

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.016

张元元, 高建恩, 李文证, 等. 磷素对含沙水流流体变异特性影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 22-30, 39.

ZHANG Yuanyuan, GAO Jian'en, LI Wenzheng, et al. Influence of phosphorus on the fluid variability characteristics of sediment-laden flow[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 22-30, 39.

## 磷素对含沙水流流体变异特性影响

张元元<sup>1,2,4,5</sup>, 高建恩<sup>1,2,3,4,5</sup>, 李文证<sup>3,5</sup>, 高哲<sup>6</sup>, 王照润<sup>3,5</sup>, 王鹭<sup>3,5</sup>

(1. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨陵 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 4. 中国科学院大学, 北京 100101; 5. 水利部水土保持生态工程技术研究中心, 陕西 杨陵 712100; 6. 西北林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100)

**摘要:** [目的] 为探明磷素对含沙水流流体变异特性的影响。[方法] 采用自制双竖管流变仪, 研究了磷素对不同浓度含沙水流流体类型、流变参数及流体发生变异的临界阈值的影响。[结果] (1) 磷素浓度、泥沙浓度及泥沙理化性质是影响含沙水流发生流体变异的主要因素。在 25 °C 下, 过磷酸钙浓度每增加 0.1 g/cm<sup>3</sup>, 黏滞系数和宾汉极限剪切力分别增加 0.48~1.47 mPa·s 和 3.49~6.84 N/m<sup>2</sup>。(2) 随着磷素和泥沙含量的增大, 含磷素的含沙水流由牛顿流体变异为宾汉流体。构建并验证了磷-泥沙水流黏滞系数和宾汉极限剪切力等流变参数的计算模型。(3) 给出了磷-泥沙水流流体变异的临界浓度阈值。当磷素浓度从 0 增加至 0.45 g/cm<sup>3</sup> 时, 含沙水流的流体变异临界浓度阈值降低 49%, 说明磷素的存在加速了含沙水流的流体变异。[结论] 磷素的增加使得侵蚀水流更容易由牛顿流体变异为宾汉流体, 从而影响侵蚀流内部的能量耗散过程, 研究结果为深入认识侵蚀污染水流的输移机制提供了新的科学基础。

**关键词:** 流体变异; 流变模型; 非牛顿流体; 磷素污染; 含沙水流

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)01-0022-09

## Influence of Phosphorus on the Fluid Variability Characteristics of Sediment-laden Flow

ZHANG Yuanyuan<sup>1,2,4,5</sup>, GAO Jian'en<sup>1,2,3,4,5</sup>, LI Wenzheng<sup>3,5</sup>, GAO Zhe<sup>6</sup>, WANG Zhaorun<sup>3,5</sup>, WANG Lu<sup>3,5</sup>

(1. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China; 5. Research Center on Soil & Water Conservation, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 6. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to explore the effect of phosphorus on the fluid variability characteristics of sediment-laden flows. [Methods] A self-made double vertical tube rheometer was used to study the influence of phosphorus on fluid types, rheological parameters, and the critical threshold of fluid variation in sediment-laden flows with different concentrations. [Results] (1) Phosphorus concentration, sediment concentration, and physical and chemical properties of sediment were the main factors influencing the fluid variability in sediment-laden flows. At 25 °C, the viscosity coefficient and Bingham yield stress increased by 0.48~1.47 mPa·s and 3.49~6.84 N/m<sup>2</sup>, respectively, with an increase of 0.1 g/cm<sup>3</sup> in calcium superphosphate concentration. (2) With the increase of phosphorus and sediment content, phosphorus-laden sediment-laden flows transitioned from Newtonian fluid to Bingham fluid. A computational model was

收稿日期: 2023-05-17

修回日期: 2023-05-26

录用日期: 2023-06-18

网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-11-10

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1900700, 2017YFC0504703); 陕西省重点研发计划项目 (2020ZDLSF06-03-01); 国家自然科学基金项目 (41877078, 41371276)

第一作者: 张元元 (1993—), 女, 博士, 主要从事流域水环境研究。E-mail: yuanyuan2567@163.com

通信作者: 高建恩 (1962—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持工程。E-mail: gaojianen@126.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

developed and validated to calculate rheological parameters such as viscosity coefficient and Bingham yield stress. (3) The critical concentration threshold for the fluid variability of phosphorus-sediment-laden flows was given. When phosphorus concentration increased from 0 to  $0.45 \text{ g/cm}^3$ , the critical concentration threshold for fluid variability in sediment-laden flows decreased by 49%, indicating that the presence of phosphorus accelerated the fluid variability of sediment-laden flows. Therefore, the increase of phosphorus promoted the process of erosion water flow from Newtonian fluid to Bingham fluid, which affected the energy dissipation process in the erosion flow. [Conclusion] The research findings provide a new scientific basis for in-depth understanding of the transport mechanism of erosive polluted water flows.

**Keywords:** fluid variation; rheological model; non-Newtonian fluid; phosphorus pollution; sediment-laden flow

Received: 2023-05-17

Revised: 2023-05-26

Accepted: 2023-06-18

Online(www.cnki.net): 2023-11-10

随着黄土高原退耕还林(草)工程的推进和高标准农田建设的实施,坡沟立体开发模式在小流域得到广泛应用。但由于下垫面的剧烈改变、磷肥的过量施用以及其他形式的磷污染排放导致暴雨径流中的含沙水流磷污染加剧<sup>[1]</sup>。据调查<sup>[2]</sup>,雨滴击溅可使洼地含沙量高达  $500 \text{ kg/m}^3$  以上,而土壤中磷素丰富,导致暴雨径流形成的高污染含沙水流产生更强的冲刷力,给侵蚀水环境带来严重威胁<sup>[3]</sup>。因此,探究磷素—泥沙混合水流的流体变异特性对深入认识侵蚀污染水流的输移机制至关重要。

流变特性作为含沙水流最基本的力学特性<sup>[4]</sup>,国内自 20 世纪 60 年代开始进行研究,已有研究<sup>[5]</sup>认为,高浓度含沙水流是宾汉流体,黏滞系数和宾汉极限剪切力是表征流体变异特性的流变参数。钱宁<sup>[6]</sup>研究发现,由于不同地区泥沙理化性质的差异,导致相同浓度含沙水流的流变参数差异极大;窦国仁等<sup>[7]</sup>研究认为,层间的极限剪切力除了受到两层间的颗粒左右,还应该考虑邻近层的影响,并引入极限含沙量和泥沙吸附力,推导出宾汉极限剪切力的计算方法。在降雨径流条件下,磷素易被土壤中钙、铁、铝等化合物固定,随泥沙一起运动,因而成为侵蚀水流的重要组成部分。刘晓君等<sup>[8]</sup>研究了丹江小流域不同年份小流域各断面径流及磷素流失规律后发现,径流量是影响磷素流失的关键因子,尤其是不同降雨强度条件下径流量对磷素流失的影响作用差异显著;王宝琛<sup>[9]</sup>进一步研究发现,降雨径流是驱动磷素污染负荷的内在动力,降雨初期磷元素随径流冲刷迁移,降雨后期磷素随侵蚀泥沙迁移;RAMOS 等<sup>[10]</sup>在研究小流域降雨事件与土壤性质的关系时发现,极端降雨事件后,河床中的磷素以较高浓度暴露,这对磷素循环和水污染产生显著影响;WU 等<sup>[11]</sup>和 AO 等<sup>[12]</sup>研究认为,雨滴动能的增加,能够显著提高侵蚀径流中的养分浓度,并增加养分流失量。综上,不同研究者主要

关注的是含沙水流的流变特性,以及磷素的运移方式,在磷素对含沙水流流体变异特性的影响研究方面还存在一定的不足。

本研究针对磷素对含沙水流流体变异特性研究薄弱的问题,以过磷酸钙为磷素来源,通过双竖管流变仪,研究了磷素浓度变化对含沙水流流体类型及流变参数的影响,建立了磷素污染水流黏滞系数、宾汉极限剪切力的计算模型,并给出流体变异的临界阈值,研究结果为深入揭示侵蚀污染水流的输移机制提供了科学基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置与材料

本研究中的泥沙样品均来源于陕西省延安市宝塔区李渠镇羊圈沟流域( $109^{\circ}31'E, 36^{\circ}42'N$ ),土壤样品的类型为黄绵土。通过激光粒度仪(Mastersizer2000 型,英国 Malvern Instrument Ltd.)测定泥沙样品的机械组成(图 1)。经测定土样中的黏粒、粉粒和砂粒的含量分别为 14.34%, 65.22%, 18.53%, 中值粒径约为  $0.025 \text{ mm}$ 。试验土样中的初始全氮(TN)、全磷(TP)和全钾(TK)的含量分别为 0.41, 0.52,  $4.50 \text{ g/kg}$ 。

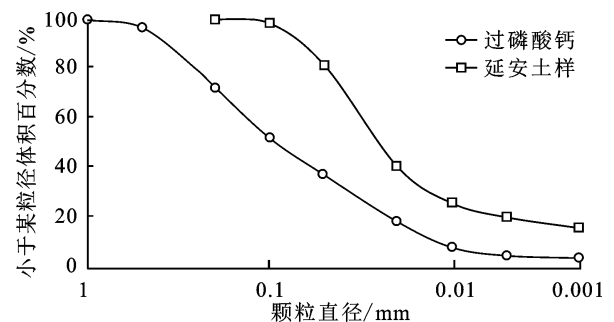


图 1 试验原料的粒径组成

Fig. 1 Particle size composition of test materials

供试磷素来源为过磷酸钙  $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot$

$\text{H}_2\text{O}$ , 有效五氧化二磷  $\geq 16\%$ , 速溶五氧化二磷  $\geq$

11.0%, 硫 $\geq 8.0\%$ ; 云南安宁兴亚磷化工有限责任公司]。试验仪器采用西北农林科技大学自制的双竖管流变仪<sup>[13]</sup>, 由 2 根直径为 3 mm, 长度分别为 900, 1 600 mm 的细紫铜管组成, 内壁平滑规整, 细管顶端各接同一尺寸的漏斗, 仪器的基本结构见图 2。试验前将待测浆体置于恒温水浴锅 (Kewei/HH-S8, China) 中, 控制温度在  $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ , 并在试验前后用高精密度水银温度计 (测量范围为  $0 \sim 50^\circ\text{C}$ , 精度  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ) 测定细管出口处浆体的温度并记录。

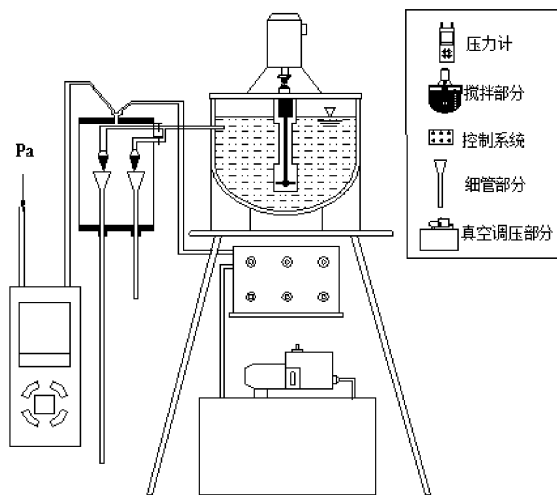


图 2 双竖管流变仪的结构和原理示意

Fig. 2 The structure and principle of double vertical tube rheometer

## 1.2 试验设计与过程

试验在西北农林科技大学水利与建筑工程学院的泥沙实验室进行。为了保证试验结果的准确性, 实验室进行了全面的密封和恒温恒湿处理, 室内温度控制在  $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  以内。试验制备的浆体也在恒温水浴锅 (Kewei/HH-S8, China) 中进行温度控制, 待温度恒定在  $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  后, 再进行试验。采用去离子水、黄土、过磷酸钙肥料制备磷素污染水流。称取一定量的去离子水于盛样桶中, 缓慢搅动, 慢慢加入土样, 大块土壤颗粒可压碎后加入。搅拌均匀后用 0.5 mm 的筛过滤去除树叶、根系和碎石等杂质。根据黄土丘陵沟壑区不同坡位形成径流时所出现的最大含沙量的统计资料<sup>[14]</sup>, 设计包括 0, 200, 300, 400, 600  $\text{kg}/\text{m}^3$  在内的 5 组含沙浓度 (含清水对照)。在试验中, 水流实际含沙量 ( $C_s$ ) 通过取样测定细管出口处的含沙量来确定, 分别为 0, 216, 277, 423, 597  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。在雨滴击溅和径流侵蚀作用下, 磷肥的初始浓度理论上很高, 但在不堵塞双竖管流变仪细管的条件下, 在  $0 \sim 423 \text{ kg}/\text{m}^3$  的设计含沙量范围内, 过磷酸钙浓度分别为 0, 0.083, 0.160, 0.250, 0.317, 0.417  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。而在 597  $\text{kg}/\text{m}^3$  的设计含沙量下, 过磷酸钙浓度

分别为 0, 0.083, 0.120, 0.160, 0.200, 0.240  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。细管出口处的流量主要通过给隔离罐真空减压来实现, 为了保证层流, 出口处流量控制在  $0 \sim 4.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ 。

将制备好的浆体置于恒温水浴锅中进行温度控制, 待温度恒定在  $(25 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  后, 将制备好的泥浆倒入双竖管流变仪的储浆罐中, 打开电机进行搅拌, 防止固体物质沉降对试验浓度产生影响。打开流量控制阀, 让浆体流入漏斗, 给细管漏斗充分排气, 用塞子把细管出口封住, 关闭流量控制阀。打压调压阀, 同时观察压力计, 当压力表的压差达到设定值时, 关闭真空泵和调压阀的开关, 记录此时压力表的读数。然后, 打开流量控制阀, 取下长管 (或短管) 出口处的塞子, 让样品流出, 同时观察隔离罐内漏斗中浆体液面情况, 并用流量调节阀调至液面与漏斗上沿齐平。此时, 用量筒收集细管中流出的浑水至一定体积, 并用秒表计时并记录量筒内的浑水体积、接流时间, 即完成第 1 个测点。重复调压操作, 直到完成 10 组以上的测量点后换另外一个细管继续进行试验。上述试验均保证在层流条件下进行, 并在试验前后使用水银温度计测量细管出口浑水的温度, 取平均值作为试验温度。试验结束后, 测定出口处所接样品的泥沙含量和磷素含量。

## 1.3 测试的理论基础

毛细管流变仪是流变参数测定的重要手段, 其主要特点是在已知细管的尺寸和出口流速的基础上, 测定浆体在层流状态下的摩阻水头损失, 然后通过压力控制, 得到一系列流速范围的剪切力曲线。为了保证层流条件, 一般要求细管的长度和直径之比大于 1 000。其次, 流变参数计算需要确定动能修正系数 ( $\alpha$ ) 和局部阻力系数 ( $\beta$ ) 的数值, 大多数研究选用已知黏度的清水水流进行反算, 给试验结果造成一定误差。试验选用的双竖管流变仪由王敬昌自主设计, 通过双管作差法, 有效消除动能修正系数和局部阻力系数的取值对试验结果的影响。测试的理论基础为:

首先将长管和短管的沿程阻力表达式用伯努利方程导出<sup>[13]</sup>, 见公式 (1) 和公式 (2):

$$h_f = L_1 + \frac{P}{\gamma_m} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - (\alpha_2 + \beta) \frac{V_2^2}{2g} \quad (1)$$

$$h_f' = L_2 + \frac{P'}{\gamma_m} + \frac{\alpha_1' V_1'^2}{2g} - (\alpha_2' + \beta') \frac{V_2'^2}{2g} \quad (2)$$

式中:  $h_f$ 、 $h_f'$  分别为长管和短管的沿程损失;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_1'$  分别为长管进口和出口动能修正系数;  $\alpha_2$ 、 $\alpha_2'$  分别为短管进口和出口动能修正系数;  $\beta$ 、 $\beta'$  分别为长管和短管进口局部损失系数;  $V_1$ 、 $V_2$  分别为长管进口、出口处流速 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $V_1'$ 、 $V_2'$  进口、出口处流速 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $L_1$ 、

$L_2$  为长短管的长度(m);  $P, P'$  为隔离罐内的压强(Pa);  $\gamma_m$  为浆体密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $g$  为重力加速度( $\text{m}/\text{s}^2$ );

其次,令

$$L_1 + \frac{P}{\gamma_m} = H_1 \quad (3)$$

$$L_2 + \frac{P'}{\gamma_m} = H_2 \quad (4)$$

当  $V_2 = V_2'$  时,有  $\alpha_1 = \alpha_1', \alpha_2 = \alpha_2', \beta = \beta'$ , 则

$$\begin{aligned} \Delta h_f &= h_f - h_f' = \left( L_1 + \frac{P}{\gamma_m} \right) - \left( L_2 + \frac{P'}{\gamma_m} \right) \\ &= H_1 - H_2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\Delta h_f$  为  $H$  段细管的沿程损失。当  $\gamma_m$  不变时,  $H_1$  和  $H_2$  均是流速  $V$  的函数,即  $H_1 = f_1(V), H_2 = f_2(V)$ ; 通过试验分别测得长管 ( $H_{1i}, V_i$ ) 和短管 ( $H_{2i}, V_i$ ) ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 的试验数据,点绘后可得  $H_1 \sim V, H_2 \sim V$  关系曲线,将长短管的两曲线相减,从而可得  $\Delta h_f \sim V$  关系曲线。

管壁处的剪切力 ( $\tau_w$ ) 的计算方法为:

$$\tau_w = \frac{D \gamma_m g \Delta h_f}{4H} \quad (6)$$

式中:  $D$  为细管直径(m);  $\gamma_m$  为浑水密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\Delta h_f$  为  $H$  段细管的沿程损失(m);  $H$  为长短管的长度差(m);  $\tau_w$  为管壁切应力( $\text{N}/\text{m}^2$ )。

对于牛顿流体采用的巴塞尔方程,见公式(7):

$$\mu = \frac{\tau_w}{8V/D} \quad (7)$$

式中:  $\mu$  为流体的黏滞系数 [ $(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}^2$  或  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]。

对于宾汉及牛顿流体,可以用布金海姆方程表示,见公式(8)。

$$\frac{8V}{D} = \frac{\tau_w}{\eta} \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{\tau_B}{\tau_w} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{\tau_B}{\tau_w} \right)^4 \right] \quad (8)$$

式中:  $\tau_B$  为极限剪切力 ( $\text{N}/\text{m}^2$ );  $\eta$  为刚度系数 [ $(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}^2$  或  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ]。当  $\tau_B = 0$  时,流体为牛顿流体;当  $\tau_B > 0$  时,流体为宾汉流体。当  $\frac{8V}{D}$  足够大,  $\frac{1}{3} \left( \frac{\tau_B}{\tau_w} \right)^4$  则足够小,忽略后者,公式(8)可以简化为成公式(9)。

$$\tau_w = \frac{4}{3} \tau_B + \frac{8V}{D} \eta \quad (9)$$

此时,  $\Delta h_f \sim V$  在层流的高速流段(直线段),取不同的值代入,可以得简化后的虚流变关系式。 $\eta$  为直线斜率,  $\frac{4}{3} \tau_B$  为截距。应注意的是,公式(9)是基于  $\tau_w \gg \tau_B$  的数据点,忽略  $\frac{\tau_B}{\tau_w}$  的近似解。

在流变参数计算模型的精度评估方面,选择有效系数( $R^2$ )、纳什效率系数(NSE)和相对偏差百分比(PBIAS)进行评价。当  $R^2$  和 NSE 越接近 1 时, PBIAS 越接近 0,说明模型的模拟效果越好<sup>[15]</sup>。

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{mea}} - Y_{\text{mean}}^{\text{mea}}) (Y_i^{\text{cal}} - Y_{\text{mean}}^{\text{cal}}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{cal}} - Y_{\text{mean}}^{\text{cal}})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{mea}} - Y_{\text{mean}}^{\text{mea}})^2} \quad (10)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{mea}} - Y_i^{\text{cal}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{mea}} - Y_{\text{mean}}^{\text{mea}})^2} \quad (11)$$

$$\text{PBIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{mea}} - Y_i^{\text{cal}})}{\sum_{i=1}^n Y_i^{\text{mea}}} \times 100\% \quad (12)$$

式中:  $Y_i^{\text{cal}}$  为计算值;  $Y_{\text{mean}}^{\text{cal}}$  为计算平均值;  $Y_i^{\text{mea}}$  为测量值;  $Y_{\text{mean}}^{\text{mea}}$  为测量平均值;  $n$  为样本个数。

## 2 结果与分析

### 2.1 磷素对清水水流流体变异特性的影响

( $25 \pm 0.5$ ) $^{\circ}\text{C}$  下,使用双竖管流变仪对不同浓度过磷酸钙水流进行流变试验,并绘制相应浓度下的虚流变曲线。由图 3 可知,当过磷酸钙的浓度由 0 增加至  $0.417 \text{ g}/\text{cm}^3$  时,流体的剪切应力随剪切速率呈线性增加,斜率从  $0.89 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  增加至  $2.34 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,较同温度的去离子水的黏滞系数增加 162.92%。且各浓度磷素水流的虚流变曲线均过坐标原点,根据公式(7)可以推断,此时的流变曲线符合巴塞尔方程的形式,因此这一浓度范围的磷素水流为牛顿流体。

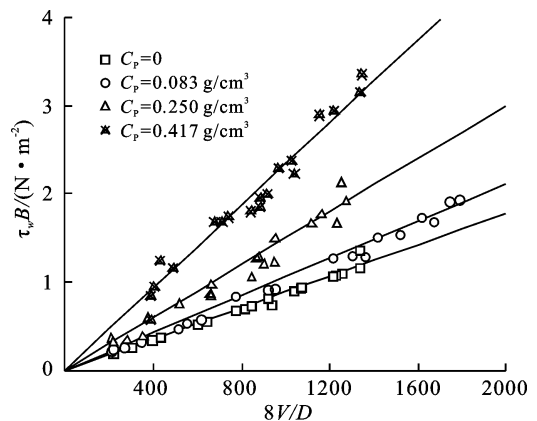


图 3 不同浓度磷素水流的虚流变曲线

Fig. 3 Virtual rheological curves of water flow with different concentrations of phosphorus

### 2.2 磷素浓度变化对含沙水流流体变异特性的影响

不同浓度磷素—泥沙水流的虚流变曲线见图 4。当含沙量为  $216 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 过磷酸钙浓度小于  $0.083 \text{ g}/\text{cm}^3$  时,其虚流变曲线为过坐标原点的直线,符合巴

塞尔方程的形式,即公式(7)。当过磷酸钙浓度在  $0.250 \sim 0.417 \text{ g/cm}^3$  时,流变曲线为有截距的直线段。当磷素浓度由 0 增加至  $0.417 \text{ g/cm}^3$  时,黏滞系数和宾汉极限剪切力分别变化于  $2.21 \sim 5.03 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  和  $0 \sim 0.20 \text{ N/m}^2$ ,黏滞系数和宾汉极限剪切力随磷素浓度的增加而增大,流体由牛顿流体向宾汉流体过渡。当含沙量为  $597 \text{ kg/m}^3$  时,虚流变曲线的斜率和截距均随着磷素含量的增加而增加,当磷素浓度由 0

增加至  $0.2 \text{ g/cm}^3$  时,黏滞系数和宾汉极限剪切力的变化于  $5.78 \sim 9.07 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  和  $1.83 \sim 3.14 \text{ N/m}^2$ ,符合布金海姆方程,见公式(8)。特别是在高流速段,可以近似看作一条有截距的直线段,同公式(9)一致。流体呈现出宾汉流体的特征。

由此可以看出,随着泥沙和磷素含量的增加,流体逐渐由牛顿流体变异为宾汉流体,在高含沙量的混合流体中尤为明显。

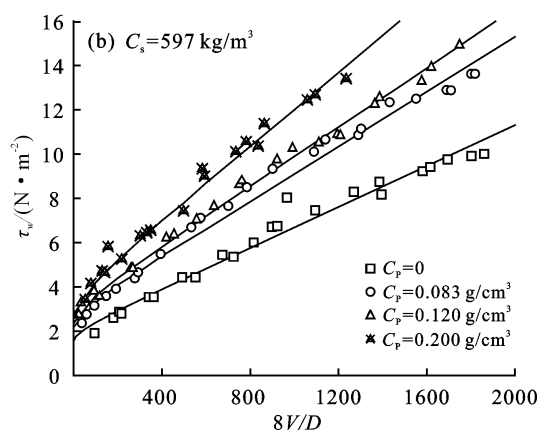
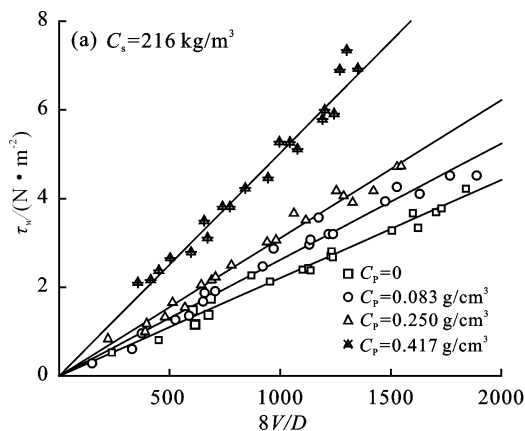


图 4 不同浓度磷素—泥沙水流的虚流变曲线

Fig. 4 The virtual rheological curves of phosphorus—sediment flow with different concentrations

### 2.3 磷素浓度的变化对含沙水流流变参数的影响

为了探究磷素对含沙水流流变特性的影响,绘制了  $0 \sim 597 \text{ kg/m}^3$  5 组实测含沙量下磷素浓度与黏滞系数和宾汉极限剪切力的关系曲线(图 5)。

相同的磷素含量,泥沙含量越高,黏滞系数越大。相同含沙量下,过磷酸钙的浓度平均每增加  $0.1 \text{ g/cm}^3$ ,黏滞系数分别增加  $0.477, 1.093, 1.514, 1.426$ ,

$1.469 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。当含沙量在  $0 \sim 216 \text{ kg/m}^3$  时,  $0 \sim 0.3 \text{ g/cm}^3$  浓度范围的过磷酸钙水流没有宾汉极限剪切力。当含沙量  $> 277 \text{ kg/m}^3$  时,随着磷素含量的增加,浑水的宾汉极限剪切力随磷素浓度的增加呈线性增加,过磷酸钙浓度每增加  $0.1 \text{ g/cm}^3$ ,宾汉极限剪切力增长量在  $3.49 \sim 6.84 \text{ N/m}^2$ ,此时流体为宾汉流体。

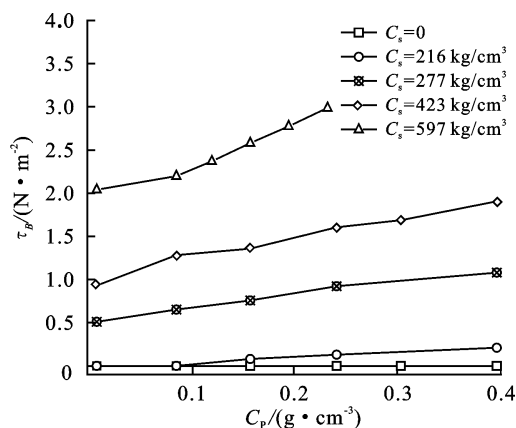
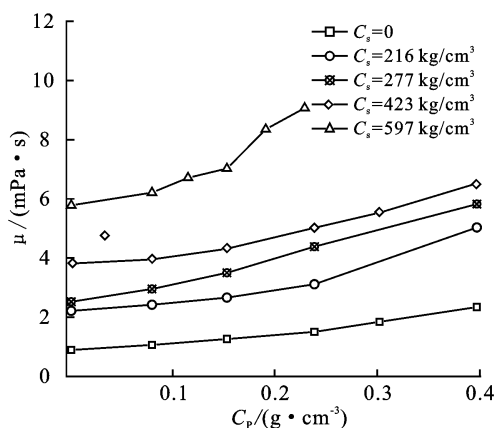


图 5 不同浓度含有磷—泥沙水流浓度与黏滞系数和宾汉极限剪切力的关系曲线

Fig. 5 The relationship between the concentration of phosphorus—sediment flow with different concentrations and the viscosity coefficient and the Bingham limit shear force

### 2.4 磷素污染水流流变参数计算模型

2.4.1 相对黏滞系数计算 基于前人<sup>[6]</sup>的黏滞性计算方程,引入磷浓度这一参数,见公式(13)。

$$\mu_r = (1 - K' S_v - m_p C_p)^{-2.5} \quad (13)$$

式中: $\mu_r$  为流体黏度与同温度下去离子水黏滞系数之比; $C_p$  为过磷酸钙含量( $\text{g/cm}^3$ ); $S_v$  为体积含沙量; $K'$  为泥沙的有效浓度系数,与含沙量和粒径级配有关,计算方程见公式(16); $m_p$  为与泥沙浓度和磷素浓

度有关的参数。

$$K' = \begin{cases} \frac{1}{S_{vm}} & S_v < 0.05 \\ \frac{1}{S_{vm}} + 0.01S_v^{-2} & 0.05 \leq S_v \leq 0.27 \\ \frac{1}{S_{vm}} + 0.26 \times 10^{-8} S_v^{-10} & S_v > 0.27 \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $S_{vm}$  的计算方法<sup>[16]</sup>为:

$$S_{vm} = \frac{1}{0.0036 \sum (p_i/d_i) + 1.54} \quad (15)$$

通过实测黏滞系数的测定结果,对公式(13)中的参数  $m_p$  进行求解,这一参数受到含沙量和过磷酸钙浓度的双重影响,图形关系见图 6。经验表达式见公式(16),  $R^2$  为 0.83。

$$m_p = 0.76 - 3.2S_v + 0.19C_p - 1.46S_v^2 - 0.44C_p^2 \quad (16)$$

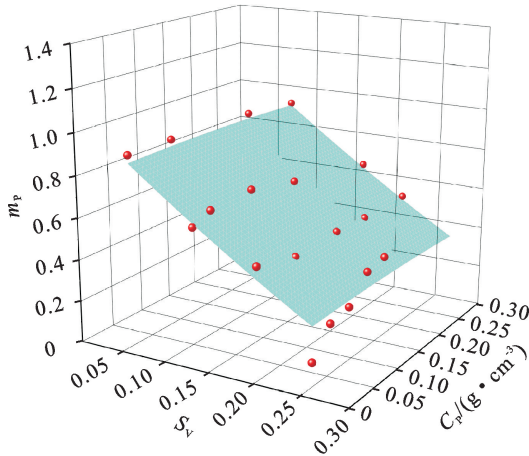


图 6 泥沙浓度、磷浓度与参数  $m_p$  的关系

Fig. 6 Relationship between sediment concentration, phosphorus concentration and parameter  $m_p$

将(14)和(16)代入(13)中,进一步整理,得到了磷素污染水流相对黏滞系数的计算模型,见公式(17)。

$$\mu_r = \begin{cases} \left( 1 - \frac{S_v}{S_{vm}} + 3.2S_v C_p - 0.19C_p^2 \right)^{-2.5} & S_v < 0.05 \\ \left( 1 - \frac{S_v}{S_{vm}} - \frac{1}{100S_v} + 3.2S_v C_p - 0.19C_p^2 + 1.46S_v^2 C_p + 0.44C_p^3 - 0.76 \right)^{-2.5} & 0.05 \leq S_v \leq 0.27 \\ \left[ 1 - \frac{S_v}{S_{vm}} - \left( \frac{0.11}{S_v} \right)^9 + 3.2S_v C_p - 0.19C_p^2 + 1.46S_v^2 C_p + 0.44C_p^3 - 0.76 \right]^{-2.5} & S_v > 0.27 \end{cases} \quad (17)$$

2.4.2 宾汉极限剪切力计算 当水流中只有泥沙,没有磷素等其他污染物杂质时,可以将泥沙颗粒概化为球体,宴国仁等<sup>[7]</sup>从粒间黏着力角度推导出含沙

水流宾汉极限剪切力的计算公式为:

$$\tau_B = \sigma_0 \sum P_i \delta / d_i g \frac{S_v}{\left( 1 - \frac{S_v}{S_{vm}} \right)^2} \quad (18)$$

式中:  $\tau_B$  为宾汉极限剪切力 ( $N/m^2$ );  $\sigma_0$  为比例系数,与流体中固体材料和水质相关,一般情况下天然泥沙的  $\sigma_0 = 8 \text{ kg/m}^2$ ;  $\sum P_i / d_i$  表示粒径为  $d_i$  的颗粒占比  $P_i (\text{cm}^{-1})$ ;  $\delta$  为泥沙颗粒外层的水膜厚度,一般情况下  $\delta = 0.21 \times 10^{-4} \text{ cm}$ ;  $g$  为重力加速度 ( $N/kg$ );  $S_v$  为体积含沙量 ( $\text{kg/m}^3$ );  $S_{vm}$  为极限含沙量 ( $\text{kg/m}^3$ ),计算方法见公式(15)。

对于受磷素污染的含沙水流,其固体物质除泥沙外,还含有磷素,因而  $\sigma_0$  必然会引起一定的变化,本研究将此时的比例系数记作  $\sigma_p$ ,则公式(18)可以记作公式(19)。

$$\tau_B = \sigma_p \sum P_i \delta / d_i g \frac{S_v}{\left( 1 - \frac{S_v}{S_{vm}} \right)^2} \quad (19)$$

根据实测资料初步得到  $\sigma_p$  与泥沙和磷素含量的数量关系(图 7)。相同含沙量下,  $\sigma_p$  随磷素浓度的增加而增加,其关系见公式(20)。

$$\sigma_p = 18 - 135S_v + 12.3C_p + 345S_v^2 + 10C_p^2, \quad R^2 = 0.97 \quad (20)$$

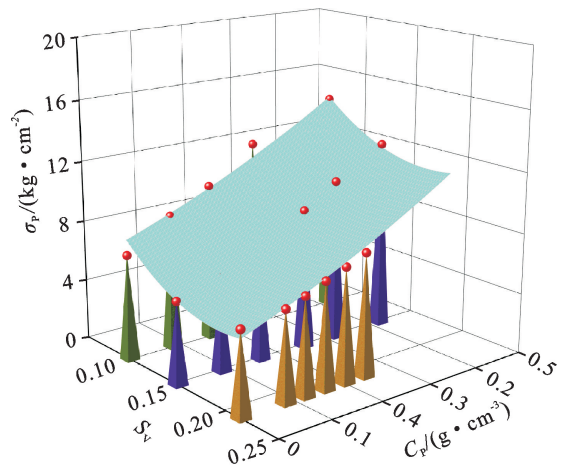


图 7 磷素浓度、泥沙含量与比例系数的关系

Fig. 7 Relationship between phosphorus concentration, sediment content and proportional coefficient

把公式(20)代入公式(19)中,可以得到泥沙—磷素混合流宾汉极限剪切力的计算模型,见公式(21)。

$$\tau_B = \frac{18S_v - 135S_v^2 + 12.3C_p S_v + 345S_v^3 + 10C_p^2 S_v}{\left( 1 - \frac{S_v}{S_{vm}} \right)^2} \quad (21)$$

2.4.3 流变参数模型的验证 图 8 为磷素—泥沙水流的相对黏滞系数和宾汉极限剪切力的实测值与采用

公式(17)和公式(21)计算的预测值之间的对比结果。大多数数据点显示出预测值与实测值之间的高度一致性,但在宾汉极限剪切力计算中有少数数据点偏离了理论值。通过对流变参数模型的评估,得出了相对黏滞系数和宾汉极限剪切力的  $R^2$ 、NSE 和 PBIAS 指标分别为 0.95, 0.94, -7% 和 0.95, 0.94, -11%。评估结

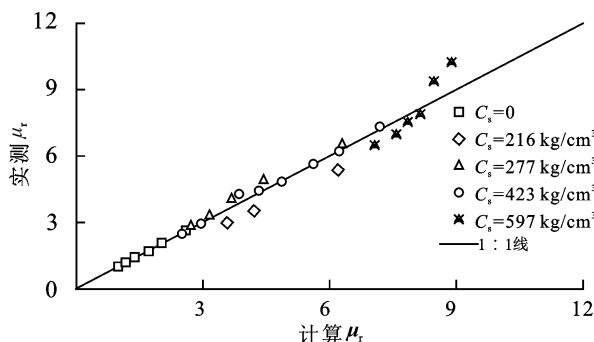


图 8 不同浓度磷-泥沙混合水流变参数的计算值与实测值的对比

果表明,公式(17)和公式(21)能够较好地计算含有磷素的水流的相对黏滞系数和宾汉极限剪切力,与实测值的一致性较高。虽然在宾汉极限剪切力计算中有一些数据点偏离了实测值,但整体而言,计算值与实测值之间的误差较小。因此,这一计算模型可以被应用于磷素污染水流的流变参数计算。

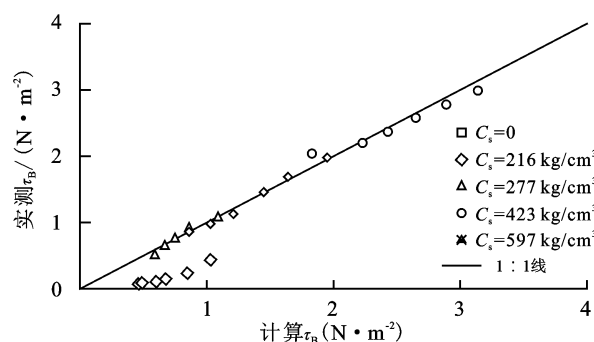


Fig. 8 Comparison of calculated and measured values of rheological parameters of phosphorus-sediment mixed flow with different concentrations

## 2.5 磷素浓度变化对含沙水流流体变异临界浓度阈值的影响

当泥沙和磷素含量超过一定阈值时,流体变异为宾汉流体,说明此时泥沙和磷素之间可能存在着复杂的物理化学作用,并形成一定的结构应力,当流体某个平面受到剪切作用时,固体颗粒随之发生抵抗作用,形成一定的抗剪应力。只有当剪切力大于宾汉极限剪切力时,流体才会发生运动,这一应力还可以支持一定数量泥沙不发生沉降<sup>[17]</sup>。因此流体变异临界阈值的研究非常重要。基于费祥俊<sup>[18]</sup>的 10 组花园口淤泥与粗沙资料、陈沁泽等<sup>[19]</sup>以及本研究中的黄土资料,绘制了极限含沙量与临界含沙量的关系曲线

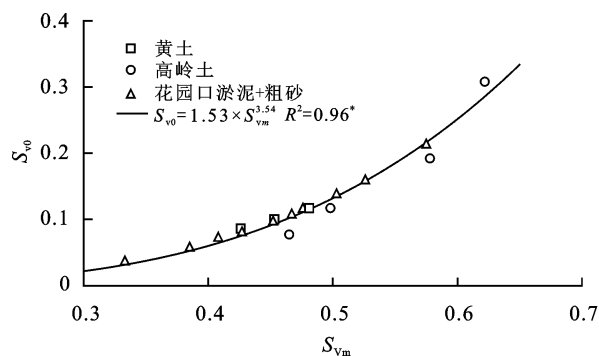


图 9 磷-泥沙水流流体变异的临界浓度阈值影响因素分析

Fig. 9 Analysis of influencing factors of critical concentration threshold of phosphorus-sediment flow fluid variation

根据公式(22)和公式(23)可以计算得到,当试验磷-泥沙混合水流中仅含有泥沙时,流体变异为非牛顿流体的临界含沙量约为 249 kg/m³。然后,根据宾汉极限剪切力的计算公式(21)进行试算,计算得到某一磷素含量下,当宾汉极限剪切力为 0.5 N/m² 时的临界含沙量,并绘制出临界含沙量与给定磷素含量的

(图 9),并给出二者的经验关系式,见公式(22)。

$$S_{v0} = 1.53 \cdot S_{vm}^{3.54} \quad (22)$$

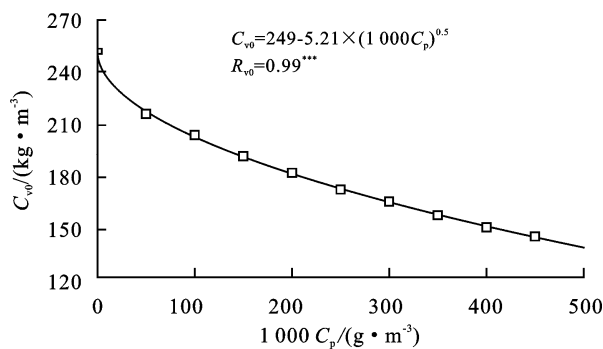
式中:  $S_{v0}$  为临界体积含沙量(kg/m³);  $S_{vm}$  为极限含沙量。

需要说明的是,在这一阈值难以通过试验精准测定,参考费祥俊<sup>[18]</sup>的研究,基于  $\tau_B = 0.5 \text{ N/m}^2$  为界的假定,认为此时的临界含沙量即为流体变异的临界阈值。

其中,临界体积含沙量与临界混合含沙量的换算,关系见公式(23)。

$$C_{v0} = \gamma_s S_{v0} \quad (23)$$

式中:  $C_{v0}$  为混合含沙量(kg/m³);  $\gamma_s$  为泥沙容重(kg/m³)。



关系曲线图 9。从图 9 可以看出,磷-泥沙混合水流的临界含沙量随着磷素含量的增加而呈幂指数型降低。当过磷酸钙浓度由 0 增加到 0.45 g/cm³ 时,临界含沙量从 249 kg/m³ 降低至 127 kg/m³,减少 49%。因此,这一结果表明,磷素的存在加速含沙水流由牛顿流体变异为非牛顿流体。

### 3 讨论

由结果分析可知,磷素对含沙水流的流体变异特性产生显著影响,磷素在清水水流中变异特性不显著,但是含磷素的含沙水流更容易变异为宾汉体。本试验发现,随着磷素和泥沙浓度的增大,磷素—泥沙水流的黏滞系数和宾汉极限剪切力呈同步增加的趋势。当泥沙和磷素含量超过一定阈值时,流体由牛顿流体更容易变异为宾汉流体。然而,在试验研究中也同样发现,当流体中没有泥沙仅有磷素时,随着磷素浓度增大,仅黏性增加,流体类型并未发生改变。这表明磷素和泥沙共同作用对流体变异起着关键作用。

YU等<sup>[20]</sup>研究指出,高含沙水流之所以发生流体变异的根本的原因在于黏性沙在自身或水体中离子的作用下,凝聚成絮凝结构。而絮凝的作用力主要由范德华力和双电层斥力的叠加来驱动<sup>[21]</sup>。对于过磷酸钙而言,其主要成分是磷酸二氢钙和硫酸钙,在清水介质中,磷酸二氢钙发生水解产生磷酸和氢氧化钙,而硫酸钙往往难溶于水<sup>[22]</sup>。因此,随着过磷酸钙添加量的增加,固体颗粒的数量和清水介质发生改变,固体颗粒相互碰撞概率增加,内摩擦力增大,导致流体的黏性增强。然而,过磷酸钙溶解度有限,颗粒间相互作用力较弱,颗粒间的结构力不会发生根本性改变<sup>[23]</sup>。这与人<sup>[6]</sup>的流变试验结果类似,当无黏性粗颗粒沙的体积浓度大于0.3~0.35时(此时含沙量约780~910 kg/m<sup>3</sup>),流体才会由牛顿流体变异为非牛顿流体。针对磷素—泥沙混合水流,磷素以弱酸性形式存在于水溶液中<sup>[22]</sup>,而试验泥沙水流呈弱碱性,随着磷素浓度的增大,为流体带来更多的电荷离子,它们吸附在泥沙颗粒表面<sup>[24]</sup>。这种吸附作用促进泥沙颗粒之间的搭接,并形成网状结构,从而显著影响含沙水流的流体变异行为。这与张彩<sup>[25]</sup>发现泥沙含量的增加会增加泥沙对磷素的吸附解吸过程的结果相似。

此外,本研究还发现,当过磷酸钙浓度由0增加到0.45 g/cm<sup>3</sup>时,流体变异的临界含沙量从249 kg/m<sup>3</sup>降低至127 kg/m<sup>3</sup>,减少49%。说明磷素的存在加速含沙水流由牛顿流体变异为非牛顿流体。这是由于泥沙表面多带负电荷,由于静电吸附作用,泥沙颗粒表面距离很近的离子除了受到静电吸附作用外,还受到布朗运动影响<sup>[6]</sup>。磷素浓度的增加,引起范德华引力和双电层斥力的平衡被改变,粒子间能量壁垒减少,发生絮凝的概率增强,进而导致黏着力增强,这与李杰等<sup>[26]</sup>在分析有机物与其他无机物耦合作用对泥沙絮凝影响的理论类似,说明磷素能够加速含沙水流由牛顿流体变异为非牛顿流体。

在对坡面降雨径流侵蚀的流动和阻力进行研究

时,离不开流体类型和流变参数的影响。ZHAO等<sup>[27]</sup>研究发现,随着含沙量的增加,黏滞系数增大,雷诺数减小,水流紊动强度减弱,坡面流由紊流向过渡流发展;ZHANG等<sup>[28]</sup>也发现黏度的增加也导致侵蚀流内部能量消耗的增加,从而增加阻力系数,相同流量下,黏滞系数越大,阻力损失越大。目前,本研究在侵蚀含磷水流的流体变异方面做了一些工作,如何在此基础上探究磷素对含沙水流流动和阻力变异的影响,并将其运用到工程实践中,还需要应该进一步分析。

### 4 结论

(1)磷素污染水流的流变参数主要受到磷素、泥沙浓度及泥沙理化性质的共同影响。25℃下,过磷酸钙浓度每增加0.1 g/cm<sup>3</sup>,黏滞系数和宾汉极限剪切力分别增加0.48~1.47 mPa·s和3.49~6.84 N/m<sup>2</sup>,含沙量越高,黏滞系数随磷素浓度增加的速率越快。

(2)给出不同浓度磷素—泥沙水流的虚流变曲线。不同浓度下不含泥沙的过磷酸钙水流为牛顿流体,随着磷素和泥沙含量的增大,被过磷酸钙污染的含沙水流由牛顿流体变异为宾汉流体。分别推导出受磷素污染的含沙水流黏滞系数和宾汉极限剪切力的计算模型并通过验证。

(3)分析了磷素—泥沙水流发生流体变异的临界浓度阈值。基于宾汉极限剪切力计算模型,当过磷酸钙浓度由0增加到0.45 g/cm<sup>3</sup>时,临界含沙量从249 kg/m<sup>3</sup>降低至127 kg/m<sup>3</sup>,减少49%,表明磷素的存在会加速含沙水流由牛顿流体变异为非牛顿流体。

#### 参考文献:

- [1] 吴昊,陈丁江.流域非点源磷污染的遗留效应研究进展[J].农业环境科学学报,2022,41(11):2352-2364.  
WU H, CHEN D J. Progress on legacy effects of watershed non-point source phosphorus pollution[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(11): 2352-2364.
- [2] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,1983.  
QIAN N, WAN Z H. Mechanics of sediment transport [M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [3] 贺斌,胡茂川.广东省各区县农业面源污染负荷估算及特征分析[J].生态环境学报,2022,31(4):771-776.  
HE B, HU M C. Evaluation of agriculture non-point pollution load and its characteristics in all districts and counties of Guangdong[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(4): 771-776.
- [4] LAKHACHE B, HAMMADI L, GAIDI L. Impact of sodium tripolyphosphate on the rheological properties of dams sediments and friction factor during hydraulic

- dredging of dams[J]. *Advanced Materials Research*, 2023, 1177: 111-120.
- [5] MELO M, ELEUTÉRIO J. Probabilistic analysis of floods from tailings dam failures: A method to analyze the impact of rheological parameters on the HEC-RAS Bingham and herschel-bulkley models[J]. *Water*, 2023, 15(16): e2866.
- [6] 钱宁, 高含沙水流运动[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989. QIAN N. A study of hyperconcentrated flows[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989.
- [7] 窦国仁, 王国兵. 宾汉极限切应力的研究[J]. *水利水运科学研究*, 1995(2): 103-109. DOU G R, WANG G B. Study on Bingham yield stress of hyperconcentration fluid[J]. *Hydro-science and Engineering*, 1995(2): 103-109.
- [8] 刘晓君, 李占斌, 李鹏, 等. 天然降雨条件下径流和磷素流失通量关系[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(3): 10-16. LIU X J, LI Z B, LI P, et al. Relationship between runoff and phosphorus loss flux under natural rainfall conditions[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(3): 10-16.
- [9] 王宝琛. 降雨径流对阜新柳河流域氮磷变化影响分析[J]. *水土保持应用技术*, 2022(3): 6-8. WANG B C. Analysis on the influence of rainfall runoff on the change of nitrogen and phosphorus in Liuhe Basin of Fuxin[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2022(3): 6-8.
- [10] RAMOS M C, LIZAGA I, GASPAR L, et al. The impacts of exceptional rainfall on phosphorus mobilisation in a mountain agroforestry catchment (NE, Spain)[J]. *Catena*, 2022, 216: e106407.
- [11] WU Y L, HUANG W C, ZHOU F, et al. Raindrop-induced ejection at soil-water interface contributes substantially to nutrient runoff losses from rice paddies[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 304: e107135.
- [12] AO C, YANG P, ZENG W, et al. Impact of raindrop diameter and polyacrylamide application on runoff, soil and nitrogen loss via raindrop splashing[J]. *Geoderma*, 2019, 353: 372-381.
- [13] 王敬昌, 蒋素绮. 改进后的细管粘度仪及其试用[J]. *泥沙研究*, 1992(4): 103-108. WANG J C, JIANG S Q. Improved thin tube viscometer and its trial use[J]. *Journal of Sediment Research*, 1992(4): 103-108.
- [14] 闫云霞, 许炯心. 黄河多沙粗沙区高含沙水流发生频率的空间分异及其与侵蚀产沙的关系[J]. *泥沙研究*, 2010(3): 9-16. YAN Y X, XU J X. Spatial variation of hyperconcentrated flow frequency and its relationship with specific sediment yield in the high-intensity coarse sediment producing area of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(3): 9-16.
- [15] KANG Y C, GAO J E, SHAO H, et al. Evaluating the flow and sediment effects of gully land consolidation on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 600: e126535.
- [16] ZHANG Y Y, GAO J N, GAO Z, et al. Effect of nitrogen on the viscosity of the erosive sediment-laden flows[J]. *Agronomy*, 2022, 12(9): e2029.
- [17] 周凡凡, 高建恩, 王照润, 等. 坡面降雨径流侵蚀输沙的不平衡特性研究[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 95-100. ZHOU F F, GAO J E, WANG Z R, et al. Study on unbalance characteristics of sediment transport by rainfall runoff erosion on slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6): 95-100.
- [18] 费祥俊. 浆体与粒状物料输送水力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994. FEI X J. Hydraulics of slurry and granular material conveying [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.
- [19] 陈沁泽, 王宪业, 赵中豪, 等. 粒度与含水率对泥沙流变特性影响的试验研究[J]. *泥沙研究*, 2021, 46(6): 58-64. CHEN Q Z, WANG X Y, ZHAO Z H, et al. Experimental study on the influence of particle size and water content on sediment rheological properties[J]. *Journal of Sediment Research*, 2021, 46(6): 58-64.
- [20] YU M L, YU X, BALACHANDAR S. Particle nonresolved DNS-DEM study of flocculation dynamics of cohesive sediment in homogeneous isotropic turbulence[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(6): e2021WR030402.
- [21] SHEN S Q, YANG S K, JIANG Q L, et al. Effect of dissolved organic matter on adsorption of sediments to Oxytetracycline: An insight from zeta potential and DLVO theory[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(2): 1697-1709.
- [22] 黄河清, 牛彦超, 殷炯, 等. 不同方法测定过磷酸钙中总汞含量的比较研究[J]. *磷肥与复肥*, 2023, 38(7): 50-52. HUANG H Q, NIU Y C, YIN J, et al. Comparison of determination methods of total mercury in single superphosphate[J]. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2023, 38(7): 50-52.

(下转第 39 页)

- [23] 刘汗,雷廷武,赵军.土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响[J].中国水土保持科学,2009,7(2):1-6.  
LIU H, LEI T W, ZHAO J. Effects of initial soil water content and rainfall intensity on Loess infiltration capacity[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(2): 1-6.
- [24] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.  
ZHANG H R, ZHENG F L. Effect of slope gradients on erosion from a red soil hillslope under different rainfall intensity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3): 40-43.
- [25] FANG N F, SHI Z H, LI L, et al. Rainfall, runoff, and suspended sediment delivery relationships in a small agricultural watershed of the Three Gorges area, China[J]. Geomorphology, 2011, 135(1/2): 158-166.
- [26] 张紫薇,赵文俊,李奇,等.表层土壤结构对红壤坡耕地产流及产沙过程的影响[J/OL].土壤学报,2023:1-12. (2023-04-12). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20230411.1317.010.html>.  
ZHANG Z W, ZHAO W J, LI Q, et al. Effects of top soil structure on runoff and sediment yield of red soil slope cropland[J/OL]. Acta Pedologica Sinica, 2023: 1-12. (2023-04-12). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20230411.1317.010.html>.
- [27] 王玲玲,姚文艺,王文龙,等.黄土丘陵沟壑区多尺度地貌单元输沙能力及水沙关系[J].农业工程学报,2015,31(24):120-126.  
WANG L L, YAO W Y, WANG W L, et al. Sediment transport capacity and flow-sediment relationship in different topographical units of different spatial scales in hilly loess region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(24): 120-126.
- [28] 曹光秀,王克勤,赵洋毅,等.中亚热带地区常绿阔叶林地表径流和产沙影响机制[J].水土保持学报,2018,32(4):30-36.  
CAO G X, WANG K Q, ZHAO Y Y, et al. The mechanism of surface runoff and sediment yield of evergreen broad-leaved forest in the middle subtropical region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 30-36.
- [29] 乔闪闪,吴磊,彭梦玲.人工模拟降雨条件下黄土坡面水-沙-氮磷流失特征[J].环境科学研究,2018,31(10):1728-1735.  
QIAO S S, WU L, PENG M L. Simulation of runoff, sediment, nitrogen and phosphorus loss on bare loess sloping land using simulated rainfall[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(10): 1728-1735.
- [30] 杨青,杨广斌,赵青松,等.喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征[J].水土保持通报,2020,40(1):9-16.  
YANG Q, YANG G B, ZHAO Q S, et al. Characteristics of runoff sediment yield on slopes under different rainfall and vegetation cover in Karst areas[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1): 9-16.
- (上接第30页)
- [23] 化全县,韩亚伟,汤建伟,等.过磷酸钙颗粒的溶解动力学研究[J].磷肥与复肥,2016,31(5):10-12.  
HUA Q X, HAN Y W, TANG J W, et al. Study on dissolution kinetics of single superphosphate granules in water[J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 2016, 31(5): 10-12.
- [24] LI Y Y, GAO R, YANG R, et al. Using a simple soil column method to evaluate soil phosphorus leaching risk[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2013, 41(11): 1100-1107.
- [25] 张彩.细颗粒泥沙絮凝对磷迁移转化的影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.  
ZHANG C. Effect of fine sediment flocculation on phosphorus transfer and transformation[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [26] 李杰,杨文俊,郭超.有机物对泥沙絮凝影响研究综述[J].泥沙研究,2022,47(4):75-80.  
LI J, YANG W J, GUO C. A review of research on the influence of organic matter on sediment flocculation[J]. Journal of Sediment Research, 2022, 47(4): 75-80.
- [27] ZHAO C H, GAO J E, ZHANG M J, et al. Response of roll wave to suspended load and hydraulics of overland flow on steep slope[J]. Catena, 2015, 133: 394-402.
- [28] ZHANG G H, SHEN R C, LUO R T, et al. Effects of sediment load on hydraulics of overland flow on steep slopes[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(15): 1811-1819.