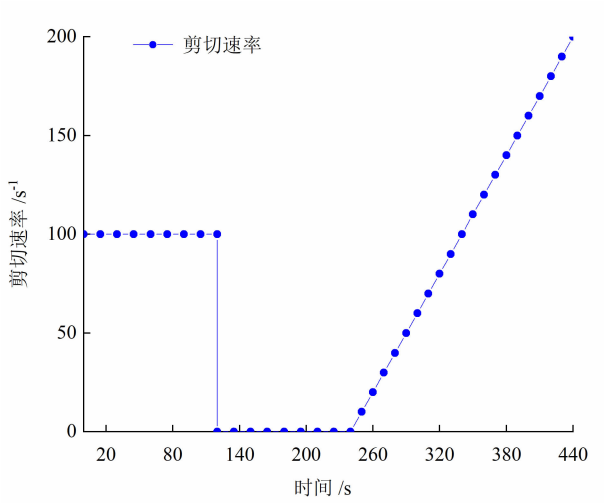


图 1 剪切速率随时间变化过程

Fig. 1 Processes of shear rate

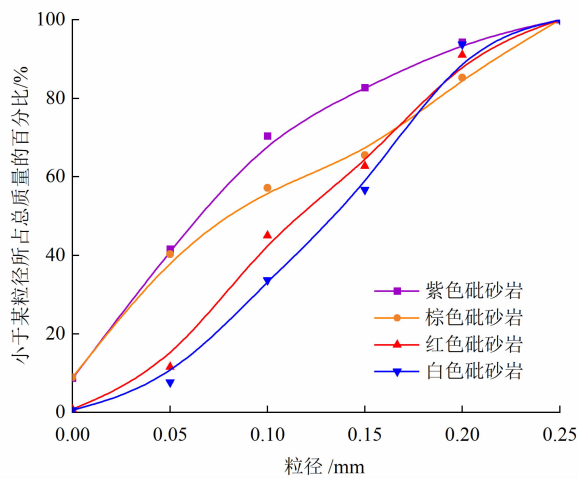


图 2 四种砒砂岩试样粒径级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of Pisha sandstone grain size

式中,  $V_s$  为样品中固体的体积 ( $\text{cm}^3$ );  $V_w$  为样品中水的体积 ( $\text{ml}$ )。其中砒砂岩的密度根据土质分类以及参考前人研究结果<sup>[13]</sup>, 取  $2.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。不同砒砂岩土壤浆体含水率与固体体积浓度的转换如表 3 所示。

表 2 四种砒砂岩土壤颗粒不均匀系数  $C_u$  和曲率系数  $C_c$

Tab. 2 Coefficient of uniformity  $C_u$  and curvature coefficient  $C_c$  of Pisha sandstone

系数	紫色砒砂岩	棕色砒砂岩	红色砒砂岩	白色砒砂岩
$C_u$	42.50	60.00	3.78	3.17
$C_c$	6.41	5.40	1.21	1.21

表 3 含水率与固体体积浓度的转换

Tab. 3 Conversion of water content to solid volume concentration

试样编号	含水率/%	固体体积浓度 $C_v$
1	40	0.51
2	60	0.41
3	80	0.34
4	100	0.29
5	200	0.17
6	300	0.12
7	400	0.09

## 1.4 经典流变模型

目前已有很多研究开展了关于土水分散体系、悬液、浆体的试验分析和理论推导, 提出了许多非牛顿流体的流变模型, 如幂律模型<sup>[14]</sup>、Bingham 模型<sup>[15]</sup>、Herschel-Bulkley 模型<sup>[16]</sup>和二项式模型<sup>[17]</sup>。其中二项式模型综合考量了流体的黏滞力、紊动力、屈服应力以及碰撞力等因素, 适用于流体流动过程中出现较为强烈碰撞或紊动的情况, 因此本研究拟采用二项式模型来拟合四种砒砂岩土壤浆体流变参数的变化规律。其表达式如下:

$$\tau = \tau_{OB} + \eta_{OB}\dot{\gamma} + C\dot{\gamma}^2 \quad (2)$$

$$C = \rho_m l^2 + f(\rho_m, C_v) d_s^2 \quad (3)$$

式中,  $\tau$  为剪切应力 ( $\text{Pa}$ );  $\dot{\gamma}$  为剪切速率 ( $\text{s}^{-1}$ );  $\tau_{OB}$  为二项式模型下的屈服应力 ( $\text{Pa}$ );  $\eta_{OB}$  为二项式模型下的动态黏滞度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ );  $C$  为惯性剪应力系数, 是混合物的质量密度  $\rho_m$ 、混合长度  $l$ 、沉积物大小  $d_s$  以及固体体积浓度  $C_v$  的函数。

浆体剪切增稠或剪切稀化的流变特性可用二项式模型中  $C/\eta_{OB}$  值来表征。当  $C/\eta_{OB} > 0$  时, 浆体表现为剪切增稠; 当  $C/\eta_{OB} < 0$  时表现为剪切稀化。同样,  $C/\eta_{OB}$  偏离 0 的程度越大, 浆体增稠或稀化的程度越大<sup>[18]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 剪切速率与剪切应力和黏度的关系

图 3 为四种砒砂岩土壤浆体剪切应力随剪切速率变化的流动曲线图。随着剪切速率的增加, 土壤浆体的剪切应力整体上呈增加趋势, 且随着体积浓度增加, 曲线斜率也相应增大。对比四种砒砂岩土

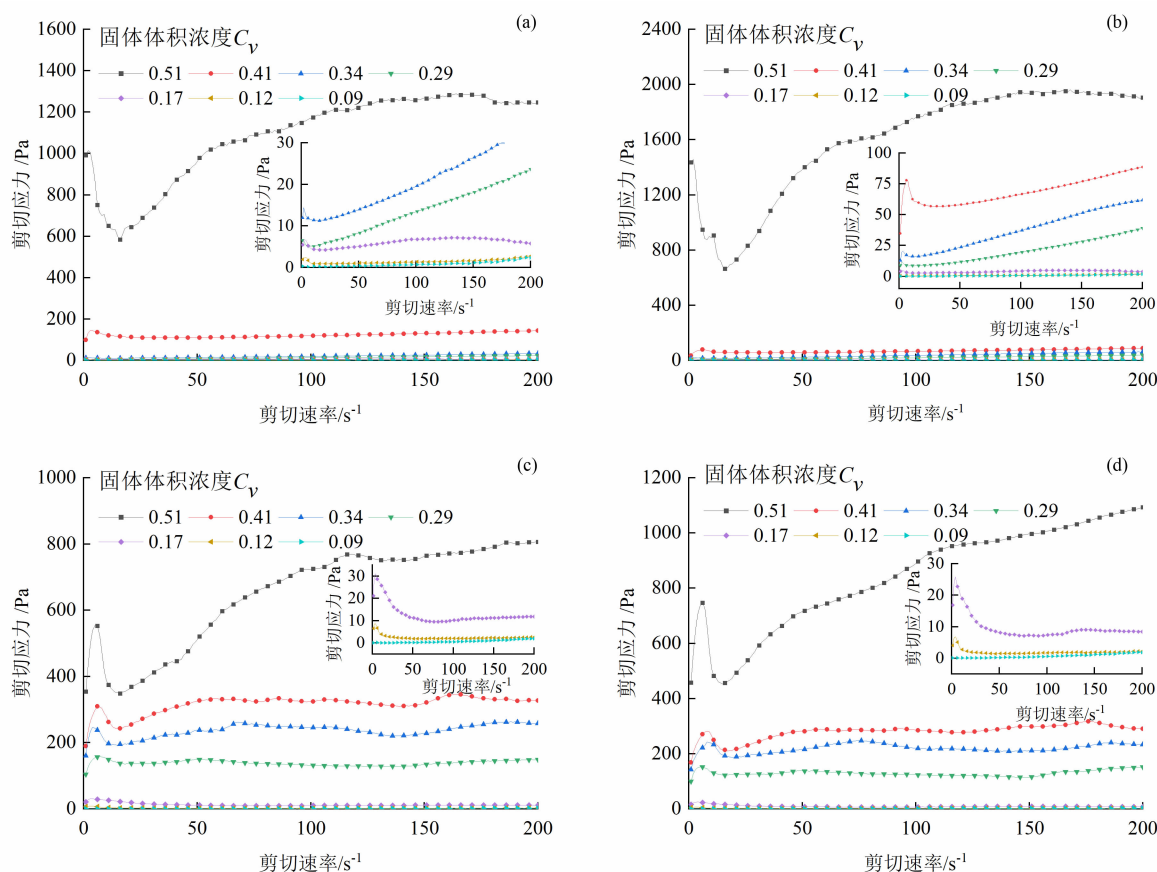


图3 四种砒砂岩土壤浆体的流动曲线:

(a) 紫色砒砂岩; (b) 棕色砒砂岩; (c) 红色砒砂岩; (d) 白色砒砂岩

Fig. 3 Flow curves of four kinds of PSS slurries: (a) purple Pisha sandstone;

(b) brown Pisha sandstone; (c) red Pisha sandstone; (d) white Pisha sandstone

壤浆体的流动曲线,发现曲线分布特征随体积浓度变化响应不同。例如,当剪切速率为  $50 \text{ s}^{-1}$ ,紫、棕色砒砂岩土壤浆体固体体积浓度从 0.51 减小为 0.41 时,两条流动曲线的剪切应力相差  $1000 \sim 1500 \text{ Pa}$ ,而红、白砒砂岩土壤浆体在相同条件下的剪切应力仅相差  $200 \sim 400 \text{ Pa}$ ,说明在高浓度条件下紫、棕色砒砂岩土壤浆体剪切应力对体积浓度变化更为敏感。在剪切初期( $0 \sim 15 \text{ s}^{-1}$ ),四种砒砂岩土壤浆体的流动曲线均存在波峰现象,随着固体浓度减小,波峰现象减弱甚至消失。

图4展示了四种砒砂岩土壤浆体黏度随剪切速率变化的黏度曲线图。在剪切初期,浆体黏度呈断崖式下降,与流动曲线(图3)相对应,随着剪切速率增加,黏度逐渐趋于稳定。固体体积浓度越大的样品,初始黏度越大,随着剪切速率的增加,黏度的减小幅度也越大。在不同的砒砂岩土壤浆体之间,黏度曲线表现也不同。随着固体体积浓度减小,紫、棕

色砒砂岩土壤浆体的黏度在较大剪切速率下率先出现“上翘”趋势,即表现为剪切增稠的特点。而红、白色砒砂岩土壤浆体黏度随剪切速率的增大而减小,仅在极低固体浓度( $C_v = 0.09$ )下,出现黏度随剪切速率的增大而增大。此外,在固体体积浓度较高时,紫、棕色砒砂岩土壤浆体的黏度曲线与红、白色相比较为分散,说明固体浓度的变化能引起紫、棕色砒砂岩土壤浆体黏度发生更大的变化,即在高浓度时,紫、棕色砒砂岩土壤浆体黏度对固体体积变化的敏感度较高;而在浓度较低时,红、白色砒砂岩土壤浆体黏度对固体体积浓度变化的敏感度较高。

## 2.2 体积浓度与剪切应力和黏度的关系

图5展示了四种砒砂岩土壤浆体的剪切应力随固体体积浓度的变化曲线。随着固体体积浓度的增大,砒砂岩土壤浆体的剪切应力随之增大。四种砒砂岩土壤浆体在剪切应力增加趋势和幅度上并不

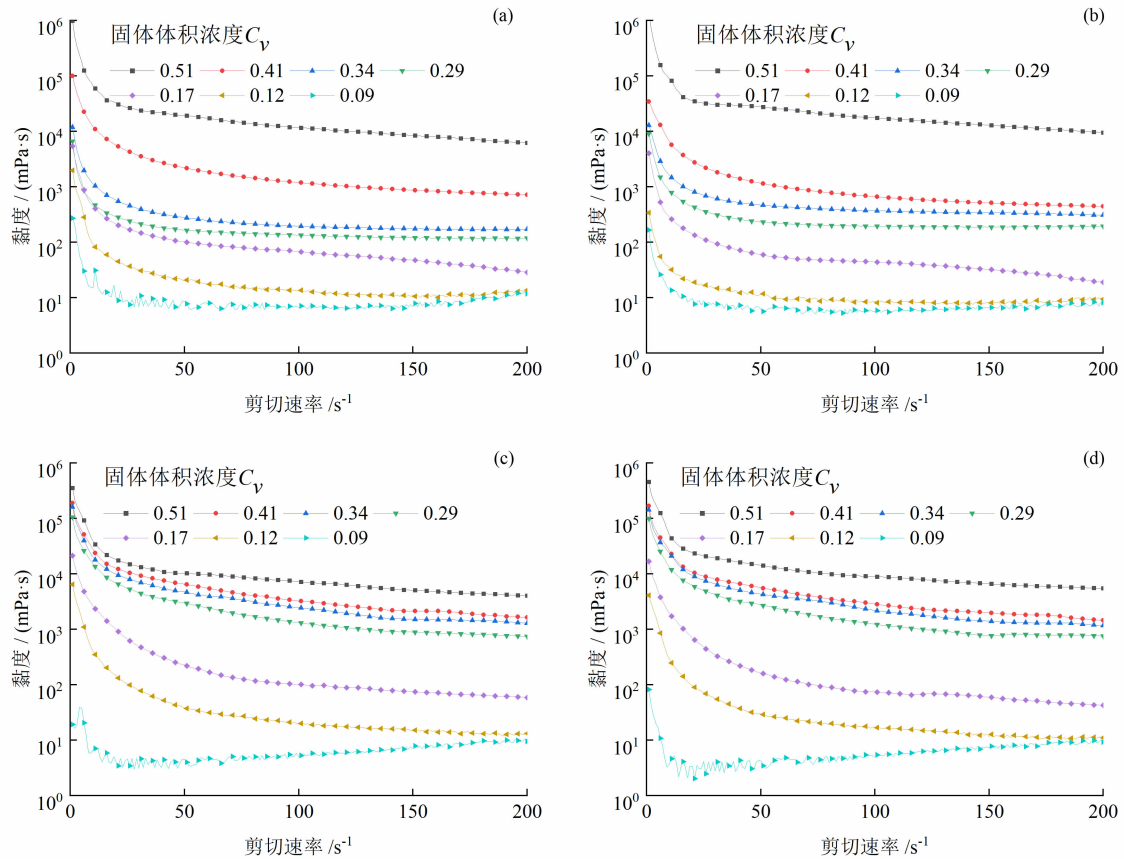


图 4 四种砒砂岩土壤浆体的黏度曲线:

(a) 紫色砒砂岩; (b) 棕色砒砂岩; (c) 红色砒砂岩; (d) 白色砒砂岩

Fig. 4 Viscosity curves of four kinds of PSS slurries: (a) purple Pisha sandstone;

(b) brown Pisha sandstone; (c) red Pisha sandstone; (d) white Pisha sandstone

完全相同。当  $C_v \leq 0.41$  时,紫、棕色砒砂岩土壤浆体的剪切应力几乎不随剪切速率发生变化;当  $C_v > 0.41$  时,其剪切应力陡然增加。 $C_v = 0.41$  是影响紫、棕色砒砂岩土壤浆体剪切应力变化的关键浓度。将四种砒砂岩土壤浆体对比来看,当  $C_v > 0.41$  时,在相同剪切速率水平下,紫、棕色砒砂岩土壤浆体的剪切应力明显大于红、白色砒砂岩土壤浆体;当  $C_v \leq 0.41$  时,红、白色砒砂岩土壤浆体的剪切应力反而大于紫、棕色砒砂岩。

图 6 展示了四种砒砂岩土壤浆体的黏度随固体体积浓度的变化曲线。随着固体体积浓度的增加,浆体黏度增加。在相同的固体浓度下,随着剪切速率的增加,黏度逐渐减小。对比四种砒砂岩土壤浆体可以看出, $C_v = 0.41$  同样是影响紫、棕色砒砂岩土壤浆体黏度变化的关键值。当  $C_v \leq 0.41$  时,紫、棕色砒砂岩土壤浆体的黏度几乎不发生变化,而当  $C_v > 0.41$ ,黏度迅速增加,该现象在红、白色砒砂岩

土壤浆体的黏度变化中并不明显。紫、棕色砒砂岩和红、白色砒砂岩土壤浆体的黏度在不同固体浓度下的表现不同,这与前文剪切应力变化表现一致,当  $C_v > 0.41$  时,在相同剪切速率水平下,紫、棕色砒砂岩土壤浆体的黏度大于红、白色砒砂岩土壤浆体;当  $C_v \leq 0.41$  时,红、白色砒砂岩土壤浆体的黏度反而大于紫、棕色砒砂岩土壤浆体。

## 2.3 基于二项式模型拟合的流变参数

本文采用二项式模型对各试样流动曲线进行初步拟合,根据图 3 的结果,剪切初期 ( $0 \sim 15 \text{ s}^{-1}$ ) 出现波峰,同时依据前人研究,在自然条件下,泥浆体甚至是挟沙水流的剪切速率很少会超过  $100 \text{ s}^{-1}$  [17],因此根据公式(2),对剪切速率为  $15 \sim 100 \text{ s}^{-1}$  段的剪切应力值进行拟合,得到的拟合函数和特征参数如表 4 所示。

从表 4 可以看出,随着固体浓度的减小,四种砒砂岩土壤浆体拟合的屈服应力  $\tau_{0B}$  减小,动态黏滞



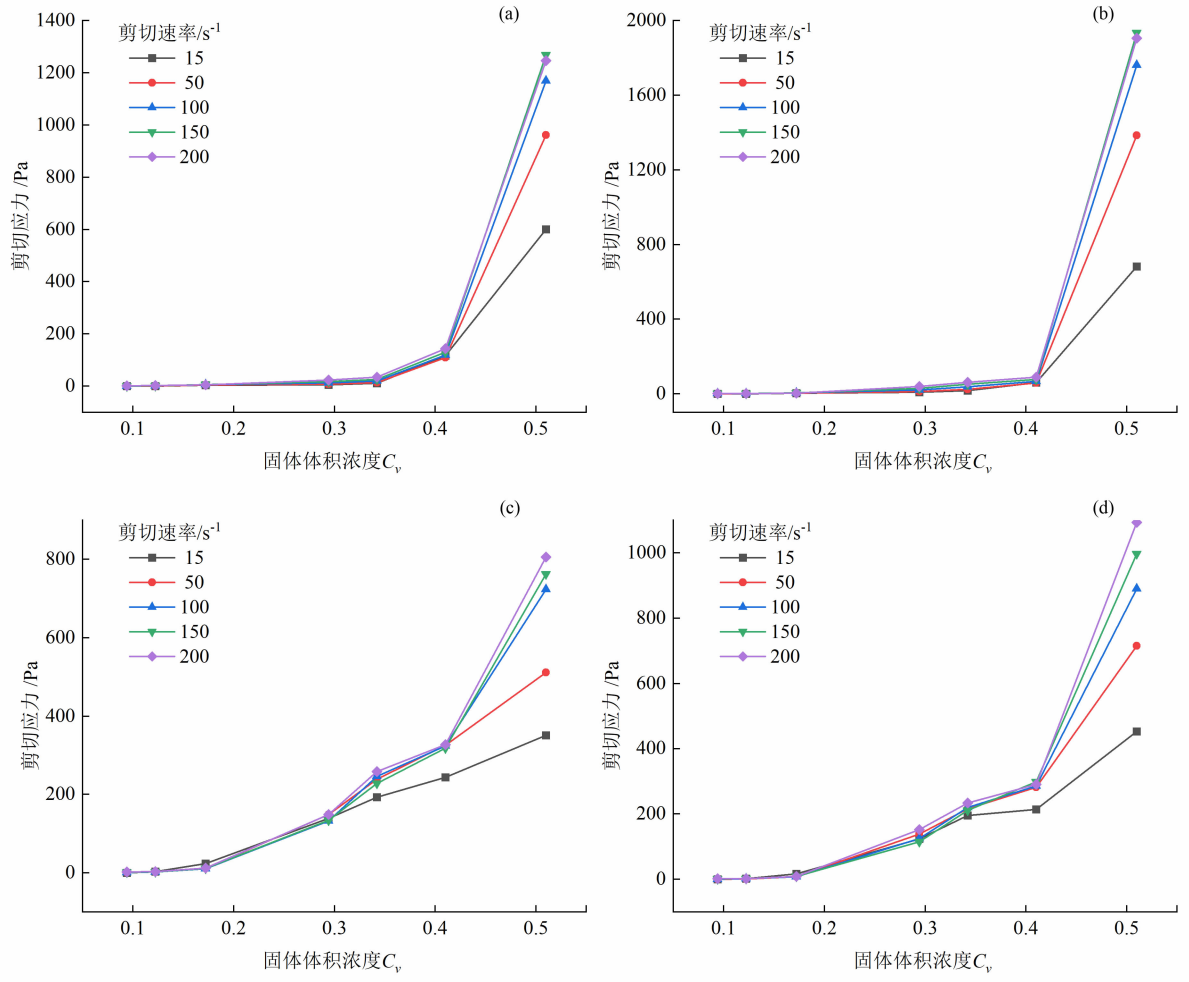


图5 不同剪切速率下砒砂岩土壤浆体剪切应力随体积浓度的变化:

(a) 紫色砒砂岩; (b) 棕色砒砂岩; (c) 红色砒砂岩; (d) 白色砒砂岩

Fig. 5 Variation of shear stress of PSS slurry with solid volume concentration at different shear rates;

(a) purple Pisha sandstone; (b) brown Pisha sandstone; (c) red Pisha sandstone; (d) white Pisha sandstone

度  $\eta_{OB}$  减小,  $C/\eta_{OB}$  值由负值转变为正值, 说明浆体在固体浓度减小的过程中, 出现了剪切变稀向剪切增稠的转变。其中, 紫、棕色砒砂岩土壤浆体在固体浓度  $C_v \leq 0.34$  时出现剪切增稠, 红、白色砒砂岩土壤浆体在  $C_v \leq 0.09$  出现剪切增稠, 拟合结果与图 4 结果一致。

根据前人<sup>[11, 19]</sup>研究成果, 屈服应力 ( $\tau_y$ ) 随固体体积浓度  $C_v$  的变化趋势呈指数增长, 即符合如下表达式:

$$\tau_y = \alpha \cdot \exp^{\beta \cdot C_v} \quad (4)$$

式中,  $\alpha$  和  $\beta$  为经验系数, 用于表征屈服应力  $\tau_y$  的变化趋势。

固体体积浓度与二项式得到的屈服应力拟合如图 7 所示。屈服应力与固体体积浓度呈相关性较好

的指数增长趋势, 公式 (5) ~ (8) 分别表示紫色、棕色、红色、白色砒砂岩土壤浆体屈服应力随固体体积浓度的变化规律:

$$\tau_y = 0.41 \exp^{13.18 C_v} \quad (5)$$

$$\tau_y = 0.63 \exp^{10.46 C_v} \quad (6)$$

$$\tau_y = 25.38 \exp^{4.5 C_v} \quad (7)$$

$$\tau_y = 13.22 \exp^{6.31 C_v} \quad (8)$$

从图 7 可以看出, 紫、棕两色砒砂岩土壤浆体的屈服应力变化与红、白两色砒砂岩土壤浆体有明显不同。当固体体积浓度增加时, 紫、棕色砒砂岩土壤浆体的屈服应力先稳定后急剧增加, 变化临界浓度约为 0.41。而红、白色砒砂岩土壤浆体的屈服应力呈现逐渐增大的趋势。系数  $\alpha$  和系数  $\beta$  在四种浆体中表达也不同, 紫、棕色砒砂岩土壤浆体的系数  $\alpha$  远

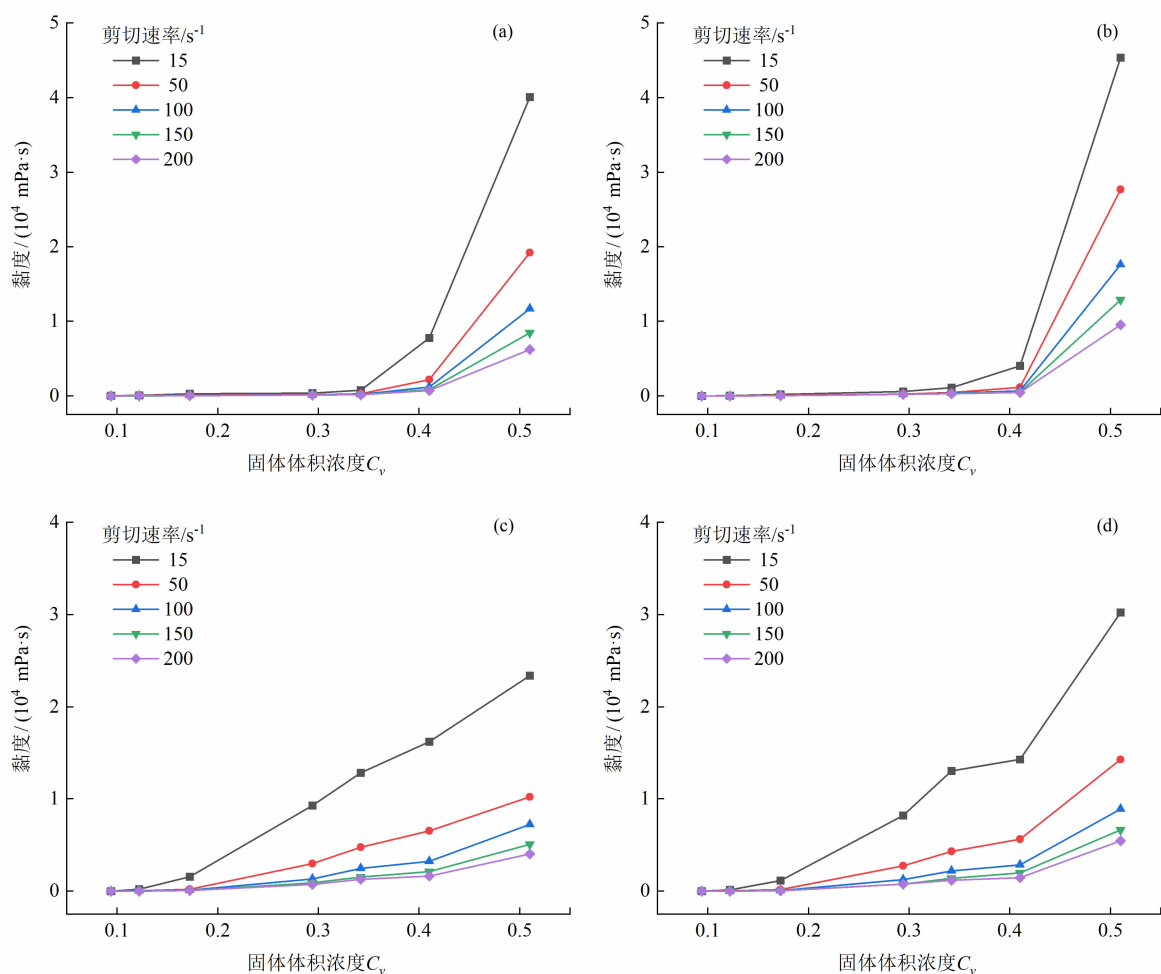


图 6 不同剪切速率下砒砂岩土壤浆体黏度随体积浓度的变化:

(a) 紫色砒砂岩; (b) 棕色砒砂岩; (c) 红色砒砂岩; (d) 白色砒砂岩

Fig. 6 Variation of viscosity of PSS slurry with solid volume concentration at different shear rates;

(a) purple Pisha sandstone; (b) brown Pisha sandstone; (c) red Pisha sandstone; (d) white Pisha sandstone

小于红、白色砒砂岩土壤浆体,而系数 $\beta$ 恰好相反。

### 3 讨论

#### 3.1 剪切速率对砒砂岩土壤浆体流变特性的影响

随着剪切速率增加,四种砒砂岩土壤浆体的剪切应力增加,黏度减小,整体上表现出剪切变稀的特点,可以初步判断为假塑性流体,这与前人<sup>[20-21]</sup>研究结果一致。但随着固体浓度的降低,砒砂岩土壤浆体出现了由剪切变稀向剪切增稠的转变,同样地,黄河下游三角洲的黏性泥沙也表现出类似的现象<sup>[22]</sup>,其由剪切变稀到剪切增稠的拐点为 $120 \text{ s}^{-1}$ 。自然条件下的泥浆土壤会表现出剪切变稀或剪切增稠,对于给定的剪切速率,剪切变稀到剪切增稠的转

变可以用颗粒排列来解释<sup>[23]</sup>。较低的剪切速率促进颗粒最初无序悬浮的状态被破坏,形成固体“链”,从而降低黏度,然而在更高的剪切速率下,这些“链”被破坏,颗粒间距离减小,黏度增加。浆体在流动过程中,当坡度较大或运动速度加快而达到某一速度临界值时,浆体黏度增加,这一现象也许可以解释极端暴雨条件下泥流中“泥球”的形成<sup>[2]</sup>。当泥流流速超过剪切增稠临界值时,浆体黏度增大,同时坡面或沟道内的大体积碎屑物被冲刷带走,土块石砾等随泥流不断滚动、碰撞,表面不断包裹黏度较大的泥浆,从而像滚雪球般增大体积,形成“泥球”。本研究发现,在剪切初期( $0 \sim 15 \text{ s}^{-1}$ ),砒砂岩土壤浆体的流动曲线存在波峰变化,该现象在高浓度泥沙<sup>[22]</sup>以及泥石流<sup>[24-25]</sup>中均有出现,这可能与

表 4 不同体积浓度下四种砒砂岩土壤浆体的拟合函数和特征参数

Tab. 4 Fitting functions and characteristic parameters of four kinds of PSS slurries under different volume concentrations

固体体积浓度	紫色砒砂岩			棕色砒砂岩		
	$C_v$	$\tau_{OB}$	$C/\eta_{OB}$	$R^2$	$\tau_{OB}$	$C/\eta_{OB}$
0.51		$\tau = 336.11 + 16.41\gamma - 0.08\gamma^2$	-0.01	0.99	$\tau = 129.30 + 33.11\gamma - 0.18\gamma^2$	-0.01
0.41		$\tau = 116.80 - 0.30\gamma + 3 \times 10^{-3}\gamma^2$	-0.01	0.91	$\tau = 59.50 - 0.13\gamma + 2 \times 10^{-3}\gamma^2$	-0.02
0.34		$\tau = 10.13 + 0.06\gamma + 4 \times 10^{-4}\gamma^2$	0.01	0.99	$\tau = 12.41 + 0.20\gamma + 5 \times 10^{-4}\gamma^2$	$3 \times 10^{-3}$
0.29		$\tau = 4.18 + 0.07\gamma + 2 \times 10^{-4}\gamma^2$	0.01	0.99	$\tau = 7.54 + 0.05\gamma + 8 \times 10^{-4}\gamma^2$	0.02
0.17		$\tau = 3.80 + 0.02\gamma + 1 \times 10^{-4}\gamma^2$	0.01	0.99	$\tau = 2.99 - 0.01\gamma + 3 \times 10^{-4}\gamma^2$	-0.02
0.12		$\tau = 0.92 + 4 \times 10^{-4}\gamma + 4 \times 10^{-5}\gamma^2$	0.10	0.94	$\tau = 0.30 + 0.01\gamma + 8 \times 10^{-6}\gamma^2$	$2 \times 10^{-3}$
0.09		$\tau = 0.12 + 4 \times 10^{-3}\gamma + 1 \times 10^{-5}\gamma^2$	$3 \times 10^{-3}$	0.92	$\tau = 0.08 + 0.01\gamma + 3 \times 10^{-7}\gamma^2$	$6 \times 10^{-5}$

固体体积浓度	红色砒砂岩			白色砒砂岩		
	$C_v$	$\tau_{OB}$	$C/\eta_{OB}$	$R^2$	$\tau_{OB}$	$C/\eta_{OB}$
0.51		$\tau = 224.74 + 6.68\gamma - 0.02\gamma^2$	-0.002	0.99	$\tau = 328.19 + 9.54\gamma - 0.04\gamma^2$	-0.01
0.41		$\tau = 188.23 + 3.97\gamma - 0.03\gamma^2$	-0.01	0.97	$\tau = 160.29 + 3.47\gamma - 0.02\gamma^2$	-0.01
0.34		$\tau = 157.61 + 2.30\gamma - 0.01\gamma^2$	-0.01	0.95	$\tau = 145.29 + 2.25\gamma - 0.01\gamma^2$	-0.01
0.29		$\tau = 124.76 + 0.75\gamma - 0.01\gamma^2$	-0.01	0.75	$\tau = 110.42 + 0.80\gamma - 0.01\gamma^2$	-0.01
0.17		$\tau = 27.62 - 0.49\gamma + 3 \times 10^{-3}\gamma^2$	-0.01	0.96	$\tau = 19.48 - 0.34\gamma + 2 \times 10^{-3}\gamma^2$	-0.01
0.12		$\tau = 3.76 - 0.05\gamma + 4 \times 10^{-4}\gamma^2$	-0.01	0.93	$\tau = 2.48 - 0.03\gamma + 3 \times 10^{-4}\gamma^2$	-0.01
0.09		$\tau = 0.04 + 2 \times 10^{-3}\gamma + 3 \times 10^{-5}\gamma^2$	0.15	0.97	$\tau = 0.001 + 0.003\gamma + 3 \times 10^{-5}\gamma^2$	0.01

注:  $P < 0.05$ 。

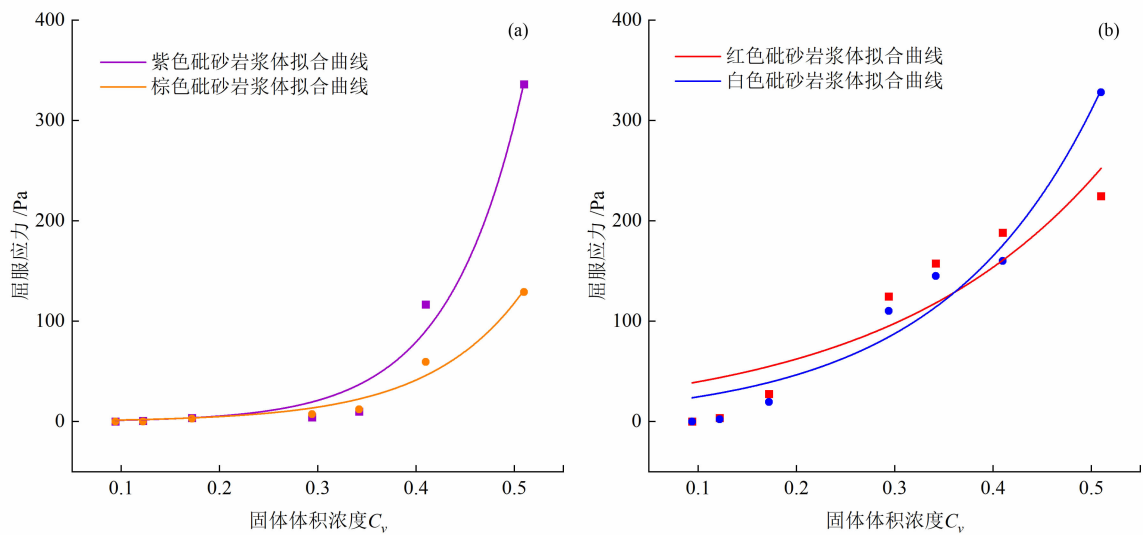


图 7 四种砒砂岩土壤浆体屈服应力随固体体积浓度的变化:(a)偏土类砒砂岩(紫、棕色);(b)偏砂类砒砂岩(红、白色)

Fig. 7 Yield Stress of four PSS slurries with solid concentration; (a) purple and brown Pisha sandstone; (b) red and white Pisha sandstone

注:四种砒砂岩土壤浆体屈服应力与固体体积浓度  $C_v$  的拟合公式见公式(5)~(8)(紫色,  $R^2 = 0.98$ );(棕色,  $R^2 = 0.97$ );(红色,  $R^2 = 0.82$ );(白色,  $R^2 = 0.95$ ),  $P < 0.05$ 。

所使用的十字板转子有关。当转子旋转一周回到初始起点时,圆筒内的浆体已被剪切形成一个剪切通道,因此剪切应力出现减小趋势。随着转子继续转动,运动路径上的结构破坏与重建达到动态平衡,因



此剪切应力随着剪切速率的增加而稳定增加<sup>[26]</sup>。

### 3.2 固体浓度和颗粒组成对砒砂岩土壤浆体流变特性的影响

本研究中固体体积浓度由含水率调节,而含水率是影响水-土分散泥浆体流动规律的重要因素。水分作为泥浆体流动的液相介质,可直接影响泥浆体中颗粒的连接方式和胶结强度。随着固体浓度的增加,样品的剪切应力和黏度均增大。由于水分的加入使颗粒表面出现水膜,起到了一定的润滑作用,较高的水分含量有利于减少颗粒摩擦和干扰效应,同时水分还会削弱细颗粒之间的黏附,从而导致黏度下降,流动性增强<sup>[11]</sup>。

本研究发现四种砒砂岩土壤浆体的流变规律在不同固体浓度下表现不同。随着固体浓度的增大,紫、棕色砒砂岩土壤浆体的剪切应力和黏度出现明显浓度拐点( $C_v = 0.41$ ),而红、白色砒砂岩土壤浆体的剪切应力和黏度呈现逐步增加趋势(图 5 和图 6)。当  $C_v > 0.41$  时,紫、棕色砒砂岩土壤浆体的剪切应力和黏度较红、白色砒砂岩土壤浆体更大。当  $C_v < 0.41$  时,红、白色砒砂岩土壤浆体的剪切应力和黏度反而高于紫、棕色砒砂岩土壤浆体。上述结果可能与四种砒砂岩的颗粒组成有关。通常情况下,当固体体积浓度相同时,细颗粒和黏土矿物的存在会使样品更加黏稠,剪切应力更大,更不容易被破坏<sup>[26]</sup>。在固体体积浓度较高时,由于紫、棕色砒砂岩中小粒径颗粒较红、白色砒砂岩多(表 1、图 2),浆体内部絮凝结构紧密,剪切紫、棕色砒砂岩土壤浆体需要更多的能量,因此,紫、棕色砒砂岩土壤浆体中剪切应力和黏度明显大于红、白色砒砂岩土壤浆体。当水分加入后,即在低固体浓度条件下,紫、棕色砒砂岩土壤浆体的絮凝结构不再那么紧实甚至被破坏,剪切应力和黏度减小,而在红、白色砒砂岩土壤浆体中,随着水分的加入,原本就不紧实的絮凝结构也不再起着主导作用,粗颗粒的贡献开始凸显(图 5)。样品上限粒径越大,其剪切应力水平越高,粗颗粒的存在增加了运动阻力<sup>[24]</sup>。同时,颗粒间的距离决定了颗粒接触摩擦相互作用的频率<sup>[26]</sup>,因此在考虑沉降作用下,粗颗粒的沉淀一定程度上增加了颗粒接触,从而加强了摩擦效应。前人<sup>[27]</sup>研究指出粗颗粒和黏粒含量的提升对于剪切应力均有增加效应,絮凝结构和粗颗粒共同影响着大颗粒浆体的流变参数,上述两种效应共同导致红、白色砒砂岩土

壤浆体的剪切应力和黏度呈现逐渐减小的趋势。

在自然条件下,随着水分入渗到开始坡面产流,从源区到沉积区,浆体中的固体物质在时间和空间上发生变化将会导致浆体流动行为发生变化。例如,水分进入砒砂岩的过程中,红、白色砒砂岩遇水后,黏度缓慢减小;而紫、棕色砒砂岩一旦遇水,且当含水量达到临界值,其剪切应力和黏度瞬间减小或消失,这将大大提高砒砂岩被剥蚀和搬运的可能性。当坡面形成砒砂岩泥流后,此时固体浓度较高,紫、棕色砒砂岩土壤浆体的黏度远大于红、白色砒砂岩土壤浆体,这意味着在其流动过程中,紫、棕色砒砂岩能带走更多的坡面碎屑物质,导致更为严重的水土流失。与坡面输沙量相比,这种特殊的坡面黏着侵蚀难以被发现和量化,可能导致土壤侵蚀测量值远低于真实值。目前为止,在土壤侵蚀领域,并无相关研究从浆体自身黏着带走碎屑物质角度出发分析土壤侵蚀过程。因此,后续研究可开展坡面泥流模拟试验,探索泥流的流动过程、黏着性以及搬运侵蚀量,为坡面土壤侵蚀过程提供新的研究思路。

## 4 结论

(1) 剪切速率是影响砒砂岩土壤浆体流变特性的关键因素。当砒砂岩土壤浆体中固体浓度较高时,随着剪切速率的增加,浆体剪切应力增加,黏度减小,表现出剪切变稀的特点,当固体浓度减小,细颗粒含量越多的砒砂岩土壤浆体先出现剪切变稀向剪切增稠的转变。

(2) 随着固体体积浓度的增加,四种砒砂岩土壤浆体的剪切应力及黏度增加。偏土类(紫、棕色)砒砂岩土壤浆体的剪切应力和黏度变化存在明显的体积浓度拐点( $C_v = 0.41$ )。

(3) 颗粒组成对砒砂岩土壤浆体的流变特性影响具有阶段性。在不同固体浓度下,砒砂岩土壤浆体具有不同的流变行为。在固体浓度较高条件下,细颗粒通过黏结作用形成絮凝结构,从而提高了浆体剪切应力和黏度对固体浓度变化的敏感度;而在低浓度下,粗颗粒通过沉淀提高颗粒接触频率和摩擦效应,从而提高了浆体剪切应力和黏度对固体浓度变化的敏感度。

(4) 对于四种砒砂岩土壤,紫、棕色砒砂岩土壤更易遇水溃散,更易被水流侵蚀和搬运,且更易出现

剪切增稠,增加形成泥石流灾害的风险以及增加土壤侵蚀量。因此在砒砂岩区水力侵蚀防治及泥石流灾害预警过程中,应更关注偏土类即细颗粒含量较多的砒砂岩类型。

## 参考文献 (References)

- [1] 姚文艺, 李长明, 张攀, 等. 砒砂岩侵蚀机理研究与展望[J]. 人民黄河, 2018, **40**(6): 1-7+65. [YAO Wenyi, LI Changming, ZHANG Pan, et al. Prospect and research on the erosion mechanism of Pisha sandstone [J]. Yellow River, 2018, **40**(6): 1-7+65] DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2018.06.001
- [2] 陈吟, 赵莹, 杜鹏飞, 等. 黄土高原极端暴雨泥石流中“泥球”的形成机理与致灾性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023: 1-12. [CHEN Yin, ZHAO Ying, DU Pengfei, et al. Study on formation mechanism and catastrophability of mud-ball in mudflow from extreme rainstorm on Loess Plateau [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023: 1-12] DOI: 10.1746.TV.20230118.1527.001
- [3] 蔺晓燕, 李同录, 张子然, 等. 陕西华县高楼村黄土滑坡-泥石流的成因分析[J]. 工程地质学报, 2013, **21**(2): 282-288. [LIN Xiaoyan, LI Tonglu, ZHANG Ziran, et al. Causes of Gaoloucun loess flowslide in Huaxian county, Shaanxi province [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, **21**(2): 282-288] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2013.02.014
- [4] 陈海霞, 王家鼎. 延安地区降雨引发黄土泥流的试验研究[J]. 水土保持通报, 2013, **33**(2): 39-42. [CHEN Haixia, WANG Jiading. Experimental study on loess mudflow induced by rainfall in Yan'an area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, **33**(2): 39-42] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2013.02.032
- [5] 谢梦瑶, 任宗萍, 李占斌, 等. 砒砂岩区小流域场次洪水产流产沙特征[J]. 水土保持研究, 2020, **27**(5): 45-49+58. [XIE Mengyao, REN Zongping, LI Zhanbin, et al. Characteristics of runoff and sediment yield during flood events in a small watershed of the Pisha sandstone area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, **27**(5): 45-49+58] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2020.05.007
- [6] 卫午毓, 肖培青, 张攀, 等. 复合侵蚀作用下砒砂岩坡面产流产沙过程试验[J]. 水土保持学报, 2020, **34**(2): 18-22. [WEI Wuyu, XIAO Peiqing, ZHANG Pan, et al. Experiment on runoff and sediment production process of Pisha sandstone slope under composite erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(2): 18-22] DOI: 10.13870/j.cnki.stbctb.2020.02.003
- [7] 王裕宜, 詹钱登, 严璧玉. 泥石流流体的流变特性与运移特征[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2014: 132-148. [WANG Yuyi, ZHAN Qiadeng, YAN Biyu. Debris-flow rheology and movement [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 2014: 132-148]
- [8] 刘龙, 姚云峰, 郭月峰, 等. 准格尔旗砒砂岩区沙棘蒸腾耗水与环境因子的关系[J]. 中国农业大学学报, 2018, **23**(6): 108-120. [LIU Long, YAO Yunfeng, GUO Yuefeng, et al. Correlations between the transpiration water consumption of Hippophae rhamnoides Linn and environmental factors in soft sandstone area of Zhungeer [J]. Journal of China Agricultural University, 2018, **23**(6): 108-120] DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2018.06.13
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社. 2000: 30-34, 202-204. [BAO Shidan. Soil agrochemical analysis [M]. 3rd. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30-34, 202-204]
- [10] NI Hangtian, HUANG Yubin. Rheological study on influence of mineral composition on viscoelastic properties of clay [J]. Applied Clay Science, 2020, **187**(105493): 1-5. DOI: 10.1016/j.clay.2020.105493
- [11] SOSIO R, CROSTA G B. Rheology of concentrated granular suspensions and possible implications for debris flow modeling [J]. Water Resources Research, 2009, **45**(3): W03412. DOI: 10.1029/2008WR006920
- [12] SCHIPPA L, DOGHIERI F, PELLEGRINO A M, et al. Thixotropic behavior of reconstituted debris-flow mixture [J]. Water, 2021, **13**(2): 153. DOI: 10.3390/w13020153
- [13] 李长明, 宋丽莎, 王立久. 砒砂岩的矿物成分及其抗蚀性[J]. 中国水土保持科学, 2015, **13**(2): 11-16. [LI Changming, SONG Lisha, WANG Lijiu. Mineral composition and anti-erodibility of Pisha sandstone [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, **13**(2): 11-16] DOI: 10.16843/j.sswc.2015.02.002
- [14] REINER M. Ueber die strömung einer elastischen Flüssigkeit durch eine Kapillare [J]. Kolloid-Zeitschrift, 1926, **39**(1): 80-87. DOI: 10.1007/BF01425357
- [15] BINGHAM E C. Fluidity and plasticity [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1922: 134-135.
- [16] HERSCHEL W H, BULKLEY R. Konsistenzmessungen von gummi-benzollösungen [J]. Kolloid-Zeitschrift, 1926, **39**(4): 291-300. DOI: 10.1007/BF01432034
- [17] O'BRIEN J S, JULIEN P Y. Laboratory analysis of mudflow properties [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, **114**(8): 877-887. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:8(877)
- [18] 彭逸明, 马昆林, 于连山, 等. 新拌水泥浆体在不同流变模型下流变参数表征适用性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, **18**(4): 934-941. [PENG Yiming, MA Kunlin, YU Lianshan, et al. Applicability of rheological parameters characterization of fresh cement paste under different rheological models [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, **18**(4): 934-941] DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/ut.20200522

- [19] COUSSOT P, PIAU J M. A large-scale field coaxial cylinder rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions [J]. *Journal of Rheology*, 1995, **39**(1): 105 – 124. DOI: 10.1122/1.550693
- [20] XU Jingyu, HUHE A. Rheological study of mudflows at Lianyungang in China [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2016, **31**(1): 71 – 78. DOI: 10.1016/j.ijsrc.2014.06.002
- [21] BURNS K, GABET E J. The effective viscosity of slurries laden with vegetative ash [J]. *Catena*, 2015, **135**: 350 – 357. DOI: 10.1016/j.catena.2014.06.008
- [22] 刘晓磊, 陈安铎, 张红, 等. 黄河水下三角洲高浓度黏性泥沙流变特性及其影响因素[J]. *海洋学报*, 2021, **43**(5): 127 – 134. [LIU Xiaolei, CHEN Anduo, ZHANG Hong, et al. Rheological characteristics and its influencing factors of dense cohesive sediments in the Huanghe River subaqueous delta [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2021, **43**(5): 127 – 134] DOI: 10.12284/hyxb2021083
- [23] OLHERO S M, FERREIRA J M F. Influence of particle size distribution on rheology and particle packing of silica-based suspensions [J]. *Powder Technology*, 2004, **139**(1): 69 – 75. DOI: 10.1016/j.powtec.2003.10.004
- [24] 杨红娟, 韦方强, 胡凯衡, 等. 不同上限粒径泥石流浆体的流变参数变化规律[J]. *水利学报*, 2016, **47**(7): 884 – 890. [YANG Hongjuan, WEI Fangqiang, HU Kaiheng, et al. Rheological parameters of debris flow slurries with different maximum grain sizes [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(7): 884 – 890] DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150931
- [25] 季宪军, 梁瑛, 潘华利, 等. 含水率对泥石流浆体力学特性影响实验研究[J]. *山地学报*, 2019, **37**(1): 70 – 77. [JI Xianjun, LIANG Ying, PAN Huali, et al. Experimental study on influence of water content on mechanical properties of debris flow slurry [J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(1): 70 – 77] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000400
- [26] DEL GAUDIO P, VENTURA G. Flow behavior of clay-silt to sand-silt water-rich suspensions at low to high shear rates: Implications for slurries, transitional flows, and submarine debris-flows [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2018, **92**(6): 2395 – 2404. DOI: 10.1111/1755-6724.13735
- [27] 王贵荣, 董晨, 段钊, 等. 粗颗粒组分含量对中细砂抗剪强度的影响[J]. *西安科技大学学报*, 2020, **40**(1): 24 – 30. [WANG Guirong, DONG Chen, DUAN Zhao, et al. Effect of coarse particle content on shear strength of medium sand [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2020, **40**(1): 24 – 30] DOI: 10.13800/j.cnki.xakjdxxb.2020.0104

## Rheological Properties of Typical Pisha Sandstone Soil Slurry

ZHOU Lin<sup>1,3</sup>, HU Feinan<sup>1,2\*</sup>, XU Chenyang<sup>2</sup>, WANG Jinxiao<sup>2</sup>, LEI Xueer<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The exposed bedrocks in Pisha sandstone area provide great amounts of debris, on which mud can be easily formed while encountering with water, thus generating slope mudflows. Mudflow is a severe type of soil erosion. The researches on mudflow focused on its triggering mechanisms and sand transport amounts, but less attention was paid to the flow process and evolving patterns of the mudflow. There was still a lack of research reports on stress-strain law and rheological characteristics of slope mudflow.

In this study, rheometer was adopted to investigate the rheological properties of slurries from four typical Pisha sandstone soils (PSS), namely purple PSS, brown PSS, red PSS and white PSS, with different solid volume concentrations ( $C_v$ ). The rotating shear mode was used to analyze the effects of shear rate and  $C_v$  on their rheological parameters. Results showed that: (1) When  $C_v$  of the PSS slurries was high, as the shear rate increased, the shear stress of the soil slurries increased, and the viscosity decreased, showing the characteristics of shearing thinning. When the  $C_v$  was reduced, earth-like PSS (purple and brown PSS) slurries showed the transformation from shear thinning to shear thickening earlier than sand-like PSS (red and white PSS) slurries.

(2) With the increase of  $C_v$ , the shear stress and viscosity of all PSS slurries increased; and there was an clear inflection point ( $C_v = 0.41$ ) in the variations of rheological parameters for earth-like PSS. (3) At high  $C_v$ , the shear stress and viscosity of earth-like PSS were greatly affected by  $C_v$ ; while at low  $C_v$ , the shear stress and viscosity of sand-like PSS slurries were greatly affected by  $C_v$ . The findings provide theoretical references for further understanding the flow patterns of PSS slurries and evaluating the slurry ricks in Pisha sandstone area.

**Key words:** slurry; rheological properties; rotational shear; stress-strain; Pisha sandstone

(责任编辑 钟雨倩)