# 不同含沙量细粒沉积物浑水体流变特性研究

程子睿[1,2], 任宇鹏[3], 张子涵[1,2], 田 浩[1,2], 许国辉[1,2*]

（1. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室，山东 青岛 266100；
2. 中国海洋大学 山东省海洋环境地质工程重点实验室，山东 青岛 266100；
3. 中国海洋大学 海洋地球科学学院，山东 青岛 266100）

**摘 要：**强烈波浪作用在河口海岸区域引发海底沉积物的剧烈扰动，所形成的近底高浓度浑水体可汇集成海底浊流，在污染物和含碳物质自近海向远海输运方面起着重要作用，是陆海相互作用的重要驱动力。而近底高浓度含沙层因含沙量及其中组分的不同，其流动性亦不同。针对海底可能存在的高浓度含沙层，采用流变试验，通过剪切速率-剪切应力间的流变关系对不同含沙量下的粉土浑水体进行流变特性分析，并结合前人所做的不同粉粒黏粒比例、不同含量的浑水体流变测试结果，将粉土浑水体在 100～1 350 kg/m$^3$ 含沙量范围内划分为牛顿流体、过渡流体和宾汉流体三种流体类型，给出了以粉粒与黏粒组分为主的含沙浑水体的流变性质变化界限图，为近底高浓度含沙层运动研究提供流体性质分类参照。

**关键词：**高浓度含沙层；粉黏比；流变特性；强烈波浪作用

**中图分类号：**P736.2 **文献标志码：**A **文章编号：**1671-6647（2023）02-0246-11

**doi:** 10.12362/j.issn.1671-6647.20220106002

**引用格式：** 程子睿, 任宇鹏, 张子涵, 等. 不同含沙量细粒沉积物浑水体流变特性研究[J]. 海洋科学进展, 2023, 41(2)：246-256. CHENG Z R, REN Y P, ZHANG Z H, et al. Rheological characteristics of muddy water in fine-grained sediments with different sandy concentration[J]. Advances in Marine Science, 2023, 41(2)：246-256.

河口海岸地区将陆域、河流和海洋连接，是全球沉积物“源-汇”系统的重要组成部分，它既是陆源沉积物自河流输入进海洋的“汇”，也是深海沉积物聚集的“源”[1]。全球每年约有 150～200 亿 t 的沉积物由河流进入河口三角洲，占沉积物总入海量的 95%[2-3]，并存在沿岸再迁移分配的过程。浊流是自峡谷头部向深海平原的泥沙重要输运载体之一[4-6]，进入海洋环境中的陆源碎屑沉积物能通过浊流进行远距离搬运，影响着海底峡谷和深海海盆生态环境及地质沉积过程[7-8]，但目前仍缺乏大陆架沉积物向海底峡谷汇流及浊流在海底峡谷中流动的详细过程研究。基于强浪作用下的室内试验及现场观测研究，在粉沙淤泥质海岸均发现了近底高含沙浑水层的存在[9]，相比同水深范围的含沙量平均值高出近 10 倍[10-11]。研究者发现近底高浓度含沙水体其厚度和密度的增加会引起流速的加快，在边坡泥沙厚度大于 0.2 m 时，流速可以达到 0.5 m/s[12]，高含沙浑水体在波浪和坡度作用下的向深海流动或能成为陆源沉积物自河口海岸至海底峡谷头部的输运形式。强风浪作用下的循环荷载也会使海底一定深度范围的沉积物发生液化[13-15]，在分选作用下黏性细颗粒自底床不断析出，进入上部水体[16]，近底的含沙量不断增加，其流体性质与上部悬沙水层存在区别[17]。土颗粒质点运动的特殊性说明了泥沙高浓度下流体运动形态的改变[16]。浑水体的含沙量大小影响着其流动特性，含沙层的组分也影响着自身的流动性和携沙量[18-20]。因此，研究不同含沙量的浑水体的流动性对自大陆

**收稿日期：**2022-01-06
**资助项目：**国家自然科学基金项目（41976049）；中央高校基本科研业务费专项（202061033）
**作者简介：**程子睿（1997—），女，硕士研究生，主要从事海洋工程地质方面研究. E-mail：amychengzi@163.com
***通信作者：**许国辉（1972—），男，教授，博士，主要从事海洋工程地质、海洋工程环境方面研究.
E-mail：xuguohui@ouc.edu.cn

（陈 靖 编辑）

架起源的沉积物汇流形成浊流及浊流向深海运动过程，具有重要的基础性作用，有助于完善陆源沉积物自河口海岸向深海的“源-汇”过程理解。

流变特性是用来表征含沙浑水体的重要性质，反映了泥沙在外荷载作用下对变形和流动的抵抗能力，同时反映了泥沙力学性质和运动规律[21]。牛顿在 1687 年首次提出流体的剪应力与应变速率呈正相关关系，并据此提出了牛顿黏性定律，牛顿发现部分流体对于任一点的剪应力都同变形速率呈线性函数关系，因此将符合这个定律的流体称为牛顿流体，不符合这个定律的流体称为非牛顿流体[22]。Wang 等研究认为矿物成分是浑水体流变性质变化的控制因素之一[23]，Shanmugam 总结得到牛顿流体与非牛顿流体的临界沉积物浓度值约 20%～25%[24]。吕楚岫等分析了毛细作用对含沙浑水体流变特性的影响，同时观察到不同流体性质下浑水体的宏观流动特性的区别[19]。王欣志等界定了不同浓度下高岭土的流体类型，并讨论了起始黏度和稳定黏度在工程领域的区分适用情况[25]。刘晓磊分析了黄河三角洲高浓度黏性泥沙在剪切荷载作用下的非牛顿流变特性，得到含水率 50% 以上的高浓度黏性泥沙在高剪切率下存在剪切增稠行为[26]。Si 利用叶片流变仪和球测量系统发现砂土混合泥浆的屈服应力随流体黏粒含量的增加呈现指数增长的趋势，并指出 Herschel-Bulkley 模型是分析细颗粒泥浆流变特性的优选模型[27]。前人经过大量流变分析研究，对不同粉黏比条件下的浑水流体进行了流变模型拟合和流体类型界定，但缺乏含沙量和含沙组分综合量化下流体类型的界定和流变性质的变化分析。

本文从流变学的角度，利用流变仪测定不同浓度下粉土浑水体的流变特性，对粉土浑水体的流体类型进行划分，并结合已有相关粉粒、黏粒组合含沙浑水体的测试数据，绘制了以粉粒和黏粒为主要组分的含沙浑水体流变性质变化的界限图，为高浓度含沙层向深海运移的运动能力及过程研究提供基础支撑。

## 1　试验方法

### 1.1　样品

试验用土取自位置黄河三角洲岸滩（118°58′01″E，38°04′15″N），利用 0.3 mm 孔径的土工筛进行筛分，测定筛后土的基本物理指标，颗粒级配曲线如图 1 所示。土样的中值粒径为 0.036 mm，粒径大于 0.075 mm 的颗粒质量为 1.8%，塑性指数为 8.2，确定土样为粉土。

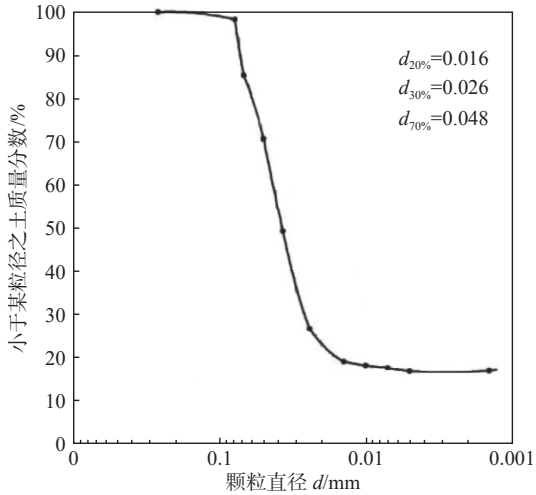



**图 1　试验粉土颗粒级配曲线**

**Fig. 1　Grading curve for particles distribution**

### 1.2 仪器及设备

流变试验采用 R/S+流变仪分析判定粉土的流变特性。和仪器连接的电脑配有流体性质测试模块的 Rheo3000 软件，通过电脑可进行参数设置和程序执行，同时提供直观的样品信息和测试数据。试验采用 VT40-20 型浆式转子及 MK-3-CC40-DIN 同轴圆柱体转子及其配套样品杯(图 2)。同轴圆柱体转子由内筒与外筒组成，依据牛顿内摩擦定律进行各种流体的分析，主要用来测量中、低黏度的均匀样品；桨叶转子适用于含大颗粒物或不均匀体系的样品，有效防止测试过程中样品的沉降，所测试的黏度为相对黏度，转子参数如表 1 所示。

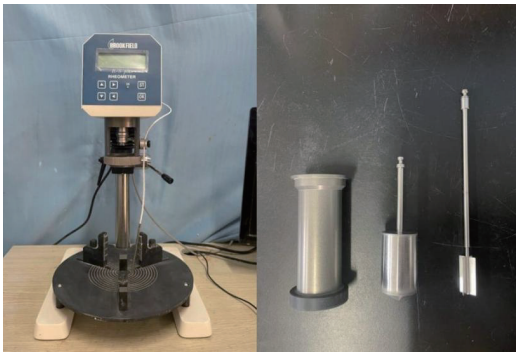


图 2 流变仪及转子设备

Fig. 2 Rheometer and rotor equipment drawing

表 1 流变仪转子相关参数

Table 1 Rotor-related parameters for Rheometer

| 转子类型 | 剪切速率/$s^{-1}$ | 剪切应力/Pa | 黏度/(Pa·s) | 灌装量/mL | 高度/mm | 直径/mm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MK-3-CC40-DIN | 0.021 5～2 790 | 0.89～594 | 0.000 3～27 600 | 68.5 | – | – |
| VT40-20 | – | 5.2～3 400 | – | – | 40 | 20 |

注：–表示无相关数据。

### 1.3 试验过程

将干燥后分散的粉土中加入不同量的水，制成不同含沙量的粉土浑水体。由低到高分别配制了 15 个含沙量梯度：100～1 200 kg/$m^3$，每 100 kg/$m^3$ 为一个梯度；1 250～1 350 kg/$m^3$，每 50 kg/$m^3$ 为一个梯度。较低含沙量(100～1 100 kg/$m^3$)的粉土浑水体采用 MK-3-CC40-DIN 同轴圆柱体转子，样品杯采用 CC40 转子配套样品杯。当含沙量达到 1 200 kg/$m^3$ 时，CC40 转子不能再发生转动，粉土浑水体已无法利用该转子测定其流变性质，因此高含沙量(1 200～1 350 kg/$m^3$)的样品采用 VT40-20 型浆式转子进行流变试验，样品杯选用 50 mL 烧杯，同时设置软件中的转子适配系数，以适用于烧杯。

将粉土样品搅匀后倒入样品杯，流变仪测量模式选择控制剪切率(CSR)旋转测量，对于样品选定 CC40 转子的情况，先设置剪切率 200 r/s 持续运行 20 s，使粉土浑水体充分混合均匀，后设置剪切率由 0～500 转/s 线性增加，测试时间 300 s，测试点 166 个。对于样品选定 VT40-20 转子的情况，设置剪切率由 0～220 转/s 线性增加，测试时间 220 s，测试点 110 个。每一个样品一次性配制足够量，按照相同操作步骤均进行 3 次平行试验，确保试验结果一致的情况下(平行测试结果相对误差均小于 7%)，选取其中最接近均值的一次试验数据进行结果分析。

### 1.4 流变模型拟合

在流变学中，研究者常用以下 2 种模型描述流体流变特性[28]。

1)幂律流体

$$\tau = K\gamma^n, \tag{1}$$

$$\eta_0 = \frac{\tau}{\gamma} = K\gamma^{n-1}, \tag{2}$$

式中：$\tau$为剪切应力；$\gamma$为剪切速率；$\eta_0$为稠度系数；$K$为常数；$n$为流体流动指数，当$n<1$时流体表现剪切变稀行为，当$n=1$时流体表现牛顿流体行为，当$n>1$时流体表现剪切增稠行为。

2）Herschel-Bulkley 模型

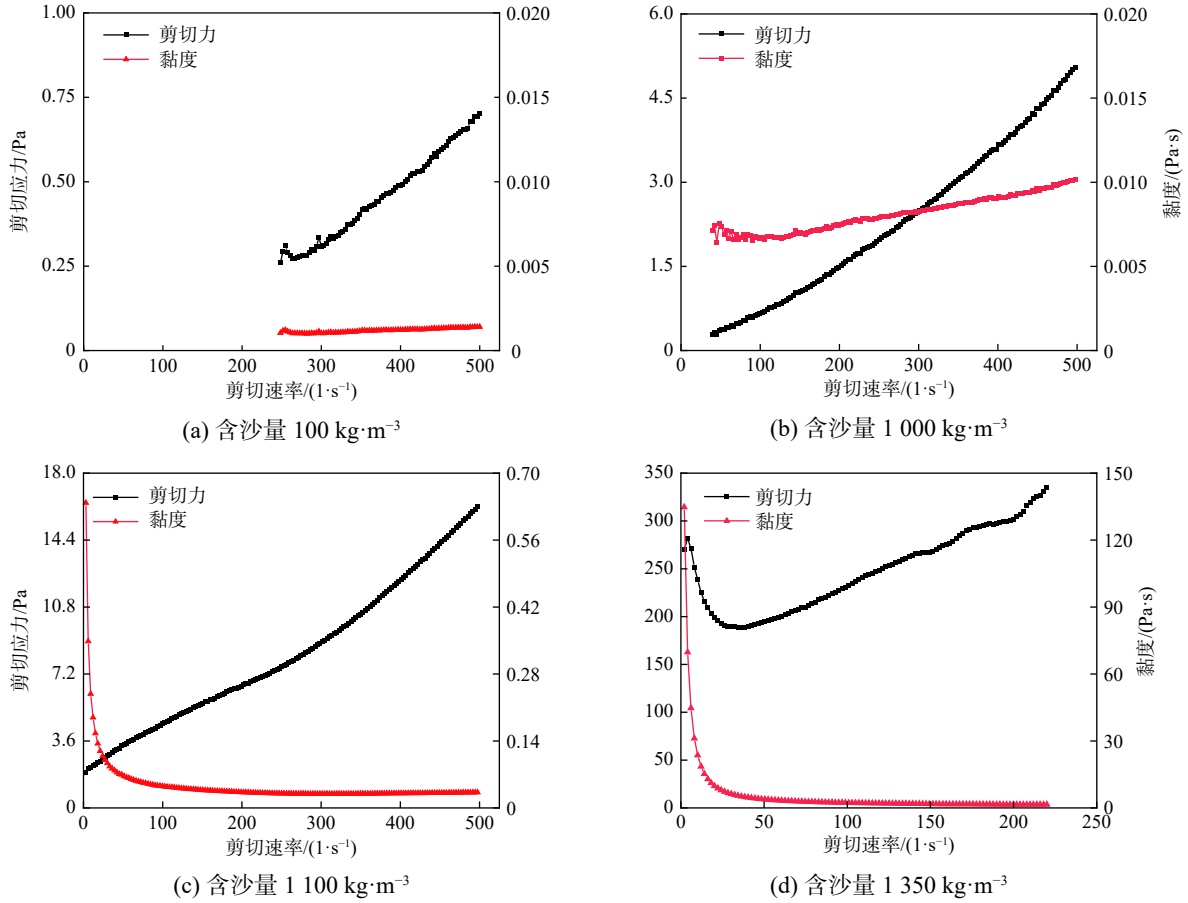
$$\tau = \tau_y + \mu_p \gamma^n, \tag{3}$$

式中：$\tau_y$为屈服应力；$\mu_p$和$n$为常数；当$n<1$时，流体为假塑性流体；$n=1$时，该模型退化为 Bingham 模型；$n>1$时，流体为膨胀性流体。

幂律流体是分析非牛顿流体的常用模型，在实际应用过程中，幂律流体可以表征广义牛顿流体的黏度与应变速率张量分量或第二不变量的关系；Herschel-Bulkley 模型的表达式在本质上可以用来准确计算屈服应力，是具有初始屈服应力值的指数型函数模型，Herschel-Bulkley 模型更适用于分析黏性大、浓度高的非牛顿流体，对于不同特征的流体应选取合适的流变模型进行分析。针对本文分析的纯粉土浑水体，将流变试验获得的剪切力与含沙量的关系数据代入模型关系式中进行拟合分析，依据拟合结果确定不同含沙量粉土浑水体的流体类型。

## 2　结　果

利用流变试验数据，本文选取具备不同流变类型特点的流变性质曲线作为测试结果代表，其中 1 000 和 1 100 kg/m$^3$ 含沙量区间，粉土浑水体发生明显流体性质的转变，因此共选取 4 种粉土浑水样品的测试结果绘制剪切速率-应力及剪切速率-黏度的关系曲线（图 3）。




(a) 含沙量 100 kg·m$^{-3}$　(b) 含沙量 1 000 kg·m$^{-3}$

(c) 含沙量 1 100 kg·m$^{-3}$　(d) 含沙量 1 350 kg·m$^{-3}$

**图 3　流变试验结果**

**Fig. 3　Results of rheological tests**

从纯粉土浑水体的流变试验结果发现，含沙量值较低的测试组受转子测试范围的限制，存在低剪切速率下无法获得相应数据的情况，当剪切速率达到一定阈值后才能得到流体相应剪切应力及黏

度，因此就可获得数据进行样品的流变分析。

将各个样品的剪切应力与剪切速率关系，按照幂律模型及 Herschel-Bulkley 模型进行拟合，获得其流变特征。拟合结果如表 2 所示，其中$\tau$代表剪切应力，$\gamma$代表剪切速率。表 2 中的拟合结果表明，不同含沙量的粉土浑水体分别符合幂律模型及 Herschel-Bulkley 模型。

**表 2 流变模型拟合关系式**

**Table 2 Fitting formulas of rheological model**

| 含沙量/(kg·m$^{-3}$) | 拟合关系式 | $R^2$ | 流变类型 | 含沙量/(kg·m$^{-3}$) | 拟合关系式 | $R^2$ | 流变类型 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 100 | $\tau=0.001\,24\gamma$ | 0.991 4 | 牛顿流体 | 900 | $\tau=0.000\,46\gamma^{1.415\,82}$ | 0.998 8 | 过渡流体 |
| 200 | $\tau=0.001\,20\gamma$ | 0.986 9 | | 1 000 | $\tau=0.001\,48\gamma^{1.305\,03}$ | 0.998 3 | |
| 300 | $\tau=0.001\,11\gamma$ | 0.987 9 | | 1 100 | $\tau=0.001\,87\gamma^{1.423\,63}+2.889\,7$ | 0.994 5 | 宾汉流体 |
| 400 | $\tau=0.001\,21\gamma$ | 0.986 2 | | 1 200 | $\tau=0.000\,1\gamma^{2.547\,15}+106.087\,41$ | 0.975 7 | |
| 500 | $\tau=0.001\,27\gamma$ | 0.991 1 | | 1 250 | $\tau=0.001\,26\gamma^{2.121\,47}+77.705\,07$ | 0.993 1 | |
| 600 | $\tau=0.001\,81\gamma$ | 0.984 8 | | 1 300 | $\tau=0.000\,08\gamma^{2.608\,24}+127.323\,7$ | 0.915 7 | |
| 700 | $\tau=0.003\,12\gamma$ | 0.986 6 | | 1 350 | $\tau=0.006\,98\gamma^{1.828\,48}+198.822\,6$ | 0.915 1 | |
| 800 | $\tau=0.003\,62\gamma$ | 0.986 4 | | | | | |

## 2.1 剪切应力与剪切速率的变化关系

将 100～1 000 kg/m$^3$ 含沙量的粉土浑水体样品的剪切速率-剪切应力流变实验曲线，与表 2 中的拟合关系式绘制的曲线，绘制在图 4 中。可以看出 100～500 kg/m$^3$ 含沙量下的浑水体流变曲线趋势集中，呈线性关系；含沙量为 600～1 000 kg/m$^3$ 时，曲线斜率不断增大，剪切速率-剪切应力的拟合曲线由过原点的直线型逐渐转为指数型。

含沙量为 1 100～1 350 kg/m$^3$ 的粉土浑水体的剪切速率-剪切应力曲线如图 5 所示，拟合关系式

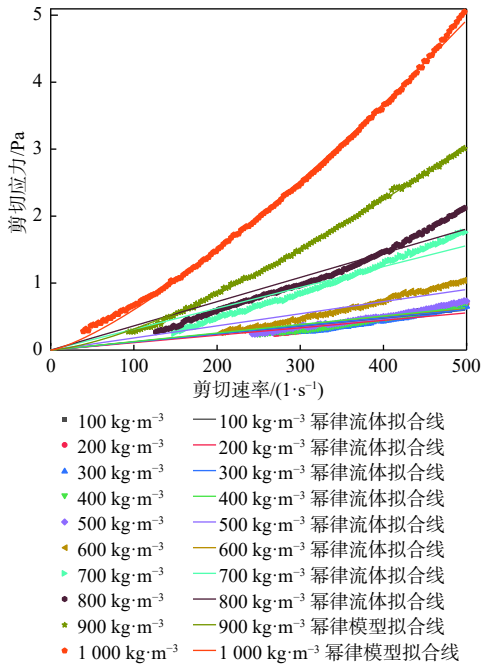



**图 4 粉土浑水体剪切速率-剪切应力幂律流体拟合曲线**

**Fig. 4 Shear rate-shear stress and model fitting curves for fluid with sand**

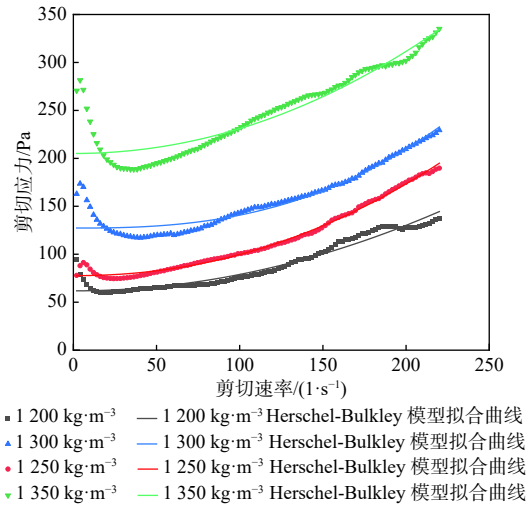


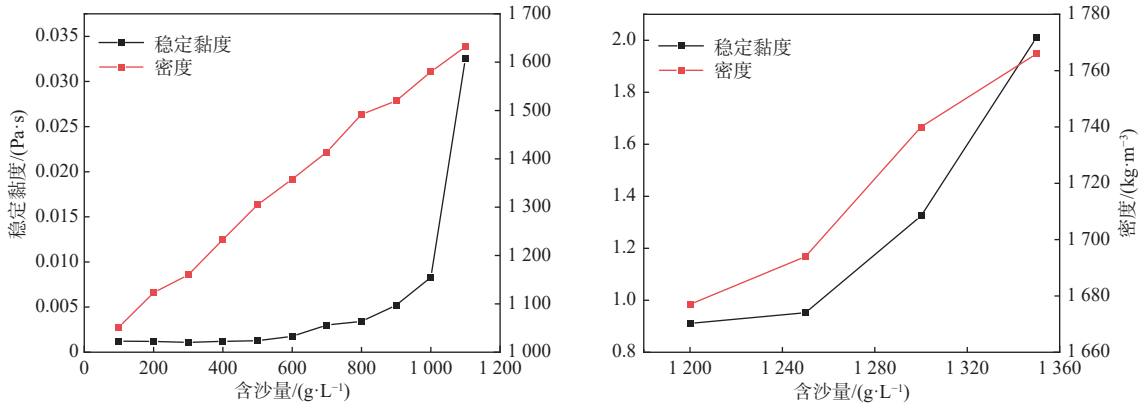

**图 5 粉土浑水体剪切速率-剪切应力 Herschel-Bulkley 模型拟合曲线**

**Fig. 5 Shear rate-shear stress and model fitting curves for fluid with sand**

为不过原点的指数型曲线，高含沙量浑水体存在屈服应力（初始剪切应力），其屈服强度随含沙量的增加而增大。由于两种转子的作用机理不同，剪切力在数值上存在差别，但同种流体类型下的剪切速率-剪切应力曲线趋势一致。

### 2.2　黏度与剪切速率的变化关系

对各含沙量下粉土浑水体随剪切率梯度增加的黏度变化进行测试，绘制含沙量-稳定黏度关系曲线如图 6 所示。由图 6 可知，含沙量为 100～600 kg/m$^3$ 的粉土浑水体的稳定黏度值基本一致，取均值在 0.001 3 Pa·s；含沙量为 700～1 000 kg/m$^3$ 的粉土浑水体的稳定黏度值，随含沙量的增加而增大，与较低含沙量的粉土浑水体有区别；粉土浑水流体含沙量在 1 100 kg/m$^3$ 时，稳定黏度值为 0.032 5 Pa·s，相比于稍低含沙量的 1 000 kg/m$^3$ 的稳定黏度值 0.008 3 Pa·s，出现量级上的增加。由图 3c 可知，粉土浑水流体随剪切率的增大，流体存在剪切增稠的趋势，表现出与较低和较高浓度流体下的不同流体特征，但增长量级在 10$^{-2}$ 左右，增稠趋势较不明显。随着含沙量值的进一步增大，黏度在转子启动之后迅速下降，继而随剪切速率的增大而趋于稳定。




(a) 含沙量 100~1 100 kg·m$^{-3}$　　(b) 含沙量 1 200~1 350 kg·m$^{-3}$

**图 6　不同含沙量条件粉土浑水体稳定黏度曲线**

**Fig. 6　Stable viscosity curves of muddy waters with different sediment concentration**

### 2.3　含沙浑水体的流体性质变化

将本文的粉土流变试验所得到的流体性质与前面研究者所做的以粉粒和黏粒组分为主的不同粉黏比下的流变试验结果[19,29-30]汇总在一起，得到不同黏粒含量、不同含沙量下浑水体的流体性质变化情况，绘制以粉粒与黏粒组分为主的含沙浑水体的流变性质变化界限图（图 7）。

依据含沙浑水体流体性质及流变模型拟合情况，将不同含沙量和黏粒含量下的浑水体分为 4 种流变类型：牛顿流体、牛顿流体与宾汉流体之间的过渡流体形态（简称过渡流体）、宾汉流体和假塑性流体。由图 7 可知，4 种类型流体的分界浓度随黏粒含量的增加而减小，且不同粉黏比的含沙浑水体，其分界浓度相差较大。浑水体黏粒含量越高，其流体性质易在更低浓度

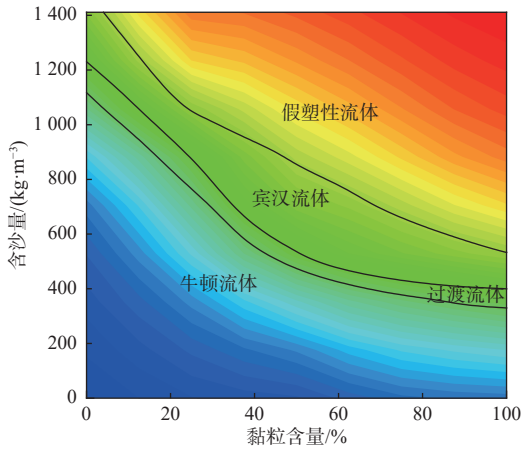



**图 7　含沙浑水体的流变性质变化界限**

**Fig. 7　Variations of fluid property of muddy waters with different clay content and sediment concentration**

发生转化，较低黏粒含量的浑水体需达到更高浓度才会发生流体类型的转变，流体性质与黏粒含量并不呈现为等浓度梯度的变化。

## 3 讨 论

### 3.1 流体类型的界定

根据 15 组不同含沙量梯度的纯粉土浑水体流变测试结果，经分析拟合结果及对照典型流体的流变性质[31]，可以判断出在较低含沙量（100～800 kg/m$^3$）时，粉土浑水体流变曲线符合典型牛顿流体特征，且拟合曲线符合牛顿流体的流变方程，在该浓度范围内粉土浑水体为牛顿流体。含沙量为 900～1 000 kg/m$^3$ 的粉土浑水体，黏度随剪切速率的升高而小幅度增大，表现一定的剪切增稠，区别于其他含沙量流体黏度随剪切速率变化特征，认为是典型牛顿流体向典型宾汉流体发生转变的一种过渡流态，因此将在此含沙量范围内的粉土浑水体定义为过渡流体。较高含沙量（1 100～1 350 kg/m$^3$）的粉土浑水体，其流变曲线及拟合关系式都符合典型宾汉流体特征，在该含沙量范围内的粉土浑水体可视为宾汉流体。

由图 7 可知，主要组分为粉粒和黏粒的含沙浑水体在不同粉黏比及含沙量下的流体性质变化情况，能为以粉黏粒为组分的含沙浑水体的流体类型界定提供较为全面的参照，同时为含沙浑水体在海洋环境中的流动能力和过程研究提供基础支撑。同时反映出，浑水体黏粒含量越高，越易在更低含沙量下由牛顿流体向非牛顿流体发生转变。黏粒的增加使流体更容易发生性态的转变，这与颗粒间的相互作用有关，相邻泥沙颗粒存在相互吸引的黏聚力，其表观黏聚力随细粒组分的增加而增加[32]，多个黏粒聚集会发生“胶结”形成大的絮凝体，进而不断搭建成絮网结构，增强泥沙内部结构强度[33]。黏粒粒径比粉粒小，在含沙量相同的条件下，浑水体的黏粒占比与颗粒数量成正相关，颗粒数量的多少直接影响颗粒间距离的大小。黏粒占优的浑水体相较于同含沙量下粉粒占优的浑水体，单位体积中的颗粒数量更多，颗粒之间更容易相互接触形成作用力，导致结构变强，抗剪能力也增强，出现屈服应力，从而改变流体性态，更容易达到非牛顿流体的临界状态。

### 3.2 含沙浑水体的流动性

从流体黏度角度来看，黏性表现一定的阻滞作用以降低流体向前的流动能力，对应流体流动速度的下降。实验中牛顿流体的黏度普遍处于一个相对稳定的低值，当流体随含沙量及组分的改变，转变为非牛顿流体后，流体黏度迅速增大，进而降低整体的流动能力和流动速度。从浑水体颗粒微观排列角度来看，粉粒和黏粒在水环境中，表面会形成约 0.7 $\mu$m 的吸附水层[34]，颗粒间存在一个间距临界点，大于临界点时，颗粒保持原自身运动规律，小于临界点时，颗粒空隙间毛细作用及吸附水层的吸附作用，影响颗粒运动，水中原本分散的黏粒间发生连接作用，出现颗粒间的互锁行为[30]。粉黏粒间存在的排列特性，受沉积物浓度、颗粒大小及粉黏比的影响。在相同含沙量值情况下，不同粉黏比所承载的颗粒总个数有所不同。低黏粒含量的浑水体粉黏粒间距大，达不到颗粒互锁的临界距离，流体的流动性好；高黏粒含量的浑水体的颗粒总数远大于同浓度下的低黏粒含量浑水体，流体的粉粒间可能仍存在较大距离，但黏粒已经存在致密排列，更易到达临界点，产生互锁行为。同理应用于相同黏粒含量条件下的不同含沙量浑水体，含沙量增加，浑水体内部颗粒产生互锁作用概率增加，产生互锁行为会降低浑水体流动能力。因此，对于近底高浓度含沙层来说，含沙量增加提供了与周围水体间大的密度差，使得含沙层流动性增强，但是含沙量增加到产生沉积物颗粒间互锁行为的情况下，近底高浓度含沙层的流动能力反而会减弱。

在风暴潮等强风浪天气下，波浪作用的循环荷载能够使海底一定深度范围的沉积物发生液

化[13-15]，向上部水体源源不断地析出细粒泥沙，进而产生近底高浓度含沙层，泥沙组分中黏粒的增加会使近底含沙层流体性质区别于砂质海岸底床上部泥沙运移情况。同时，在亚马逊大陆架利用 OBS 观测到近底悬浮沉积物的浓度范围能达到 10～330 g/L[35]，室内试验测得液化土体含沙量能达到 1 350 g/L[36]，不论是近底含沙浑水体还是更高浓度下的液化土体，都能够在一定外力荷载下呈现良好流动性，因此流变试验对于由低至高含沙量下的水-土混合流体进行了全面分析。在不同组分流体中，黏粒含量较高的流体在达到一定浓度阈值后便易由牛顿流体向非牛顿流体发生转变，高浓度下流体性质区别于上层水体，或存在特殊的流动驱动方式，使高浓度含沙层可以携带大量的泥沙并依旧保持良好的流动性，具有向更深海域流动的能力，随波浪动力作用和海底坡度的影响向深海进一步运移，为浊流提供物质组成。

## 4　结　论

本文对不同含沙量粉土浑水体开展了流变试验，同时结合已有的不同粉黏比浑水体流变试验结果，在界定粉土浑水体的流体类型基础上，进一步得到以粉粒、黏粒这种细粒沉积物为主要组分的含沙浑水体在含沙量不同、粉粒黏粒比例不同的情况下的流变类型界限图，可为海底浊流运动研究提供流体性质分类参照。得到如下主要结论。

1）粉土浑水体随含沙量变化表现为 3 种不同的流体类型：含沙量值在 800 kg/m$^3$ 以下的浑水体表现牛顿流体特征；含沙量在 900～1 000 kg/m$^3$ 范围内，浑水体特征不明显，介于牛顿流体和非牛顿流体之间，属于过渡流体；含沙量在 1 100 kg/m$^3$ 以上属于宾汉流体。

2）细粒沉积物浑水体在不同含沙量、粉黏比时表现为不同的流体性质。黏粒含量更高的浑水体更易在低含沙量下从牛顿流体向非牛顿流体发生转变。

## 参考文献 (References):


[1] ZHANG D, XIE W M, SHEN J, et al. Sediment dynamics in the mudbank of the Yangtze River Estuary under regime shift of source and sink[J]. International Journal of Sediment Research, 2022, 37(1): 97-109.

[2] GUO L C, SU N, TOWNEND I, et al. From the headwater to the delta: a synthesis of the basin-scale sediment load regime in the Changjiang River[J]. Earth-Science Reviews, 2019(197): 102900.

[3] TALLING P J, AMY L A, WYNN R B, et al. Evolution of turbidity currents deduced from extensive thin turbidites: Marnoso Arenacea Formation (Miocene), Italian Apennines[J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77(3): 172-196.

[4] 徐景平. 海底浊流研究百年回顾[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(10): 98-105. XU J P. Turbidity current research in the past century: an overview[J]. Periodical of Ocean University of China, 2014, 44(10): 98-105.

[5] NOMURA S, GIOVANNI D C, FURUICHI M, et al. Quasi-stationary flow structure in turbidity currents[J]. International Journal of Sediment Research, 2020, 35(6): 659-665.

[6] 许国辉, 曾俞, 刘志钦, 等. 风暴引发的海底沉积物流起源过程[J]. 中国海洋大学学报, 2019, 49(S1): 59-65. XU G H, ZENG Y, LIU Z Q, et al. The origin of storm sediment flows in coast[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(S1): 59-65.

[7] WALKER R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans; models for exploration for stratigraphic traps[J]. Aapg Bulletin, 1978, 62(6): 239-263.

[8] PIRMEZ C, IMRAN J. Reconstruction of turbidity currents in Amazon Channel[J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20(6/8): 823-849.

[9] 曹祖德, 焦桂英, 赵冲久. 粉沙质海岸泥沙运动和淤积分析计算[J]. 海洋工程, 2004, 22(1): 59-65. CAO Z D, JIAO G Y,

ZHAO C J. Sediment movement along silt sandy beach and calculation of siltation[J]. Ocean Engineering, 2004, 22(1): 59-65.

[10] 于月倩, 许国辉, 赵庆鹏, 等. 底床粉质土液化下波动水体含沙量垂向L型分布特征试验研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(6): 144-151. YU Y Q, XU G H, ZHAO Q P, et al. An experiment study on L-shaped vertical characteristics of suspended sediment content on the liquefied silty soil bed[J]. Haiyang Xuebao, 2010, 32(6): 144-151.

[11] 杨华, 赵冲久, 侯志强, 等. 粉沙质海岸波浪和潮流作用下泥沙垂线分布研究[J]. 水道港口, 2006, 27(3): 12-16. YANG H, ZHAO C J, HOU Z Q, et al. Study on sediment vertical distribution under the wave and current of silt coast[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2006, 27(3): 12-16.

[12] 刘猛, 胡志锋, 张宏伟. 长江口北槽边坡近底高含沙水体流动规律试验研究[J]. 泥沙研究, 2016(6): 38-43. LIU M, HU Z F, ZHANG H W. Experimental study on the flow law of high sediment concentration water near the bottom of the north channel slope of the Yangtze River Estuary[J]. Journal of Sediment Research, 2016(6): 38-43.

[13] ZEN K, YAMAZAKI H. Field observation and analysis of wave-induced liquefaction in seabed[J]. Soils and Foundations, 2008, 31(4): 161-179.

[14] SASSA S, TAKAYAMA T, MIZUTANI M, et al. Field observations of the build-up and dissipation of residual pore water pressures in seabed sands under the passage of storm waves[J]. Journal of Coastal Research, 2006, 39(12): 410-414.

[15] CHANG W J, RATHJE E M, STOKOE K H, et al. In situ pore-pressure generation bahavior of liquefiable sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(8): 921-931.

[16] 许国辉, 孙永福, 于月倩, 等. 黄河水下三角洲浅表土体的风暴液化问题[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(2): 37-42. XU G H, SUN Y F, YU Y Q, et al. Storm-induced liquefaction of the surficial sediments in the Yellow River subaqueous delta[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2011, 31(2): 37-42.

[17] 李孟国, 曹祖德. 粉沙质海岸泥沙问题研究进展[J]. 泥沙研究, 2009(2): 72-80. LI M G, CAO Z D. Review on the study of sediment problems on the silt-sandy coast[J]. Journal of Sediment Research, 2009(2): 72-80.

[18] FELIX M, STURTON S, PEAKALL J. Combined measurements of velocity and concentration in experimental turbidity currents[J]. Sedimentary Geology, 2005, 179(1): 31-47.

[19] 吕楚岫, 许国辉, 任宇鹏, 等. 不同含沙量浑水体流变特性试验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(1): 43-51. LÜ C X, XU G H, REN Y P, et al. Experimental study on the rheological properties of turbid water in different concentrations[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(1): 43-51.

[20] TRAN D, STROM K. Floc sizes and resuspension rates from fresh deposits: Influences of suspended sediment concentration, turbulence, and deposition time[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2019, 229(C): 106397.

[21] 胡正红, 张婧, 刘兴年, 等. 泥石流浆体流变特性影响因素试验研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 131-136. HU Z H, ZHANG J, LIU X N, et al. Experimental study on rheological properties factors of debris flow slurry[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(2): 131-136.

[22] 吴望一. 流体力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1982. WU W Y. Fluid mechanics[M]. Beijing: Peking University Press, 1982.

[23] WANG Z Y, LARSEN P, XIANG W. Rheological properties of sediment suspensions and their implications[J]. Journal of Hydraulic Research, 2012, 32(4): 495-516.

[24] SHANMUGAM G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s-1990s): deep-water processes and facies models-a critical perspective[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(2): 285-342.

[25] 王欣志, 许国辉, 赵田林, 等. 含沙浑水体的黏度测量及应用分析[J]. 中国海洋大学学报, 2019, 49(2): 79-84. WANG X Z, XU G H, ZHAO T L, et al. Measurement and application analysis of viscosity of turbid water[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(2): 79-84.

[26] 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 X L, CHEN A D, ZHANG H, et al. Rheological characteristics and its influencing factors of dense cohesive sediments in the Huanghe River subaqueous delta[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(5): 127-134.

[27] SI G Y. Experimentally study the rheology of fine-grained slurries and some numericalsimulations of downslopes slurry movements[D]. Oslo: University of Oslo, 2007.

[28] 杨闻宇. 剪切载荷作用下高浓度黏性泥沙流变特性的实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014. YANG W Y. Experimental study on the rheological properties of dense cohesive sediments under shear loadings[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.

[29] 王晨希, 任宇鹏, 张毅, 等. 水下沉积物流速度特征及对管状结构物拖曳力试验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2021, 51(8): 49-57. WANG C X, REN Y P, ZHANG Y, et al. Experimental study on velocity characteristics of underwater sediment flow and drag force of structures[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(8): 49-57.

[30] 周慧广. 含沙浑水体的流动能力及对固定砂床剪切力的试验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2020. ZHOU H G. Experimental study on flow ability and fixed sand bed shear force of turbid suspension[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2020.

[31] 蔡伟华. 黏弹性流体动力学[M]. 北京：科学出版社, 2016. CAI W H. Viscoelastic fluid dynamics[M].Beijing: Science Press, 2016.

[32] 崔頔. 非饱和砂土的表观黏聚力研究[J]. 北方交通, 2014(2): 86-87. CUI Y. The research on apparent cohesion of unsaturation sand[J]. Northern Communications, 2014(2): 86-87.

[33] 王保栋. 河口细颗粒泥沙的絮凝作用[J]. 黄渤海海洋, 1994, 12(1): 71-76. WANG B D. Flocculation of fine sediments in estuaries[J]. Journal of Oceanograpgy of Huanghai & Bohai Seas. 1994, 12(1): 71-76.

[34] 刘德新, 岳湘安, 侯吉瑞, 等. 固体颗粒表面吸附水层厚度实验研究[J]. 矿物学报, 2005(1): 15-19. LIU D X, YUE X A, HOU J R, et al. Experimental study of adsorded water layer on solid particle surface[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2005(1): 15-19.

[35] KINEKE G C, STERNBERG R W, TROWBRIDGE J H, et al. Fluid-mud processes on the Amazon continental shelf[J]. Continental Shelf Research, 1996, 16(5): 667-696.

[36] 陈昌昀, 张鹏, 许国辉, 等. 落球法测定波动液化土粘滞性的试验研究[J]. 中国海洋大学学报, 2017, 47(6): 119-123. ZHANG C J, ZHANG P, XU G H, et al. The experimental study on viscosity of the wave-induced liquefaction silty soil by falling ball method[J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(6): 119-123.

# Rheological Characteristics of Muddy Water in Fine-Grained Sediments With Different Sandy Concentration

CHENG Zirui[1,2], REN Yupeng[3], ZHANG Zihan[1,2], TIAN Hao[1,2], XU Guohui[1,2]

(1. *Key Laboratory of Marine Environment and Ecology*, *Ministry of Education*, *Ocean University of China*, Qingdao 266100, China;
2. *Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China*, Qingdao 266100, China;
3. *College of marine geosciences*, *Ocean University of China*, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The near-bottom high-concentration muddy water bodies of sea bottom sediments in the estuarine and coastal areas, resulting from violent disturbance triggered by strong wave action, can give rise to undersea turbidity current, which plays an important role in transporting pollutants and carbonaceous matters from offshore areas to abyssal sea and also serves as one of the important forces driving land-sea interaction. The fluidity of near-bottom high-concentration sandy layers varies with different sand contents and constituents. Based on shear rate-shear stress relationship, this study analyzed the rheological properties of silt and

muddy water with different sand concentration. Combined with the rheological test results of muddy water with different powder and clay ratios and different contents made by predecessors, the silt muddy water is subdivided into Newtonian, transitional and Bingham fluids in the range of 100—1 350 kg/m$^3$ sediment concentration, and the changing limit diagram of rheological properties of silt-laden muddy water with silt and clay components is given, which provides a reference for the classification of fluid properties in the study of near-bottom high-concentration sediment-laden layer movement.

**Key words:** sediment with high-concentration；silty-clay ratio；rheological behavior；intense wave action

**Received:** January 6, 2022