

三峡库区—长江口黏性泥沙絮凝研究现状

郭 超^{1,2}, 龚志龙^{1,2}

(1.水利部长江重点实验室,武汉 430010; 2.长江科学院 河流研究所,武汉 430010)

摘 要:为揭示长江流域泥沙淤积规律和污染物分布特征,基于已有文献资料与三峡库区—长江口原位现场絮凝实测数据,分析了絮团时空变化特征及主要影响因子。絮团时空变化特征观测和分析结果表明:①从三峡库区—长江口均观测到明显的细颗粒泥沙絮凝现象,三峡库区、长江中下游干流、长江口絮团粒径范围分别为22.0~58.0、25.4~101.4、32.6~179.0 μm ,洪季絮团粒径从三峡库区—长江口沿程呈现先减小后增大的趋势,枯季长江中下游干流各站(城陵矶—大通)絮团粒径均值大于长江口;不同区域絮团在水体垂线方向的分布存在差异性,汉口站、湖口站粒径从表层到底层逐渐增大。②洪季各区域絮团有效密度差异不大,枯季长江口絮团有效密度大于中下游干流絮团有效密度。③三峡库区、长江中下游干流、长江口絮团沉速范围分别为0.13~0.61、0.30~0.68、0.46~2.32 mm/s,徐六泾絮团沉速从表层到底层逐渐增大。絮团时空变化特征的主要影响因子分析结果表明:对于三峡库区—长江口而言,较弱的水动力条件、较小的原始分散颗粒、较高的含沙量更有利于絮团形成、发育;盐度对泥沙絮凝的促进作用在长江口较为显著;长江中下游干流部分区域絮凝程度的加深受到有机质的影响。研究成果不仅可以揭示黏性泥沙基本理论和运动规律,而且对长江流域内航道、湖库淤积治理,污染物分布特征及迁移转化探索具有借鉴意义。

关键词:黏性泥沙;絮凝机理;絮团特征;三峡库区—长江口

中图分类号:TV142

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2026)07-0001-10

Research Status on Cohesive Sediment Flocculation from the Three Gorges Reservoir to the Yangtze River Estuary

GUO Chao^{1,2}, GONG Zhi-long^{1,2}

(1.Key Laboratory of Changjiang River of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China; 2.River Research Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: [Objective] This study aims to clarify the laws of sediment deposition and the distribution characteristics of pollutants in the Yangtze River Basin. To fill the research gap regarding the spatio-temporal evolution of flocs and their driving factors along the mainstream from the Three Gorges Reservoir (TGR) Area to the Yangtze River estuary, this research systematically explores the variation rules of flocs and identifies their key influencing factors, so as to provide theoretical and practical support for sediment regulation and pollutant research in the basin. [Methods] Combining published literature and in-situ field measurement data of sediment flocculation collected from the TGR Area to the Yangtze River estuary, this paper conducts a comprehensive analysis on the spatio-temporal variation characteristics of sediment flocs. Field observations and statistical analyses are adopted to quantify the particle size, effective density and settling velocity of flocs in different river sections, different seasons and different water depths. Meanwhile, the correlations between floc properties and hydrodynamic conditions, sediment concentration, salinity and organic matter are further discussed to determine the dominant factors affecting floc formation and development. [Results] Obvious flocculation of fine-grained sediment was observed throughout the reach from the TGR Area to the Yangtze River estuary. The floc particle size ranged from 22.0 μm to 58.0 μm in the TGR Area, 25.4 μm to 101.4 μm in the middle and lower mainstream of the Yangtze River, and 32.6 μm to 179.0 μm in the

收稿日期:2025-05-23;修回日期:2025-07-31;接受日期:2025-08-04

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52379058);中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(CKSF2025153/HL)

作者简介:郭 超(1990-),男,湖北武汉人,高级工程师,博士,主要从事河湖保护与治理研究。E-mail:guoc@mail.crsri.cn

通信作者:龚志龙(2001-),男,江西宜春人,硕士研究生,主要从事河湖保护与治理研究。E-mail:zlgong123@163.com

Yangtze River estuary. During the flood season, the floc particle size first decreased and then increased along the river from the TGR Area to the estuary. In the dry season, the average floc particle size at each monitoring station from Chenglingji to Datong in the middle and lower mainstream was larger than that in the estuary. Vertical distribution of floc size varied across regions: at Hankou and Hukou stations, floc particle size gradually increased from the water surface to the bottom layer. There was no significant difference in the effective density of flocs among different regions in the flood season. In the dry season, the effective density of flocs in the estuary was notably higher than that in the middle and lower mainstream. In terms of settling velocity, the ranges were 0.13~0.61 mm/s for the TGR Area, 0.30~0.68 mm/s for the middle and lower mainstream, and 0.46~2.32 mm/s for the estuary. At Xuliujing station, the settling velocity of flocs presented an upward trend from the surface layer to the bottom layer. Weak hydrodynamic conditions, fine primary sediment particles and high sediment concentration were conducive to the formation and growth of flocs along the entire study reach. Salinity exerted a prominent promoting effect on sediment flocculation in the estuary area, while organic matter was a vital factor that intensified flocculation in partial sections of the middle and lower mainstream. [**Conclusions**] This study quantitatively reveals the spatio-temporal distribution patterns and vertical stratification features of floc particle size, effective density and settling velocity along the Yangtze River from the TGR to the estuary, and clarifies the differentiated controlling mechanisms of multiple environmental factors on flocculation in different river segments. The findings improve the basic theoretical system of cohesive sediment movement in large river basins. Practically, the research results offer important references for the prevention and control of waterway, lake and reservoir sedimentation in the Yangtze River Basin, as well as the investigation on distribution, migration and transformation of pollutants. Furthermore, the differentiated influence rules of hydrodynamic force, salinity and organic matter summarized in this paper can provide a new research perspective for follow-up studies on river sediment dynamics and pollutant migration in similar large river systems.

Key words: cohesive sediment; flocculation mechanism; floc characteristics; Three Gorge Reservoir area to the Yangtze River estuary

0 引 言

根据粒径大小,通常把泥沙分为黏土($<4\ \mu\text{m}$)、粉砂($4\sim62\ \mu\text{m}$)和砂($>62\ \mu\text{m}$)。黏性泥沙是黏土、粉砂、少量非黏性细沙、有机物和水组成的混合物,广泛分布在河流、湖泊、水库、河口及海岸水体中。由于粒径较小,黏性特征显著,在一定条件下黏性泥沙具有一定的絮凝特性,会彼此聚集,形成较大的絮团状聚集体(简称絮团)。其所形成的絮团是天然水体中黏性泥沙的主要输运形态,絮凝改变泥沙颗粒的比表面积、粒径及有效密度等特性,进而影响泥沙颗粒的运动过程,尤其影响泥沙的沉降过程^[1]。最初絮凝研究主要集中在长江口^[2],随着研究区域扩大与观测技术进步,在长江干流等流域区域发现了絮凝现象,并开展了相关研究^[3]。长江是中国第一大河,流域综合利用任务广泛而复杂,包括水资源开发利用、防洪、治涝、灌溉、航运、中下游干流河道整治等。目前三峡水库细颗粒泥沙淤积严重,加之长江口受盐度作用泥沙絮凝现象频发,致使流域生源物质时空格局改变,进而影响重金属、有机物等污染物质的输移和转运。因

此,系统梳理长江流域絮团特性及絮凝时空变化特征,不仅有助于揭示黏性泥沙基本理论和运动规律,对长江流域内航道、湖库淤积治理,污染物分布特征及迁移转化研究也具有重大意义。

1 长江中下游干流泥沙絮凝观测概况

1.1 流域概况

长江从宜昌—湖口为中游,长 955 km;湖口—大通为下游,长 338 km。大通向下至水下三角洲前缘(约 30~50 m 等深线)长达 700 余千米的区域定义为河口区,即长江口,包含徐六泾、南支、北支、南槽、北槽等区域(图 1)。

1.2 径流及输沙特征

长江水量丰沛,大通站 2003—2023 年年平均入海径流量为 $8\ 673\times10^8\ \text{m}^3$,年内径流量有明显季节性变化,主要集中在洪季(5—10 月份),占全年径流量的 70.3%,枯季(11 月—次年 4 月)径流量较小,占比不足 30%^[4]。长江口属于淤泥质河口,入口站(大通站)多年平均年输沙量为 $1.25\times10^8\ \text{t}$,月输沙量与月径流量变化规律相似,长江口入海沙量主要集中在每

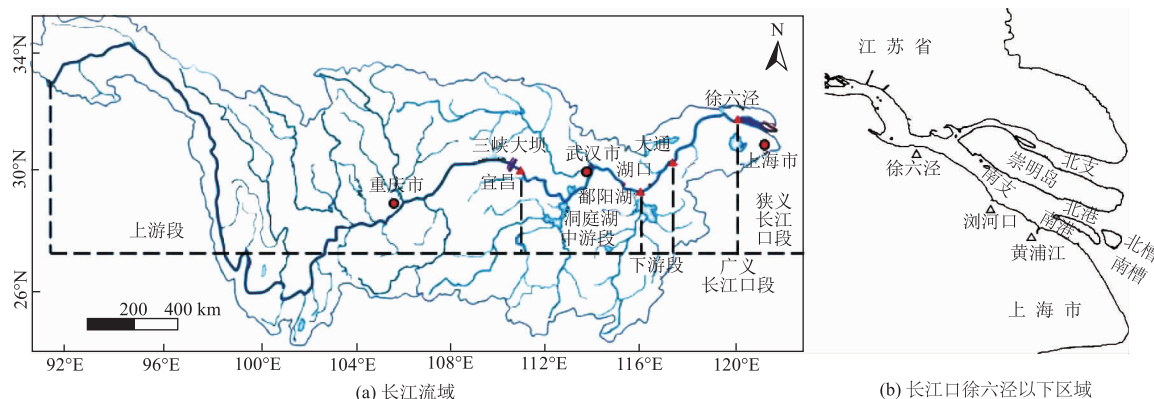
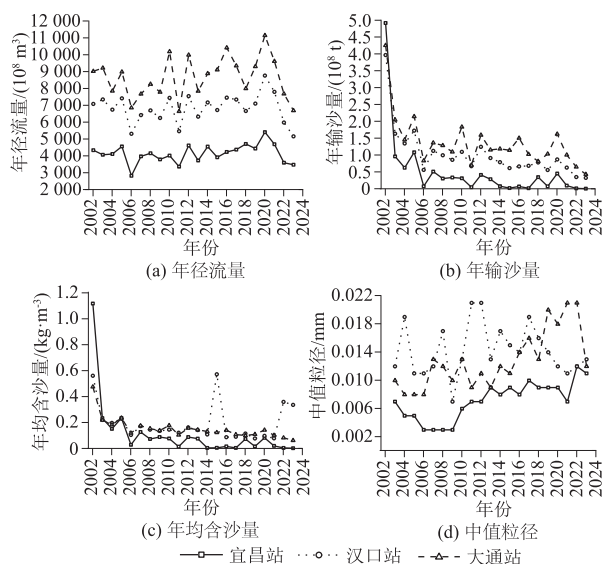


图1 长江流域及长江口徐六泾以下区域示意图

Fig.1 Schematic diagram of the Yangtze River basin and the Yangtze River estuary downstream Xuliujing

年的5—10月份,该时期输沙总量占全年输沙量的86.7%,而11月—次年4月输沙占比仅为13.3%^[5]。大通站2003—2023年年平均含沙量为 0.14 kg/m^3 ,长江口悬沙中 $<32 \mu\text{m}$ 的细颗粒泥沙占80%~90%^[6-7]。悬浮泥沙颗粒粒径组成的量级在长江口平面分布差异较小,粒径平均值范围为 $3.6 \sim 6.8 \mu\text{m}$,表现为枯季来沙少且粗,洪季来沙多且细^[6, 8]。

长江中下游干流宜昌、汉口、大通站3个站点径流量、输沙量、含沙量、中值粒径年际变化见图2,各站2003—2023年平均年径流量、年输沙量、年均含沙量、中值粒径分别为 $4.154 \times 10^8 \sim 8.674 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.30 \times 10^8 \sim 1.25 \times 10^8 \text{ t}$ 、 $0.07 \sim 0.18 \text{ kg/m}^3$ 、 $0.007 \sim 0.014 \text{ mm}$ ^[4]。



注:宜昌站和大通站2002年数据为1950—2002年资料系列的平均值;汉口站2002年数据为1954—2002年资料系列的平均值。

图2 三站点水沙参数年际变化

Fig.2 Interannual variations of water and sediment parameters at three stations

1.3 水沙化学特征

长江悬浮物主要含黏土矿物(水云母、蒙脱石、高岭石),碎屑硅酸盐矿物(石英、钠长石、微斜长

石),碎屑碳酸盐矿物(方解石、白云石),铁矿(磁铁矿和赤铁矿),占比分别为57.4%、31.7%、7.3%、2.9%^[9]。长江中下游干流阳离子浓度沿程分布如表1所示^[10],其中阳离子以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主,平均浓度为 35.7 mg/L 和 6.9 mg/L ,约占总阳离子浓度的83%。同时,水体总体呈弱碱性,pH值变化范围为 $7.52 \sim 7.98$ ^[11]。长江口处于淡水向咸水过渡的水体区域,水体化学特征与干流淡水环境相比有差异,水体中阳离子以 Na^+ 为主,浓度为 $643 \sim 5\,232 \text{ mg/L}$,占比达77%~84%,pH值变化范围为 $7.34 \sim 7.92$ ^[7]。

表1 长江中下游干流阳离子浓度分布

Table 1 Distribution of cation concentration in the main stream of the middle and lower reaches of Yangtze river

采样点位	阳离子浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)			
	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Na^+	K^+
荆州	10.1	45.6	9.4	1.7
洪湖	8.9	45.2	9.0	1.8
黄石	6.7	35.2	6.0	1.6
安庆	5.5	30.8	5.8	1.8
芜湖	5.8	30.4	7.1	1.4
扬州	6.0	31.6	5.3	1.8
南通	5.5	30.8	5.8	1.7

1.4 泥沙絮凝野外观测情况

自20世纪90年代起至今,长江流域泥沙絮凝野外观测地点包括徐六泾—长江口外段、中下游干流沿程各站以及三峡库区部分河段,观测时间涵盖了洪枯季、大小潮及憩流急流全过程。同时,学者多使用现场激光粒度仪(Laser In Situ Scattering and Transmissometry, LISST)获得现场絮团粒径分布和体积浓度等信息,而水体浊度和盐度等参数则通过光学后向散射浊度计第3代(Optical Back Scatter Sensor-3rd Advanced Generation, OBS-3A)测量而得。长江流域三峡库区—长江口泥沙絮凝野外观测情况如表2所示。按时空分布情况,长江口絮凝特征总结如表3所示。

表 2 长江流域三峡库区—长江口泥沙絮凝野外观测统计资料

Table 2 Statistical data of field observation on sediment flocculation from the TGR Area to the Yangtze River estuary

区域	观测时间	观测地点	观测设备	参考文献
长江口	1990 年 8 月	口内—口外	万能显微镜、凤凰显微摄影装置	[12]
长江口	1990 年 8 月	徐六泾—口外	库尔特粒度分析仪	[13]
长江口	1994 年 11 月、1996 年 9 月、1997 年 1 月	徐六泾—口门	FACScan 流式细胞仪	[2]
长江口	2003 年 6 月(洪季大小潮)	徐六泾	LISST-100、OBS-3A	[14]
长江口	2003—2006 年	口内—口外	LISST-100C	[15]
长江口	2005 年 1 月	长江口南槽	LISST-100C、OBS-3A	[16]
长江口	2006 年 2 月和 8 月	南槽、北槽、南支、南港	LISST-100	[6]
长江口	2008—2014 年	徐六泾	LISST-100C、OBS	[8]
长江口	2014 年 10 月(平常潮)	口内—口门	ADCP、库尔特激光粒径分析仪	[17]
长江口	2014 年 12 月(大小潮), 2015 年 1 月(大潮)	徐六泾、北港、佘山	LISST-100C、OBS-3A	[18]
中下游干流	2008 年 1 月、2009 年 4—10 月	宜昌—徐六泾等站	LISST-100、OBS-3A	[19]、[20]
中下游干流	2012 年 7—8 月	宜昌—芜湖等站	LISST-100X、ADCP	[3]
三峡水库	2011—2013 年 7—9 月	庙河等河段	LISST-100X、室内激光粒度仪	[21]
三峡水库	2012—2013 年 7—8 月	忠县、奉节河段	ADV、激光粒度仪	[22]
三峡水库	2013 年 7 月	奉节、庙河河段	LISST-100、马尔文激光粒度仪	[23]

注:1.FACScan (Fluorescence-Activated Cell Scan) 为流式细胞仪; ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) 为声学多普勒流速仪; ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 为声学多普勒流速剖面仪; LISST-100C、LISST-100X 为 100C 型、100X 型的现场激光粒度仪, 这 2 种型号的差异主要体现在粒径范围、灵敏度、稳定性和便携性等方面。2. 本文所用野外观测资料主要来源为其他学者的研究文献及作者参与的现场观测, 引用处已标注来源。

表 3 长江口絮团时空分布特征

Table 3 Spatio-temporal distribution characteristics of flocs in the Yangtze River estuary

观测地点	絮团粒径/ μm	絮团有效密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	流速/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	参考文献
徐六泾	40.0(洪季)、44.0(枯季)	309(洪季)、262(枯季)	0.26(洪季)、0.22(枯季)	[8]
徐六泾	39.8(大潮)、64.4(小潮)	1 173(大潮)、919(小潮)	1.14(大潮)、2.32(小潮)	[24]
徐六泾	30.0~60.0(表层)、50.0~80.0(中层)、>90.0(底层)	532~1 456	0.70~5.62	[14]
南槽	87.0(夏季)、45.5(冬季)	321(夏季)、610(冬季)	0.88(夏季)、0.46(冬季)	[15]
南北槽最大浑浊带	60.4~79.2(洪季)、42.5~66.6(枯季)	—	—	[6]

注:文献[14]、[24]为研究人员的同一批次观测。

2 长江泥沙絮凝时空变化特征

2.1 长江口

从表 3 得知,在时间变化特征方面,长江口泥沙絮凝在洪枯季、大小潮流、憩流急流等阶段呈现不同特征。观测结果显示:徐六泾小潮期间絮团平均粒径洪季较枯季约减小 9%,有效密度和沉降速度均增大 18%^[8];徐六泾水域表层絮团平均粒径大潮比小潮约减小 39%,有效密度增大 28%,静水沉速约减小 51%;絮团粒径憩流大于急流,有效密度涨急、落急大于涨憩、落憩^[14, 24];长江口南槽絮团平均粒径夏季比冬季约增大 92%,有效密度约减小 47%,沉速约增大 92%^[15];南北槽最大浑浊带区域的现场观测所得絮团粒径洪季比枯季约大 28%^[6]。

同时,长江口泥沙絮凝随潮流变化存在周期性或滞后性。在长江口南槽的现场观测中发现絮团平均粒径变化分别随水动力条件和盐度存在周期变化,为四分之一日周期和半日周期(图 3),并通过对

比图 3(a)和图 3(b)相位差认为絮凝对盐度变化的响应快于对水动力条件的响应^[16]。同时,分析徐六泾现场观测数据发现,表层絮团体积浓度滞后流速过程线,且涨潮期滞后时间大于落潮期^[24]。

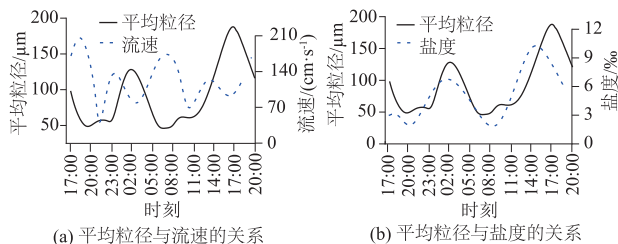


图 3 长江口南槽絮团平均粒径与流速、盐度的关系
Fig.3 Relationships between mean floc diameter and flow velocity, salinity in the South Passage of the Yangtze River estuary

长江口夏季的观测表明,长江口絮团平均粒径范围为 40.0~220.0 μm ,自徐六泾起,经南支、南港、南槽,至口外呈现增大趋势^[15]。南北槽最大浑浊带区域絮团粒径范围为 57.3~79.2 μm ,略大于盐水到达上界线区域徐六泾的絮团粒径(42.5~60.4 μm)^[6]。

此外,长江口泥沙絮凝在水体垂线方向呈现显著特征。徐六泾现场观测数据分析结果显示,絮团粒径从表层到底层逐渐增大,絮团有效密度从表层到底层逐渐减小,沉速从表层到底层逐渐加大^[14]。

2.2 长江中下游干流

从图4可以看出,长江中下游干流泥沙絮凝存在明显年内特征。长江中下游枯季絮团平均粒径范围为22.5~181.9 μm ,平均值约为101.4 μm ;洪季粒径范围为19.8~39.6 μm ,平均值约为25.4 μm 。枯季、洪季絮团平均密度分别为168 kg/m^3 和744 kg/m^3 ,枯季比洪季约减小77%。枯季、洪季絮团平均沉速分别为0.68 mm/s 和0.30 mm/s ^[3, 19-20]。

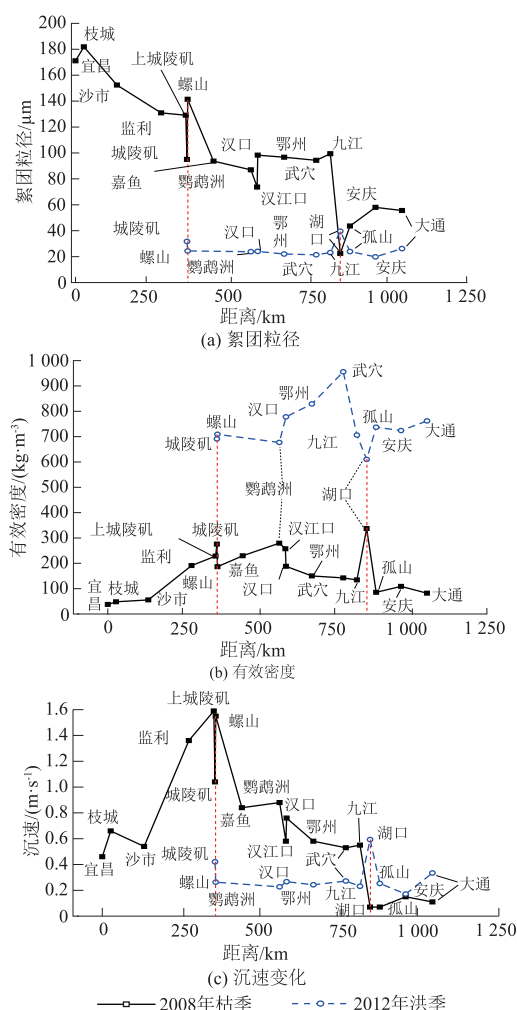


图4 长江中下游干流洪枯季絮团粒径、有效密度、沉速变化

Fig.4 Changes in floc particle size, effective density, and settling velocity during flood and dry seasons in the middle and lower reaches of the main stream

与此同时,长江中下游干流枯季絮团平均粒径呈向下游减小趋势从宜昌的171.1 μm 到孤山的43.6 μm ,在南京和徐六泾之间,絮团平均粒径又增

大到77.4~120.4 μm ,絮团平均粒径的变化与分散颗粒(未发生絮凝的原始泥沙颗粒)粒径的变化几乎一致^[19]。从图4可以看出絮团粒径、有效密度、沉速均在鄱阳湖处呈现极值特征。

在宜昌—沙市河段,絮团平均粒径河床附近较水面附近小。相反,在监利—九江河段,絮团平均粒径河床附近比水面附近大。而在孤山—徐六泾下游河段,絮团粒径垂线方向分布不具有明显规律性^[19, 25]。从图5可以看出,汉口站、湖口站絮团粒径沿水深呈明显增大的趋势^[3]。因此,不同区域絮团在水体垂线方向的分布存在差异性。

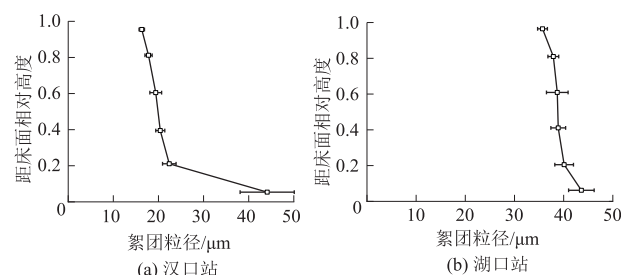


图5 长江中下游干流汉口站、湖口站絮团粒径垂线分布
Fig.5 Vertical distribution of floc particle size at Hankou and Hukou stations in the middle and lower reaches of the mainstream

2.3 三峡库区

絮凝沉降是三峡库区细颗粒泥沙淤积的重要原因^[22],自三峡水库开始蓄水运行以来,伴随入库沙量的显著减少,入库泥沙中的粗颗粒成分比例亦呈现下降趋势,且库区沿程泥沙粒径明显细化,三峡库区淤积物中粒径<0.016 mm的细颗粒泥沙占比达60%^[26]。

泥沙絮凝程度一般用现场絮团与分散颗粒二者粒径的比值来表征,即二者比值越大,泥沙絮凝程度越高。比值为1~3时认为是轻度絮凝,3~7为中度絮凝,>7为重度絮凝^[21-23]。基于现场观测与室内实验可知,三峡库区絮团平均粒径为22.0~58.0 μm ,平均值为46.0 μm ,是分散颗粒的3.8倍(各组次平均),沉速范围为0.13~0.61 mm/s ,平均值为0.44 mm/s ,是分散颗粒的8.7倍(各组次平均)^[21, 23]。

从三峡库区泥沙絮凝的分布来看,主要集中在中上层水体中,顺水流方向呈现衰减的趋势,且庙河河段的絮凝度明显小于奉节河段^[23]。李文杰等^[22]对比了忠县、奉节河段现场泥沙沉速反算所得絮团粒径和分散颗粒粒径,认为汛期库区泥沙絮凝的比例为60%~95%,其中以轻中度絮凝为主,重度絮凝较少。

2.4 三峡库区—长江口

根据表2及前述章节各区域观测资料及分析所得分布特征(时间为长江口2003年6月、2006年

2 月和 8 月、2014 年 12 月、2015 年 1 月,长江中下游干流 2008 年 1 月、2012 年 7 月和 8 月,三峡库区 2011—2013 年洪季),总结得到三峡库区—长江口沿程现场观测的絮团平均粒径、有效密度、沉速特征变化,如图 6 所示。综合现场观测数据,各区域现场絮团特性参数如表 4 所示。

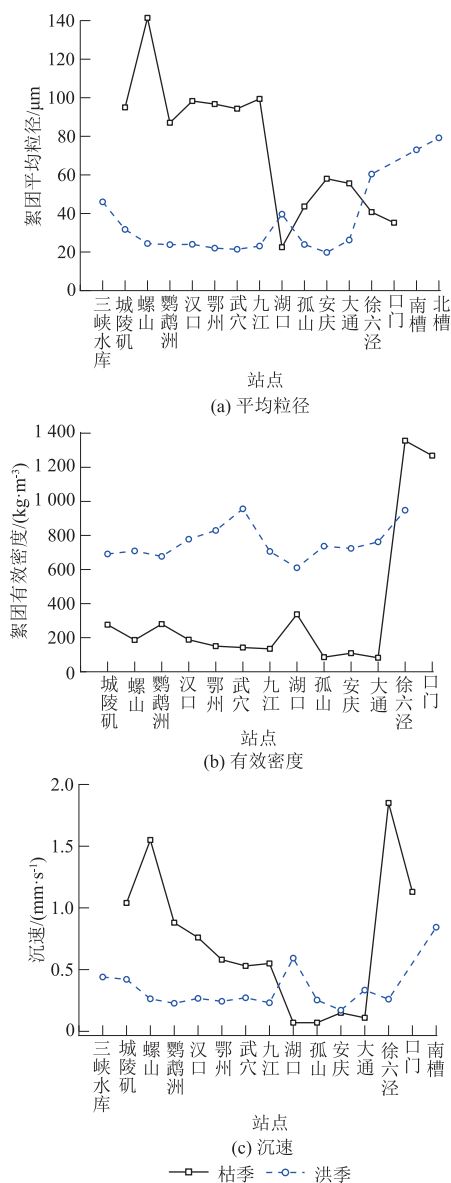


图 6 三峡库区—长江口沿程絮团粒径、有效密度、沉速变化

Fig.6 Changes in particle size, effective density, and settling velocity of flocs along the main stream from TGR to the estuary

由图 6 和表 4 可知:

(1) 在洪季,絮团平均粒径从三峡库区—长江口沿程先减小后增大,絮团粒径呈现出长江口区域最大,三峡库区次之,长江中下游干流最小的特征。在枯季,长江中下游干流各站点絮团粒径平均值为 $101.4 \mu\text{m}$,大于长江口区域的 $37.9 \mu\text{m}$ 。

表 4 三峡库区—长江口现场絮团特性参数
Table 4 On-site flocculation characteristics from TGR to the estuary

研究区域	絮团特性参数			参考文献
	粒径/ μm	有效密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	沉速/ $(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	
长江口	32.6~179.0	309~1 356	0.46~2.32	[6],[8],[12],[14],[16],[17],[24]
长江中下游干流	25.4~101.4	168~744	0.30~0.68	[3],[19],[20]
三峡水库	22.0~58.0	—	0.13~0.61	[21],[22]

(2) 在洪季,长江中下游各站点絮团有效密度为 $610\sim 956 \text{ kg/m}^3$,长江口徐六泾处为 948 kg/m^3 ,区域间差异较小。在枯季,长江中下游各站点絮团有效密度为 $82\sim 337 \text{ kg/m}^3$,从徐六泾起,絮团有效密度从 $1 356 \text{ kg/m}^3$ 减小至口门处的 $1 268 \text{ kg/m}^3$,呈现出长江口区域絮团有效密度明显大于中下游干流区域的特征。

(3) 在洪季,三峡库区絮团沉速为 0.44 mm/s ,长江中下游各站点絮团沉速为 $0.17\sim 0.59 \text{ mm/s}$,从徐六泾起,絮团沉速从 0.26 mm/s 增加至长江口南槽处的 0.84 mm/s 。在枯季,长江中下游各站点絮团沉速为 $0.07\sim 1.55 \text{ mm/s}$,絮团沉速整体沿程减小;从徐六泾起,絮团沉速从 1.85 mm/s 减小至口门处的 1.13 mm/s 。

3 长江泥沙絮凝主要影响因子

3.1 水动力条件

一般认为絮凝由颗粒的聚合和分散 2 种过程组成,而流速等水动力条件通过产生水体紊动剪切来增加颗粒的碰撞频率和絮团的破碎频率,同时已有研究发现紊动剪切对絮凝的影响存在差异^[27-28]。

从徐六泾絮团粒径洪季比枯季小 9%、大潮比小潮小、急流比憩流小,长江中下游干流絮团粒径冬季大于夏季,因此,水动力条件是影响絮团特性差异的主要影响因子。相较于洪季、大潮、急流等较强水动力环境,较弱的水动力更容易引起泥沙絮凝,促进絮团生长发育。同样,陈锦山等^[20]研究发现,万州悬浮物浓度虽然远低于石鼓—南溪段,其絮团中值粒径为 $35.8 \mu\text{m}$,是后者河段絮团粒径的 2.4 ~ 3.7 倍。这可能是因为库区水流动力较弱,相较于上游河段絮团得以发育至更大。

3.2 泥沙矿物及颗粒组成

通常来说,黏土矿物是絮凝泥沙的主要组分,其表面电学性质、颗粒微观形状的差异会对泥沙絮凝效果产生不同影响。长江口悬沙中的黏土矿物含量在 26% 左右,其中 65%~70% 为伊利石,其余依次

为绿泥石、蒙脱石和高岭石,其中蒙脱石离子交换能力较强,伊利石次之,绿泥石较弱^[25]。

泥沙颗粒大小和组成直接影响着絮凝的发生以及絮凝程度。颗粒间相互作用力随着粒径增加而减小,当分散颗粒粒径增加到一定程度,不再发生絮凝,即达到絮凝临界粒径。在长江口南北槽最大浑浊带,水体中的单颗粒泥沙呈洪季细,枯季略粗,该区域洪季实测的絮团粒径大于枯季^[6]。

在长江中下游干流,絮团相较于悬沙,粒径 $<3.9\ \mu\text{m}$ 的颗粒占比大幅减小,粒径 $>62.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒则从无增加至增大约50%;粒径 $<3.9\ \mu\text{m}$ 与粒径 $>62.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒变化比例大致相当,而中间粒径范围的百分比沿流程变化普遍保持稳定^[3]。由此可见黏土因其比表面积大,颗粒间相互作用强,易于发生絮凝,从而成为构成絮团的最基础部分。而部分站点黏土、粉砂占比均减小则表明更大絮团可能由黏土和粉砂进一步结合而成。

3.3 含沙量

与紊动剪切作用对絮凝的影响相似,含沙量的增加一方面能够增大颗粒碰撞频率,另一方面在高浓度情况下也会显著提高絮团碰撞引起的破碎频率,从而促进絮团破碎。同样,各学者研究所得絮团粒径随含沙量变化规律也各不相同^[22, 29]。

徐六泾河段常年含沙量 $<0.5\ \text{kg}/\text{m}^3$,拦门沙河段常年含沙量在 $1.0\ \text{kg}/\text{m}^3$ 左右,且拦门沙河段絮凝泥沙颗粒粒径明显大于徐六泾河段,因此,含沙量在泥沙絮凝过程中起着一定作用^[6]。

高含沙量一般伴随着较高的絮团体积浓度,从长江干流洪枯季野外观测数据中可以发现,絮团体积浓度、有效密度均与含沙量成正相关关系(图7)。

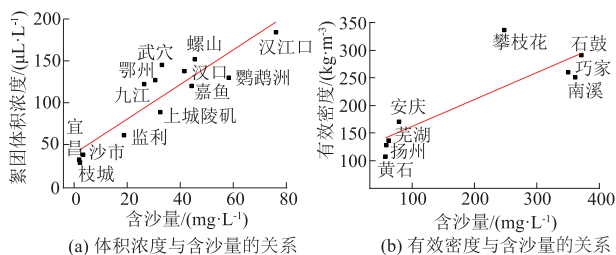


图7 絮团体积浓度、有效密度与含沙量相关性分析

Fig.7 Correlation analysis between floc volume concentration, effective density, and sediment concentration

三峡库区现场观测表明,泥沙絮凝程度随着含沙量($0\sim 0.035\ \text{kg}/\text{m}^3$)增加呈增长的趋势^[23],当含沙量增加至 $0.8\ \text{kg}/\text{m}^3$ 后,絮凝程度呈微弱减小趋势^[22]。

3.4 盐度

水体盐度是影响泥沙絮凝的主要因素之一,且

存在最佳盐度范围。一般认为盐度通过减小颗粒Zeta 电位,减弱颗粒表面双电层间的排斥作用,从而降低其稳定性,促进颗粒絮凝^[30]。

盐度对泥沙絮凝的影响在长江口较为显著。从横沙以西—咸淡水锋面区,随着盐度增加,细颗粒泥沙的絮凝加快,粒径增大^[13]。在长江口南槽发现,絮团粒径随盐度变化存在半日周期,且粒径大小的峰值对应着盐度变化的峰值,可以看出在该区域盐度对絮凝起着促进作用^[16]。同时盐度对双电层结构的作用与电解质阳离子化合价大小有关,学者通过室内实验研究不同阳离子对泥沙絮凝的影响,结果表明阳离子化合价越高,对泥沙絮凝作用越明显,絮团沉速越大^[31]。

3.5 有机物

有机物对泥沙絮凝的作用机理主要涉及桥联作用、网捕作用等。前者指的是有机物与水体中泥沙颗粒等物质形成粒间桥键,后者则是指一些细小的颗粒可被絮团内部存在的空隙所捕获而一同下沉^[32]。

基于长江口现场水体、泥沙的室内实验表明随着腐殖酸的增加,絮团粒径增大,同时盐度和腐殖酸的共同作用对细颗粒泥沙絮团粒径影响较大^[33]。Deng等^[34]在研究长江口泥沙絮凝中发现藻类(活微生物)组絮团最大,EPS(Extracellular Polymeric Substances,胞外聚合物)组次之,盐度组絮团最小。长江中下游干流絮团现场级配曲线普遍存在多个峰值,而较大的峰值可能与生物化学物质参与絮凝有关^[20]。室内实验发现微塑料和泥沙聚集后形成的絮团聚合力更大,形成的絮团更加稳定,认为与电子转移和化学态的转变,以及不饱和化学键的产生有关^[35]。

3.6 不同区域絮凝主要影响因素

天然水体中泥沙絮凝往往是多因素共同作用的结果^[25],在长江流域絮凝现场观测中,流速、盐度等单个影响因素会因观测区域和时间阶段的差异,体现出对絮凝促进或抑制等不同作用。

长江口泥沙絮凝主要影响因素为流速、盐度、含沙量。从洪枯季、大小潮等水动力条件差异较大的絮团特性可以看出,流速是影响长江口絮凝的主要因素之一。长江口絮团粒径随盐度变化存在周期性,且随着徐六泾一口门处盐度的增加,絮团粒径也随之显著增加。与盐度在长江口区域沿程变化相似,沿程含沙量的增加也显著促进长江口区域泥沙絮凝。同时在口门最大浑浊带水域,小潮时流速影响最明显、大潮时则是盐度影响最明显。在长江口

上段,流速对絮团起破坏作用,口门段的临界流速有所增加,在口门外,流速对絮凝起促进作用^[18]。

长江中下游干流絮凝主要影响因素为流速和含沙量。由于洪枯季河道水动力的显著差异,长江中下游干流枯季絮团粒径远大于洪季絮团(约 3.9 倍)。含沙量与絮团体积浓度、有效密度在干流各站点的相关关系也体现了含沙量对长江中下游干流泥沙絮凝的影响作用。

三峡库区泥沙絮凝主要影响因素为流速和泥沙颗粒组成。三峡库区(万州)因其较弱的水动力条件,泥沙絮团粒径大于其上游的石鼓—南溪等站。同时,受三峡大坝蓄水运用影响,库区内大量细颗粒泥沙淤积,因此较易发生絮凝。

长江流域各区域絮凝影响因素、阈值总结如表 5 所示。

表 5 长江各区域絮凝影响因素统计
Table 5 Statistics of influencing factors of flocculation in various regions of the Yangtze River

研究区域	絮凝影响因素	影响方式	阈值	参考文献
长江口	分散颗粒粒径/mm	颗粒间作用力	0.030 0~0.032 5	[7]、 [12]、 [16]
长江口	剪切率/s ⁻¹	增加碰撞、破碎频率	30	[27]
长江口	流速/(m·s ⁻¹)	增加碰撞、破碎频率	0.5	[24]
长江口	盐度	降低颗粒间斥力	(1.2~10.0)% _o	[30]、 [36]
长江口	电解质浓度/(mol·l ⁻¹)	降低颗粒间斥力	0.02~0.10	[30]
长江口	腐殖酸含量/(mg·(dm) ⁻³)	官能团成键作用	2	[33]
长江口	絮团体积浓度/(μL·L ⁻¹)	增加碰撞、破碎频率	75	[24]
长江口	含沙量/(kg·m ⁻³)	增加碰撞、破碎频率	3~8	[36]
长江中下游干流	流速/(m·s ⁻¹)	增加碰撞、破碎频率	1	[3]
三峡库区	含沙量/(kg·m ⁻³)	增加碰撞、破碎频率	0.8	[22]
三峡库区	分散颗粒粒径/mm	颗粒间作用力	0.012~0.022	[21]~ [23]、 [26]
三峡库区	剪切率/s ⁻¹	增加碰撞、破碎频率	30	[35]
三峡库区	流速/(m·s ⁻¹)	增加碰撞、破碎频率	0.5~0.7	[21]~ [23]
三峡库区	电解质浓度/(mol·m ⁻³)	降低颗粒间斥力	0.10~0.25	[37]

4 结 论

本文基于三峡库区—长江口已有现场絮团观测研究,对比分析絮凝时空变化特征,解析絮凝主要影响因子,主要结论如下:

(1)从时间特征来看,长江口泥沙絮凝随潮流

变化存在周期性或滞后性,并在洪枯季、大小潮流、憩流急流等阶段呈现差异性。长江中下游干流泥沙絮凝存在明显年内特征,表现为枯季絮团粒径比洪季显著偏大。

(2)从空间特征来看,长江口泥沙絮团粒径从口内向口外呈增大趋势,在水体垂向表现为底层粒径大于中层,表层最小。长江中下游干流在枯季絮团平均粒径呈向下游减小趋势,粒径、有效密度、沉速等絮团特性在鄱阳湖处呈现一定极值特征。三峡库区泥沙絮凝主要集中在中上层水体中,顺水流方向呈现衰减的趋势。

(3)长江流域各区域因为水沙条件等参数不同,区域内泥沙絮凝主要影响因素各有异同。作为促进分散颗粒碰撞的动力,流速在各区域泥沙絮凝中都起着重要作用。与长江干流的淡水环境相比,长江口区域的盐水环境在一定程度上有利于降低颗粒间斥力以促进絮凝。同样,在长江口、长江中下游干流,相对较高的含沙量可以有效提高颗粒间碰撞频率,进而促进絮凝发生。最后,三峡库区的细颗粒泥沙聚集也为该区域泥沙絮凝的普遍存在提供了基础条件。

参考文献(References):

[1] 柴朝晖. 粘性细颗粒泥沙絮凝机理及输移模型研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014. (Chai Zhao-Hui. Research on Flocculation Mechanisms and Transport Model of Cohesive Fine Sediment[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese))

[2] 李道季,李 军,陈吉余,等. 长江河口悬浮颗粒物研究[J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(3): 295-301. (Li Dao-ji, Li Jun, Chen Ji-yu, et al. A Study on Suspended Matter in the Changjiang River Estuary[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2000, 31(3): 295-301. (in Chinese))

[3] 郭 超,何 青. 长江中下游洪枯季泥沙絮凝研究[J]. 泥沙研究, 2014, 39(5): 59-64. (Guo Chao, He Qing. Comparison Study on Flocculation between Flood and Dry Season in Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 2014, 39(5): 59-64. (in Chinese))

[4] 水利部长江水利委员会. 长江泥沙公报 2023[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2024. (Changjiang Water Resources Commission. Changjiang Sediment Bulletin 2023[R]. Wuhan: Changjiang Water Resources Commission, 2024. (in Chinese))

[5] 左书华, 杨春松, 付 桂, 等. 长江口入海水沙通量变化及其影响分析[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(11): 56-64. (Zuo Shu-hua, Yang Chun-song, Fu Gui, et al. Variation of Water and Sediment Flux and Its Influence on the Yangtze River Estuary[J]. Marine Geol-

- ogy Frontiers, 2022, 38(11): 56–64. (in Chinese))
- [6] 李九发,戴志军,刘启贞,等.长江河口絮凝泥沙颗粒粒径与浮泥形成现场观测[J].泥沙研究,2008,33(3):26–32.(Li Jiu-fa, Dai Zhi-jun, Liu Qi-zhen, *et al.* In-situ Observation of Floccule Size and Fluid Mud in the Changjiang Estuary [J]. Journal of Sediment Research, 2008, 33(3): 26–32. (in Chinese))
- [7] 张志忠.长江口细颗粒泥沙基本特性研究[J].泥沙研究,1996,21(1):67–73.(Zhang Zhi-zhong. Studies on Basic Characteristics of Fine Sediment in Changjiang Estuary [J]. Journal of Sediment Research, 1996, 21(1): 67–73. (in Chinese))
- [8] 郭超,何青,郭磊城.长江河口控制站泥沙絮凝特性研究[J].泥沙研究,2016,41(5):60–65.(Guo Chao, He Qing, Guo Lei-cheng. Study on Flocculation Characteristics in the Yangtze Estuary [J]. Journal of Sediment Research, 2016, 41(5): 60–65. (in Chinese))
- [9] 丁梯平,高建飞,石国钰,等.长江水中悬浮物含量与矿物和化学组成及其地质环境意义[J].地质学报,2013,87(5):634–660.(Ding Ti-ping, Gao Jian-fei, Shi Guo-yu, *et al.* The Contents and Mineral and Chemical Compositions of Suspended Particulate Materials in the Yangtze River, and Their Geological and Environmental Implications [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(5): 634–660. (in Chinese))
- [10] 简慧敏,姚庆祯,张经,等.长江流域常量元素的分布特征[J].长江流域资源与环境,2010,19(1):93–97.(Jian Hui-min, Yao Qing-zhen, Zhang Jing, *et al.* Distribution Characteristics of Major Element in the Changjiang River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(1): 93–97. (in Chinese))
- [11] 王琪,于爽,蒋萍萍,等.长江流域主要干/支流水化学特征及外源酸的影响[J].环境科学,2021,42(10):4687–4697.(Wang Qi, Yu Shi, Jiang Ping-ping, *et al.* Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin [J]. Environmental Science, 2021, 42(10): 4687–4697. (in Chinese))
- [12] 关许为,陈英祖,林以安,等.长江口泥沙絮凝体的现场显微观测[J].泥沙研究,1992,17(3):54–59.(Guan Xu-wei, Chen Ying-zu, Lin Yi-an, *et al.* On-site Microscopic Observation of Sediment Flocs in the Yangtze River Estuary [J]. Journal of Sediment Research, 1992, 17(3): 54–59. (in Chinese))
- [13] 林以安,李炎.长江口絮凝聚沉特征与颗粒表面理化因素作用: I 悬浮颗粒絮凝沉降特征[J].泥沙研究,1997,22(1):42–48.(Lin Yi-an, Li Yan. Flocculence-settling Characteristics and Action of Surface Physico-chemical Factors of Particles in the Changjiang Estuary-I Flocculence and Settling Characteristics of Suspended Particles [J]. Journal of Sediment Research, 1997, 22(1): 42–48. (in Chinese))
- [14] 程江,何青,王元叶.利用 LISST 观测絮凝体粒径、有效密度和沉速的垂线分布[J].泥沙研究,2005,30(1):33–39.(Cheng Jiang, He Qing, Wang Yuan-ye. Using LISST-100 for In-situ Estimates of Floc Size, Density and Settling Velocity, Changjiang Estuary, China [J]. Journal of Sediment Research, 2005, 30(1): 33–39. (in Chinese))
- [15] 唐建华.长江口及其邻近海域粘性细颗粒泥沙絮凝特性研究[D].上海:华东师范大学,2007.(Tang Jian-hua. Characteristics of Fine Cohesive Sediment's Flocculation in the Changjiang Estuary and Its Adjacent Sea Area [D]. Shanghai: East China Normal University, 2007. (in Chinese))
- [16] 唐建华,何青,王元叶,等.长江口浑浊带絮凝体特性[J].泥沙研究,2008,33(2):27–33.(Tang Jian-hua, He Qing, Wang Yuan-ye, *et al.* Study on In-situ Flocs Size in Turbidity Maximum of the Changjiang Estuary [J]. Journal of Sediment Research, 2008, 33(2): 27–33. (in Chinese))
- [17] 杨天,杨世伦,杨海飞,等.悬浮絮凝体特征及其影响因子的综合作用:以长江口内河槽和口门最大浑浊带为例[J].华东师范大学学报(自然科学版),2017(4):149–159.(Yang Tian, Yang Shi-lun, Yang Hai-fei, *et al.* Characteristics of Suspended Flocs and the Combined Action of Contributing Factors in Yangtze Estuary: A Case Study on the Significant Differences between the Inner Estuary and the Mouth Area [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2017(4): 149–159. (in Chinese))
- [18] 王诗妮,蒋雪中,何青.长江口不同河段表层细颗粒泥沙絮凝特性[J].泥沙研究,2017,42(2):47–53.(Wang Shi-ni, Jiang Xue-zhong, He Qing. Flocculation Characteristics of Fine Sediment in the Surface Water of the Yangtze Estuary [J]. Journal of Sediment Research, 2017, 42(2): 47–53. (in Chinese))
- [19] Guo L, He Q. Freshwater Flocculation of Suspended Sediments in the Yangtze River, China [J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(2): 371–386.
- [20] 陈锦山,何青,郭磊城.长江悬浮物絮凝特征[J].泥沙研究,2011,36(5):11–18.(Chen Jin-shan, He Qing, Guo Lei-cheng. Flocculation Characteristics of Suspended Particulate Matter in Yangtze River [J]. Journal of Sediment Research, 2011, 36(5): 11–18. (in Chinese))
- [21] 李云中,江玉姣.三峡水库坝前泥沙絮凝沉降实证分析[J].水利水电快报,2019,40(2):62–65,72.(Li Yun-zhong, Jiang Yu-jiao. Empirical Analysis of Sediment Flocculation settlement in front of Three Gorges Reservoir [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2019, 40(2): 62–65, 72. (in Chinese))

- [22] 李文杰, 张凌越, 杨胜发, 等. 三峡库区泥沙絮凝临界条件现场测量[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 76–83. (Li Wen-jie, Zhang Ling-yue, Yang Sheng-fa, *et al.* Field Measurements of the Critical Conditions of Sediment Flocculation in the Three Gorges Reservoir[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 76–83. (in Chinese))
- [23] 何芳娇, 吉祖稳, 王党伟, 等. 三峡水库泥沙絮凝特征及影响因素分析[J]. 人民长江, 2016, 47(14): 31–35, 45. (He Fang-jiao, Ji Zu-wen, Wang Dang-wei, *et al.* Flocculation Characteristics of Sediment in Three Gorges Reservoir and Influential Factors Analysis[J]. *Yangtze River*, 2016, 47(14): 31–35, 45. (in Chinese))
- [24] 程江, 何青, 夏小明. 长江口徐六泾悬浮细颗粒泥沙絮凝体特性[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(4): 304–313. (Cheng Jiang, He Qing, Xia Xiao-ming. Characteristics of Suspended Fine Sediment Floccs in Changjiang (Yangtze) Estuary[J]. *Oceanologiae Limnologia Sinica*, 2007, 38(4): 304–313. (in Chinese))
- [25] 郭超. 黏性泥沙絮凝沉降过程与控制机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2018. (Guo Chao. Cohesive Sediment Flocculation and Settling Processes and the Controlling Mechanisms[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018. (in Chinese))
- [26] 李文杰, 马浩平, 杨胜发, 等. 三峡库区细颗粒泥沙淤积及一维数值模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(2): 251–260. (Li Wen-jie, Ma Hao-ping, Yang Sheng-fa, *et al.* Sedimentation and One Dimensional Simulation of Fine Sediment in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(2): 251–260. (in Chinese))
- [27] 郭超, 何青, 郭磊城, 等. 紊动对黏性细颗粒泥沙絮凝沉降影响的试验研究[J]. 泥沙研究, 2019, 44(2): 18–25. (Guo Chao, He Qing, Guo Lei-cheng, *et al.* Study on the Effects of Turbulence on Cohesive Sediment Flocculation and Settling Properties[J]. *Journal of Sediment Research*, 2019, 44(2): 18–25. (in Chinese))
- [28] 柴朝晖, 方红卫, 王茜, 等. 水流和电解质对黏性泥沙絮凝沉降影响试验[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 285–292. (Chai Zhao-hui, Fang Hong-wei, Wang Qian, *et al.* Effect of Flow and Electrolyte on the Flocculation-settling of Cohesive Sediment[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(2): 285–292. (in Chinese))
- [29] 万远扬, 吴华林, 顾峰峰. 长江口细颗粒泥沙沉降速度室内试验研究[J]. 人民长江, 2014, 45(1): 98–101. (Wan Yuan-yang, Wu Hua-lin, Gu Feng-feng. Experimental Study on Settling Velocity of Fine Sediment in Changjiang River Estuary[J]. *Yangtze River*, 2014, 45(1): 98–101. (in Chinese))
- [30] 关许为, 陈英祖, 杜心慧. 长江口絮凝机理的试验研究[J]. 水利学报, 1996, 27(6): 70–74. (Guan Xu-wei, Chen Ying-zu, Du Xin-hui. Experimental Study on Mechanism of Flocculation in Yangtze Estuary[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996, 27(6): 70–74. (in Chinese))
- [31] 张宇卓, 张根广, 李青, 等. 基于电解质浓度参数的泥沙沉速公式研究[J]. 泥沙研究, 2020, 45(3): 1–7, 45. (Zhang Yu-zhuo, Zhang Gen-guang, Li Qing, *et al.* Study on the Formula of Flocculation Setting Velocity Based on Electrolyte Concentration Parameters[J]. *Journal of Sediment Research*, 2020, 45(3): 1–7, 45. (in Chinese))
- [32] 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 Bao-dong. Flocculation of Fine Sediments in Estuaries[J]. *Advances in Marine Science*, 1994, 12(1): 71–76. (in Chinese))
- [33] 刘启贞, 李九发, 徐灿华, 等. 盐度和腐殖酸共同作用下的长江口泥沙絮凝过程研究[J]. 海洋学报(中文版), 2008, 30(3): 140–147. (Liu Qi-zhen, Li Jiu-fa, Xu Can-hua, *et al.* Flocculation Process of Fine-grained Sediments by the Combining Effect of Salinity and Humus in the Changjiang Estuary in China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(3): 140–147. (in Chinese))
- [34] Deng Z, He Q, Manning A J, *et al.* A Laboratory Study on the Behavior of Estuarine Sediment Flocculation as Function of Salinity, EPS and Living Algae[J]. *Marine Geology*, 2023, 459: 107029.
- [35] 刘洁, 张智超, 李霞, 等. 三峡水库微塑料与悬沙的聚集特性及作用机制[J]. 湖泊科学, 2025, 37(1): 149–158. (Liu Jie, Zhang Zhi-chao, Li Xia, *et al.* Aggregation Characterization and Mechanism of Microplastics and Suspended Sand in the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2025, 37(1): 149–158. (in Chinese))
- [36] Wan Y, Wu H, Roelvink D, *et al.* Experimental Study on Fall Velocity of Fine Sediment in the Yangtze Estuary, China[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 103: 180–187.
- [37] 丁武泉, 李强, 李航. 表面电位对三峡库区细颗粒泥沙絮凝沉降的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 698–702. (Ding Wu-quan, Li Qiang, Li Hang. Effect of Surface Potential on Flocculation and Settlement of Fine Sediments in Three Gorges Reservoir Region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 698–702. (in Chinese))

(编辑: 刘运飞)