

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.013

鄱阳湖黏性底质淤泥固结起动规律试验

周苏芬^{1,2}, 黄志文^{1,2}, 王志超^{1,2}

(1. 江西省水利科学院, 江西 南昌 330029; 2. 江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心, 江西 南昌 330029)

摘要: 为研究鄱阳湖黏性底质淤泥固结起动规律, 采用玻璃水槽测量了不同淤积历时及水深条件下黏性底质淤泥起动流速, 根据试验数据拟合得到鄱阳湖底质淤泥起动与淤积历时和水深的经验公式, 并将结果与相关文献泥沙起动经验公式计算结果进行对比。结果表明, 鄱阳湖黏性底质淤泥固结程度随着淤积历时的增加经历了新落淤、固结初期、加速固结、固结稳定 4 个阶段, 起动流速与水深呈正相关关系; 淤积 1 d 起动流速与相关文献泥沙起动经验公式计算结果较接近, 淤积历时越长, 试验结果与经验公式计算结果相差越大。

关键词: 黏性泥沙; 固结; 起动流速; 模型试验; 鄱阳湖

中图分类号: TV851 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2023)03-0099-06

Experimental study on initiation law of consolidated cohesive sediment in Poyang Lake

ZHOU Sufen^{1,2}, HUANG Zhiwen^{1,2}, WANG Zhichao^{1,2}

(1. Jiangxi Academy of Water Sciences and Engineering, Nanchang 330029, China;

2. Jiangxi Provincial Technology Innovation Center for Ecological Water Engineering in Poyang Lake Basin, Nanchang 330029, China)

Abstract: In order to study the initiation law of consolidated cohesive sediments in Poyang Lake, the incipient velocity of cohesive fine sediment under different deposition duration and water depth was measured in a glass flume. Through a series of experiments on incipient motions after the deposition and consolidation, the variation laws of incipient velocity affected by the deposition duration and the water depth were found. According to the test data, the empirical formulas for the incipient motion, deposition duration and water depth of Poyang Lake sediment were obtained by fitting process, and the test results were compared with the calculation results of empirical formulas for the sediment incipient motion in the relevant literature. The results show that the consolidation degree of cohesive sediments in Poyang Lake went through four stages as the duration of sedimentation increases: the new sedimentation, the initial consolidation, the accelerated consolidation, and the stable consolidation. There was a positive correlation between the incipient velocity and the water depth. Meanwhile, the incipient velocity of sediment deposited for one-day was close to the result calculated by the empirical formula, the longer the deposition duration, the greater the difference between test results and empirical formula calculation results.

Key words: cohesive sediment; consolidation; incipient velocity; model test; Poyang Lake

水动力作用下的细颗粒泥沙运动是淤泥质湖区湖滩淤积和地貌演变的主要因素。细颗粒泥沙极易形成絮团或絮网结构, 发生絮凝沉降现象, 引起泥沙淤积, 产生固结现象, 从而加大细颗粒泥沙重新起动所需的流速。黏性细颗粒泥沙起动主要受到水流切应力、上举力、自身重力及颗粒之间黏结力的作用。水流作用力是黏性细颗粒泥沙起动的主要动力, 自身重力及颗粒间的黏结力是黏性细颗粒泥沙起动的阻力, 并随着密实程度的逐渐增加, 颗粒间的黏结力将成为影响泥沙起动的关键因素之一^[1]。影响黏性细颗粒泥沙起动的因素较多, Zreik 等^[2]发现黏性细颗粒泥沙在淤积固结条件下起动主要受淤积历时、温度、淤积环境、淤积层厚度的影响; 卢佩霞等^[3]认为黏性沉积物表面侵蚀的临界剪切应力与团粒粒径及有效密度呈幂函数关系。目前黏性泥沙的起动流速研究成果多是基于实测资料得出的经验关系, 如窦国仁等^[4-6]建立了适用于细颗粒泥沙

基金项目: 江西省水利厅科技项目(201921YBKT31); 长江科学院开放研究基金(CKWV2021865/KY); 江西省水利科技重点项目(202224ZDKT13, 202124ZDKT02); 江西省重点研发计划(20203BBGL73224, 20203BBGL73221)

作者简介: 周苏芬(1989—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: 512595913@qq.com

通信作者: 黄志文(1979—), 男, 教授级高级工程师, 硕士, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: zw_huang626@163.com

引用本文: 周苏芬, 黄志文, 王志超. 鄱阳湖黏性底质淤泥固结起动规律试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 99-104.

ZHOU Sufen, HUANG Zhiwen, WANG Zhichao. Experimental study on initiation law of consolidated cohesive sediment in Poyang Lake [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 99-104.

的起动流速公式;Righetti 等^[7]推导出考虑黏结作用的黏性希尔兹曲线描述黏性泥沙的起动;吕平等^[8]通过试验研究黄河花园口淤泥和长江细颗粒泥沙起动与干容重及黏性颗粒含量之间的关系,并率定了经验公式;辛殿文等^[9]在进行现场沙样淤积起动流速试验时发现试验结果与现有经验公式计算结果存在一定的差距后,提出了相关泥沙起动流速的经验公式;马菲等^[10]从水动力和黏性泥沙的组成及结构等方面分析了影响黏性泥沙起动的因素;甘甜等^[11]通过分析固结黏性泥沙起动时的受力,推导了黏性泥沙起动公式;赵万杰^[12]根据黏性泥沙的起动试验,建立了与干密度、含水率、黏性颗粒含量相关的起动流速经验公式;李华勇等^[13]提出一种有压流下细颗粒泥沙起动时刻定量判别与起动流速测量的方法。从以上研究可以发现,由于水环境及泥沙自身等条件的不同,不同地区的黏性细颗粒泥沙起动流速与经验公式计算结果均存在一定的差距。

近年来,随着五河上游水库建设(如峡江、浯溪口和山口岩等控制性水利枢纽工程)^[14]以及鄱阳湖流域水土保持工作的持续开展,年均入湖径流量^[15]和泥沙总量有所减少,但细颗粒泥沙占比增大,而含有一定数量的细颗粒泥沙容易发生絮凝现象^[16]。形成的絮团落淤到湖底后,因为水深和固结程度等条件不同,细颗粒泥沙重新起动难易程度存在较大差异,可能造成研究者对河床演变的预测产生较大误差。张琍等^[17]研究表明,鄱阳湖中心湖区、入江水道等区域淤积泥沙较细,以悬沙为主,这就为鄱阳湖泥沙絮凝沉降提供了有利条件。通过室内泥沙静水沉降试验并微距拍摄可以发现细颗粒泥沙相互吸附成团(图1),形成不同形状的半透明絮团结构,说明鄱阳湖黏性细颗粒泥沙存在絮凝现象,测得其发生絮凝的临界粒径为0.027~0.029 mm^[18]。本文对鄱阳湖湖底黏性细颗粒泥沙起动流速进行了研究,研究结果对于理解鄱阳湖湖区黏性底质淤泥固结起动规律、合理预测湖床演变趋势具有现实意义。



图1 沉降筒微距拍摄泥沙絮凝现象
Fig.1 Microscale photography of sediment flocculation phenomenon in settling tube

1 试验简介

1.1 试验装置

试验在鄱阳湖模型试验研究基地矩形自循环式玻璃水槽中进行。水槽长度为40 m,宽度为1 m,高度为1 m,如图2所示。试验通过高精度电磁流量计控制流量,下游尾门控制水深,采用LS-3C 光电旋浆流速仪测量流速,温度计测量水温。由于黏性泥沙起动流速较大,为增加水槽中的水流流速,在水槽下游用砖和水泥对水槽进行缩窄,缩窄段长度为6 m,宽度为0.5 m,在缩窄段预留放置沙样盒凹槽,凹槽长、宽、高分别为0.3 m、0.2 m、0.05 m,使得沙样盒与水槽底部齐平。为了避免水槽缩窄导致试验区域流态不稳,在缩窄段前后用圆弧形导墙衔接,并在观测段前、后方分别预留4.50 m、1.2 m 长的水流过渡段。

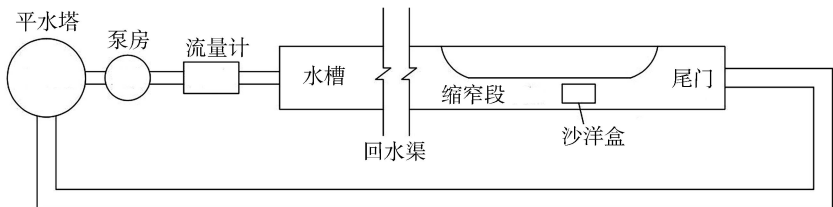


图2 泥沙起动试验系统示意图
Fig.2 Schematic diagram of sediment incipient test system

1.2 沙样处理

2020 年12月,在湖区6个典型测点,从北向南依次为屏峰、星子、都昌、吴城、棠荫、康山进行床沙取样,取样地点主要位于河床的浅滩处,如图3所示。河床浅滩处床沙相对较细,主要是汛期水体中悬移质泥沙淤积形成。利用双氧水对所取沙样进行多次清洗去除有机质,采用BT-9300ST 激光粒度仪对烘干后的沙样进行粒度分析,各取样点泥沙级配曲线如图4所示。从图4可以看出各取样点泥沙级配差异不大,中值粒径为0.020~0.045 mm。选取于康山所采沙样进行黏性底质淤泥固结起动试验,其中值粒径为0.026 mm,黏性细沙($d<0.05$ mm)占比为80%左右。试验前将沙样加适量水搅拌均匀,静置1 d后去除析出的清水,再次搅拌

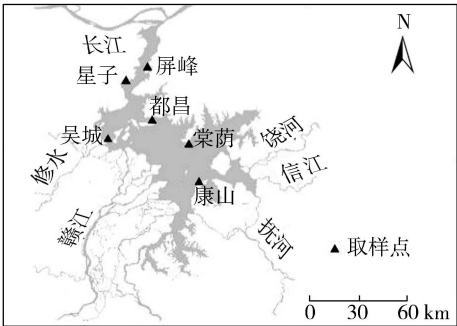


图3 鄱阳湖湖区及泥沙采样点示意图

Fig.3 Schematic diagrams of Poyang Lake and sediment sampling sites

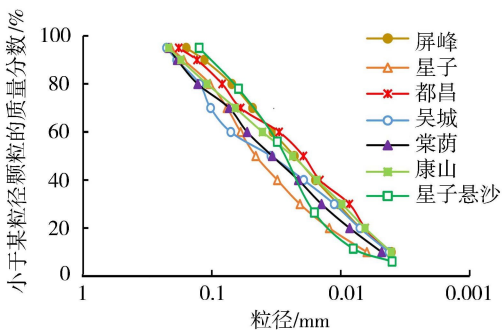


图4 鄱阳湖沙样级配曲线

Fig.4 Sediment grading curve of Poyang Lake

均匀装入沙样盒内。将沙样盒置于淹没沙样盒的大盆中进行水下淤积固结,分别淤积1 d、5 d、10 d、15 d、20 d、30 d、40 d后,取出沙样放入玻璃水槽进行固结起动试验,观测沙样在水深为10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、30 cm时的起动流速(表1)。

1.3 起动标准判断

泥沙起动标准的确定是影响试验结果精度的关键之一。王军等^[19]将固结状态下黏性泥沙起动状态分为少量动和大量动两种临界起动标准,本次试验将少量动,即沙样表面形态出现间隙性的可以感知的变化,如淤积物表面出现阵阵烟状物,或局部凹坑等状况定为泥沙起动。泥沙的起动条件一般用拖电力、垂线平均流速或水流的功率指标来表达,本文选用沙样盒中心垂线平均流速作为判别泥沙的临界起动流速。

首先将淤泥沙样盒放入水槽凹槽中,为防止未到试验要求水深时泥沙起动,缓慢向槽内充水至试验水深;然后打开控制流量阀门,将初始流量控制在较小值,观察淤泥状态;逐渐增加流量,并通过下游尾门控制水深将其保持在试验要求范围,直到淤泥表面出现烟状物或局部凹坑,即判定为泥沙开始起动;待水深、流速稳定后采用LS-3C光电旋浆流速仪测量沙样盒中心垂线平均流速作为泥沙的起动流速并记录;将尾门开度减小,逐渐抬高水槽内水位达到下一要求水位;重复上述试验步骤,直至该淤积历时全部水深起动流速测量完成。

表1 不同工况下底质淤泥起动流速

Table 1 Sediment incipient velocity in different test conditions

淤积 历时/d	起动流速/(cm·s ⁻¹)				
	水深为 10 cm	水深为 15 cm	水深为 20 cm	水深为 25 cm	水深为 30 cm
1	32.62	35.14	37.59	39.41	41.68
5	41.48	45.57	50.82	54.32	59.00
10	45.33	50.87	55.13	59.63	65.11
15	75.85	83.07	86.25	89.27	92.77
20	86.54	88.88	91.66	93.87	98.22
30	88.94	92.63	96.73	101.05	103.75
40	89.77	93.61	97.84	102.22	104.63

2 试验结果与分析

2.1 淤积历时对起动流速的影响

从淤积历时与起动流速关系曲线(图5(a))可以看出,随着淤积历时的延长,试验沙样起动流速呈增大

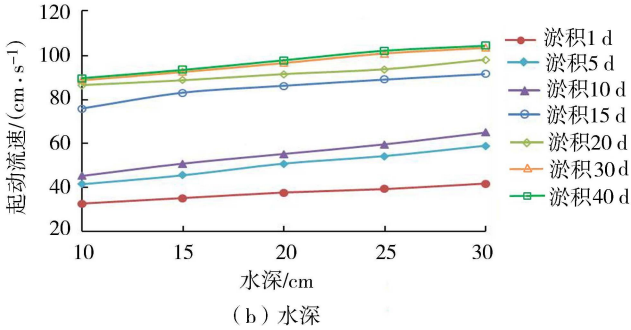
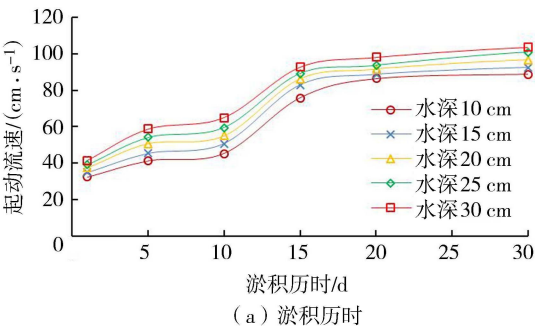


图5 淤积历时和水深与起动流速关系

Fig.5 Relationship curve of deposition duration, water depth and sediment incipient velocity

趋势。相同水深沙样起动流速随着淤积历时的增加出现4个发展阶段:1~5 d时沙样起动流速随着淤积历时的增加快速增加,此时细颗粒泥沙占比较大,在落淤过程中发生絮凝沉降,形成絮团或絮网,相对于单颗粒泥沙起动来说,起动流速快速增加,此时湖底泥沙处于新落淤阶段;5~10 d时絮团或絮网间的空隙进一步被细颗粒泥沙填满,开始出现固结现象,但固结速度较慢,颗粒之间的黏结力增长较慢,所以此时起动流速增速放缓,湖底泥沙处于固结初期阶段;10~15 d时起动流速增速重新加快,主要是因为随着时间的延长,泥沙颗粒间的孔隙率进一步降低,逐渐呈密实状态,湖底泥沙到达加速固结阶段;但泥沙颗粒间的孔隙率不会随着淤积历时的增加无限降低,当孔隙率达到上限值时,淤积历时对起动流速的影响很小,因而15~40 d时起动流速增速又逐渐放缓,此时为固结稳定阶段。从上述发展状况可以推测:在固定水深条件下,随着淤积历时的不断增加,其对黏性底质淤泥起动流速的影响逐渐减弱,起动流速趋于稳定。

2.2 水深对起动流速的影响

从水深与泥沙起动流速曲线关系(图5(b))可以看出,泥沙起动流速随着水深增大而增大,呈正相关关系。淤积1 d、水深10 cm时起动流速为32.62 cm/s;淤积40 d、水深30 cm时起动流速达104.63 cm/s;当淤积历时在15 d及以上时,起动流速随着水深的增加而增加的速率基本相同。此外,图5(b)表明淤积历时相同时,泥沙起动流速与水深有较好的相关关系,对不同淤积历时所测的起动流速值进行拟合,结果见表2。公式拟合相关系数 R^2 均大于0.95,拟合效果较好。

2.3 试验结果分析

我国老一代学者对于黏性泥沙起动规律开展了大量研究,并提出了黏性细颗粒泥沙起动流速经验公式。为进一步分析鄱阳湖底质淤泥起动规律,将本文试验所得起动流速结果与窦国仁^[4]、张瑞瑾^[5]和沙玉清^[6]起动流速公式计算结果进行比较。

窦国仁^[4]公式、张瑞瑾^[5]公式和沙玉清^[6]公式分别为

$$u_c = m \ln \left(11 \frac{h}{K_s} \right) \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d + 0.19 \frac{g h \delta + \varepsilon_k}{d}} \tag{1}$$

$$u_c = \left(\frac{h}{d} \right)^{0.14} \sqrt{17.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d + 6.05 \times 10^{-7} \frac{10 + h}{d^{0.72}}} \tag{2}$$

$$u_c = \sqrt{1.1 \frac{0.7 - \varepsilon^4}{d} d + 0.43 d^{3/4} h^{1/5}} \tag{3}$$

式中: u_c 为起动流速,m/s; ε 为孔隙率,对一般稳定淤泥取0.4; d 为粒径,mm; h 为水深,m; m 为泥沙起动状态(个别动为0.265,少量动为0.320,大量动为0.408); K_s 为河床粗糙度,对于平整床面,当 $d \leq 0.5$ mm时, $K_s = 0.5$ mm,当 $d > 0.5$ mm时, $K_s = d_{50}$; ε_k 为黏结力系数,取 $2.56 \text{ cm}^3/\text{s}^2$; γ_s 、 γ 分别为泥沙颗粒和水的容重,对于天然泥沙,一般取 $(\gamma_s - \gamma)/\gamma = 1.65$ 。根据交叉试验丝试验, $\delta = 0.213 \times 10^{-4}$ cm。

对比结果见图6。从图6可以看出淤积1 d的泥沙在不同水深下的起动流速与窦国仁^[4]、张瑞瑾^[5]及沙玉清^[6]起动流速公式计算结果比较接近,最大绝对误差在10 cm/s以内。淤积5~30 d的泥沙起动流速均大于窦国仁^[4]、张瑞瑾^[5]及沙玉清^[6]起动流速公式计算值,且沉降历时越长,试验值与计算值的差值越大。其中,与窦国仁^[4]公式计算结果相差最大,相差最大值淤积5 d为20.46 cm/s,淤积10 d为26.57 cm/s,淤积20 d为58.96 cm/s,淤积30 d为65.21 cm/s,淤积40 d为66.09 cm/s。分析产生差别的主要原因,窦国仁^[4]、张瑞瑾^[5]及沙玉清^[6]起动流速公式都是针对新淤黏性土,此时泥沙由于淤积历时较短,泥沙

表2 试验数据拟合关系式
Table 2 Statistical table of fitting relation of test data

淤积历时/d	拟合关系式	相关系数 R^2
1	$u_c = 0.0408 (h/d)^{0.25}$	0.95
5	$u_c = 0.0345 (h/d)^{0.30}$	0.99
10	$u_c = 0.0392 (h/d)^{0.30}$	0.99
15	$u_c = 0.2416 (h/d)^{0.14}$	0.99
20	$u_c = 0.2686 (h/d)^{0.14}$	0.99
30	$u_c = 0.2703 (h/d)^{0.14}$	0.98
40	$u_c = 0.2726 (h/d)^{0.14}$	0.98

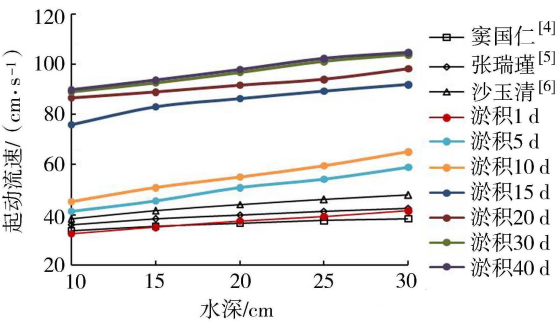


图6 试验结果与经验公式比较

Fig. 6 Comparison of experimental results with calculation results of empirical formulas

的密实程度较低,颗粒间的黏结力不大,抗起动阻力较小,相对较容易起动。而随着淤积历时的增加,泥沙固结程度增加,细颗粒泥沙间的黏结力逐渐增大,泥沙起动所需的流速越大。

从图 6 可以看出,鄱阳湖黏性底质淤泥固结起动规律与窦国仁^[4]、张瑞瑾^[5]和沙玉清^[6]起动流速公式存在一定的差异。黏性淤泥不同淤积历时起动流速不同主要是淤积过程中不断密实而使得淤积物干容重产生变化,参照唐存本^[20]黏性淤积物干容重大小对起动流速有重要影响的观点,建立鄱阳湖康山站黏性底质淤泥固结起动流速公式:

$$u_c = \left[\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}gd + \alpha \left(\frac{\gamma_t}{\gamma_d} \right)^n \right]^{0.5} \left(\frac{h}{d} \right)^\beta$$

(4)

式中: γ_t 为淤积历时 t 时淤积物干容重; γ_d 为淤积稳定后淤积物干容重; α 、 β 、 n 为经验参数。

根据张耀哲等^[21]的研究结论,黏性泥沙淤积过程中 γ_t 与 γ_d 的比值和 t 、淤积稳定年限 t_d 、 d 及孔隙率 ε_0 有关,即:

$$\frac{\gamma_t}{\gamma_d} = \frac{[1 - \varepsilon_0(1 - 2^{\frac{1}{3}\sqrt{d}})] + (1 - 2^{\frac{1}{3}\sqrt{d}})(\varepsilon_0 - \frac{\pi}{6})\left(\frac{t}{t_d}\right)^\varphi}{\left[1 - \frac{\pi}{6}(1 - 2^{\frac{1}{3}\sqrt{d}})\right]}$$

(5)

其中 $t_d = 1/(4^{\frac{1}{3}\sqrt{d}})$

式中 φ 为经验指数。 ε_0 、 φ 取值见表 3;康山站泥沙 $d=0.026\text{ mm}$,故 ε_0 、 n 分别取 0.6、1/4。

根据表 2 及试验数据,拟合康山站黏性淤泥起动流速公式为

$$u_c = \left[\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}gd + 9.4643 \left(\frac{\gamma_t}{\gamma_d} \right)^{33} \right]^{0.5} \left(\frac{h}{d} \right)^\beta$$

(6)

当 $t=1\text{ d}$ 时, $\beta=0.25$; $1\text{ d}<t<15\text{ d}$ 时, $\beta=0.30$; $t\geq 15\text{ d}$ 时, $\beta=0.14$ 。

屏峰、星子、都昌、吴城、棠荫、康山床沙采样结果显示,各取样点泥沙级配差异不大,除都昌 $d=0.02\text{ mm}$,其余各测点 $d>0.025\text{ mm}$,式(5)中 ε_0 、 φ 取值基本在 $0.025\text{ mm}\leq d\leq 0.05\text{ mm}$ 范围,故式(6)对于鄱阳湖除都昌附近其他区域的底质淤泥起动流速具有一定的适用性。

3 结 论

- a. 随着淤积历时的延长,由于黏性细颗粒泥沙淤积固结密实程度不同,起动流速的增长经历 4 个发展阶段,即新落淤阶段起动流速随淤积历时快速增大,固结初期阶段起动流速增速放缓,加速固结阶段起动流速增速进一步加大,到固结稳定阶段后,起动流速增速放缓,并逐渐趋于稳定。
- b. 鄱阳湖黏性底质淤泥随着所处水深的增大,重新起动的难度增加,起动流速增大。
- c. 试验结果与窦国仁^[4]、张瑞瑾^[5]及沙玉清^[6]起动流速公式相比,淤积 1 d 泥沙起动流速较接近,随着淤积历时的增加,试验值与窦国仁^[4]、张瑞瑾^[5]及沙玉清^[6]起动流速公式计算值相差越来越大。
- d. 根据试验结果拟合了康山附近黏性淤泥起动流速公式,该公式对鄱阳湖其他区域黏性淤泥起动的判别也具有一定的适用性。

参考文献:

[1] 龚政,葛冉,冯骞,等. 泥沙颗粒间黏结力作用及其对泥沙起动影响研究进展[J]. 水科学进展,2021,32(5):801-812. (GONG Zheng,GE Ran,FENG Qian,et al. Cohesive forces between sediment particles and its impact on incipient motion of sediment;a review[J]. Advances in Water Science,2021,32(5):801-812. (in Chinese))

[2] ZREIK D A,KRISHNAPPAN B G,GERMAINE J T,et al. Erosional and mechanical strengths of deposited cohesive sediments [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1998,124(11):1076-1085.

[3] 卢佩霞,徐永福. 基于分形模型的黏性沉积物侵蚀临界剪切应力及其验证[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):445-450. (LU Peixia,XU Yongfu. Critical shear stress of surface erosion for the cohesive sediments based on the fractal model and its validation[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(5):445-450. (in Chinese))

- [4] 窦国仁. 论泥沙起动流速[J]. 水利学报, 1960(4): 44-59. (DOU Guoren. On threshold velocity of sediment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1960(4): 44-59. (in Chinese))
- [5] 张瑞瑾. 河流泥沙工程学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1981.
- [6] 沙玉清. 泥沙运动的基本规律: 起动流速[J]. 泥沙研究, 1956(4): 14-25. (SHA Yuqing. The basic law of sediment movement-velocity of movement[J]. Journal of Sediment Research, 1956(4): 14-25. (in Chinese))
- [7] RIGHETTI M, LUCARELLI C. May the Shields theory be extended to cohesive and adhesive benthic sediments? [J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2007, 112(C5): C05039.
- [8] 吕平, 谈广鸣, 王军. 黏性泥沙淤后起动流速试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(2): 56-58. (LYU Ping, TAN Guangming, WANG Jun. Study on the incipient motion velocity of cohesive sediment after deposition and consolidation[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(2): 56-58. (in Chinese))
- [9] 辛殿文, 董志慧. 徐闻电厂取水口附近黏性泥沙起动流速实验研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(8): 62-64. (XIN Dianwen, DONG Zhihui. Experimental study on starting elocity of cohesive sediment near water intake of Xuwen Power Plant[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(8): 62-64. (in Chinese))
- [10] 马菲, 韩其为, 赵弟明. 黏性细泥沙起动的探讨[J]. 泥沙研究, 2015(1): 75-79. (MA Fei, HAN Qiwei, ZHAO Diming. Discussion on initiation of cohesive fine sediment[J]. Journal of Sediment Research, 2015(1): 75-79. (in Chinese))
- [11] 甘甜, 谈广鸣. 压力管道与明渠中固结黏性泥沙起动对比分析[J]. 中国农村水利水电, 2017(9): 122-124. (GAN Tian, TAN Guangming. Comparative study on incipient motion of consolidated cohesive sediment in pressured pipe flow and open channel flow[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(9): 122-124. (in Chinese))
- [12] 赵万杰. 黄河下游黏性泥沙起动冲刷试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
- [13] 李华勇, 陈远中, 陈槐. 一种有压流下细颗粒泥沙起动试验方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(3): 350-355. (LI Huayong, CHEN Yuanzhong, CHEN Huai. Method for measuring the incipient velocity of fine-grained sediment in pressure flow[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(3): 350-355. (in Chinese))
- [14] 雷声. 2020年鄱阳湖洪水回顾与思考[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 7-12. (LEI Sheng. Review and reflection on Poyang Lake flood in 2020[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 7-12. (in Chinese))
- [15] 周建军, 张曼. 长江鄱阳湖问题的原因及湖口建闸的影响[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 1-12. (ZHOU Jianjun, ZHANG Man. Eco-problem of Poyang Lake in Yangtze River and effect of sluice gate construction at lake's outlet[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 1-12. (in Chinese))
- [16] 金鹰, 王义刚, 李宇. 长江口黏性细颗粒泥沙絮凝试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(3): 61-63. (JIN Ying, WANG Yigang, LI Yu. Experimental study on flocculation of cohesive fine grain sediment at Yangtze River Estuary[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2002, 30(3): 61-63. (in Chinese))
- [17] 张琰, 陈晓玲, 黄珏, 等. 鄱阳湖丰、枯水期悬浮体浓度及其粒径分布特征[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2014, 48(5): 743-750. (ZHANG Li, CHEN Xiaoling, HUANG Jue, et al. The distribution pattern of the mass concentration and grain size of the suspended particulate matters of the Poyang Lake in wet and dry seasons[J]. Journal of Huazhong Normal University (Natural Science), 2014, 48(5): 743-750. (in Chinese))
- [18] 黄志文, 杨春瑞, 邓金运, 等. 鄱阳湖黏性细颗粒泥沙絮凝特性研究[J]. 泥沙研究, 2022, 47(6): 29-34. (HUANG Zhiwen, YANG Chunrui, DENG Jinyun, el at. Study on flocculation characteristics of cohesive fine sediment in Poyang Lake[J]. Journal of Sediment Research, 2022, 47(6): 29-34. (in Chinese))
- [19] 王军, 谈广鸣, 舒彩文. 固结状态下黏性泥沙起动规律试验研究[J]. 泥沙研究, 2014(12): 25-29. (WANG Jun, TAN Guangming, SHU Caiwen. Experimental study on inception of consolidated cohesive sediment[J]. Journal of Sediment Research, 2014(12): 25-29. (in Chinese))
- [20] 唐存本. 泥沙起动规律[J]. 水利学报, 1963(2): 1-12. (TANG Cunben. The law of sediment movement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1963(2): 1-12. (in Chinese))
- [21] 张耀哲, 王敬昌. 水库淤积泥沙干容重分布规律及其计算方法的研究[J]. 泥沙研究, 2004(3): 54-58. (ZHANG Yaozhe, WANG Jingchang. Study on distribution and caculation method of reservior sediment dry bulk density[J]. Journal of Sediment Research, 2004(3): 54-58. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-04-14 编辑: 胡新宇)