

高抒. 长江口与东海陆架泥质沉积动力过程与环境效应: 长期数据采集需求[J]. 海洋学研究, 2021, 39(4): 1-10. DOI: 10.3969/j.issn.1001-909X.2021.04.001.

GAO Shu. Dynamic processes of the East China Sea inner shelf mud deposits associated with the Changjiang (Yangtze River) and their environmental consequences: An appeal for long-term observation requirements[J]. Journal of Marine Sciences, 2021, 39(4): 1-10. DOI: 10.3969/j.issn.1001-909X.2021.04.001.

长江口与东海陆架泥质沉积动力过程 与环境效应: 长期数据采集需求

高 抒

(南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 200093)

摘 要: 长江入海物质在东海内陆架水域形成了大规模泥质沉积区。内陆架泥区具有细颗粒沉积物和有机质的源/汇双重特征。长江口及邻近海域的泥质沉积过程-产物关系、泥质沉积在生态系统动力学中的作用、泥质沉积碳库增量潜力, 是区域性沉积动力学的 3 个前沿问题, 主要研究内容包括长江河口泥区未来演化趋势、泥区沉积物重力流形成条件和过程、泥区沉积物有机质含量与初级生产及低氧水层的关系、泥区消浪作用及其机制、颗粒态有机质衰减曲线(或曲线族)、颗粒态有机质碳库增量潜力等。其研究需要海洋观测站网在底部边界层、水层、新型数据上的支撑, 以满足数据分辨率、连续性的要求。底部边界层连续观测将有助于重力流、泥区消浪作用、湍动影响下的沉积物起动曲线族等问题的解决。水层观测将有助于有机质衰减系数的研究, 进而获得有机质埋藏率、浅层天然气、有机碳库增量等问题的答案。一些新型数据含有物源、沉积体特征和演化的大量信息, 此类数据的获取将依赖于观测技术的突破。

关键词: 海洋观测站网; 细颗粒沉积物; 底部边界层; 源/汇关系; 碳收支; 生态系统; 长江口海域

中图分类号: P736.2; P71

文献标识码: A

文章编号: 1001-909X(2021)04-0001-10

DOI: 10.3969/j.issn.1001-909X.2021.04.001

0 引言

物理海洋学家 H. M. STOMMEL 以墨西哥湾流研究而闻名, 他非常注重观测为前导的理论分析, 主张科学家与技术人员的融合, 对 20 世纪 70 年代数据采集队伍和研究队伍的分离趋势感到不安^[1]。然而分离为何会出现? 原因之一是研究人员的自主观测往往受到技术能力的限制, 使得数据采集效率较低、质量欠佳。解决办法是组织专业化的观测队伍, 以观测站网的形式实施数据采集, 如美国大气海洋局(NOAA)着力推进了大洋和近岸两个观测系统的建

设。不过, 观测系统建成之后, 仍应回归 STOMMEL 倡导的科学家与技术人员的融合, 这要通过有效的双方联络机制来实现。

长江口与东海陆架泥质沉积动力过程的研究虽然已获得一些成果, 但进一步的发展决定于未来研究所需数据的采集能力。海洋沉积动力学的研究对象是沉积物在海洋环境(河口、海岸、陆架、陆坡和深海底)中的输运和堆积, 所形成沉积体系的特征和演化以及沉积记录所含的环境信息^[2], 这是大型河流及其大陆边缘沉积体系形成演化理论的重要一环。对于河流三角洲和陆架沉积而言, 需要建立流域物质入海

收稿日期: 2021-07-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41530962)

作者简介: 高抒(1956—), 男, 浙江省杭州市人, 教授, 主要从事海洋沉积动力学及其应用方面的研究, E-mail: shugao@nju.edu.cn.

通量、径流、波浪、潮流、陆架环流、沉积物重力流、陆架地形、海面变化等因素共同影响下的连续谱系。此外,河口与陆架沉积还深受目前气候变化和人类活动影响,未来海岸带社会经济的发展离不开对这些影响的预估和管理对策制定。

在长江河口及邻近水域,传统数据采集大多是由各个研究组自行组织。基于这些数据进行分析、集成和模拟,探讨了长江来源物质的时空分布、潮汐-波浪-陆架环流所致物质输运、长江三角洲(河口与水下三角洲、浙闽泥质沉积带)规模、表层底质对流域变化的时间响应、沉积记录的连续性等问题。但由于高分辨率的长期、连续观测数据很少,一些前沿研究受到了制约;另一方面,长期观测超出了研究人员的自身能力,必须依赖于专业化的数据采集系统。为此需要实现长期观测系统的功能、本区域当前重要的研究方向和科学问题、获得长期观测数据的途径之间的融合。

本文的目的是:(1)阐述海洋观测站网的现状和未来趋势,除文献研究外,还涉及 2008 年国家基金委组织在美国进行的科学考察船管理模式、海洋调查与基础研究的结合等调研结果,以及作者本人于 2011 年在加拿大维多利亚大学进行的 VENUS 和 NEPTUNE 观测系统运行情况的调研;(2)总结长江口及邻近海域的沉积动力学研究现状,回顾科研进展以及相关的数据采集方式,以若干前沿方向和科学问题为例,说明提升未来观测能力的重要性;(3)根据沉积动力学及相关研究的发展,针对本区域海洋观测系统提出常规和特殊数据采集需求。

1 海洋观测站网的结构与功能

1.1 观测系统构架

20 世纪后期,美国航空航天局(NASA)提出^[3],到了 21 世纪,气候变暖、海面上升、森林损毁、荒漠化、大气臭氧层破坏、酸雨、生物多样性下降等带来的快速环境变化,是潜在的灾害。全球变化一直在发生,而人类活动正在以多种方式改变地球,自然变化的速率和方向受到人为干扰,许多对人类本身不利的变化也在不知不觉中发生,但科学研究却很不足。需要与国际、国内科学界合作,建立一个适合于此项研究的科学基础,通过美国全球变化研究计划(USGCRP)、国际地圈生物圈计划(IGBP)、世界气候研究计划(WCRP)等来探究这些问题。为此,NASA 成立“地球科学规划”机构

(Earth Science Enterprise,ESE),进行数据采集(观测系统)、产业发展(卫星)、研究计划制定和协调、科学研究、应用和外联(科普等)的一揽子管理。其中针对数据采集的专项是“地球观测系统”(Earth Observation System,EOS),在 20 世纪 80 年代初开始酝酿,1999 年正式实施,其目标是主要通过遥感方式,获取水文、生物地球化学、大气、生态和地球物理过程研究所需的数据,供跨学科研究团队使用;又开展国际合作,包括西欧、俄罗斯、加拿大、日本、拉丁美洲、印度、澳大利亚、新西兰、非洲等,形成了“国际地球观测系统”(International Earth Observation System,IEOS)。

对于海洋,遥感观测只是其中一个组成部分,水层和海底部分也需要覆盖,这就是全球海洋观测系统(Global Ocean Observation System,GOOS)。发展趋势是集遥感、锚定和移动浮标、无人船、波浪和水下滑翔器、水下机器人、水下自动船、深潜器、实时地转流观测阵列(即 Argo 浮标)、海底缆接观测站于一体的综合观测体系^[4]。美国海洋大气局(NOAA)的对应计划是综合海洋观测系统(Integrated Ocean Observation System,IOOS),其管理有两个方面:一是参与全球海洋观测系统建设,二是构建美国近岸海洋观测系统(由 11 个区域性观测系统组成,但数据归总到统一机构)。具体的观测系统设在研究机构之外。事实上,美国的海洋研究是由数据采集、理论分析和数值模拟三支队伍合作进行的,他们有自己的专业生涯^①。

全球海洋观测系统有多个国家的参与。我国也逐渐加入观测系统建设的行列,在长江口及邻近水域,目前正在构建东海立体综合科学观测系统^[5],自然资源部第二海洋研究所则设立了“长江口-浙江近海-邻近东海多学科长期观测计划”,为船载走航观测提供航次平台。

1.2 运行、维护和科研联络机制

关于观测系统的运行,加拿大维多利亚大学的 VENUS(Victoria Experimental Network Under the Sea)和 NEPTUNE(The North-East Pacific Time-Series Undersea Networked Experiments)是有代表性的,前者为海岸观测服务,后者是深海观测系统。海底观测网的技术问题很多,此前曾有夏威夷岛的 DUMAND 项目,计划在水深 4 800 m 处建设,始于 1976 年,1993 年因电缆漏水而放弃。加拿大的这两

①引自与 SCOTT G 个人通讯的内容。

个系统克服了观测系统的水下电缆连接、数据传输和水下仪器的远距离控制等主要技术问题,于2006年初步建成^[5-6]。海洋科技的发展趋势是从资助个人主持项目到资助综合研究计划,再到资助研究基础设施平台。因此加拿大的海底观测站网是按照基础设施平台来建设的,2007年起为用户提供数据,并制定了正常运行至少25年以获取原位数据的目标^[7]。

笔者曾访问加拿大维多利亚大学,目的之一是调研VENUS和NEPTUNE的运行情况。调研中第一个深刻印象是,观测系统由技术规划研究院(Technology Enterprise Faculty)负责运行,业务上归“加拿大海洋网”(Ocean Network Canada)^[8]领导,与该校的海洋学院不是同一单位,技术与研究队伍在这里是明显分离的。

按照事先拟定的调研提纲,维多利亚大学技术规划研究院安排了7位人员参与调讨论,从中了解的大致情况如下。

(1)这个机构是在21世纪初专为VENUS和NEPTUNE建设而设立的,包括设在本校的“加拿大海洋网”,约有80位员工。

(2)观测系统人员分为数据管理(软件)组、系统硬件维护组、工程技术组、科研组,分别负责数据管理软件制作、硬件组装和基础设施及其维护、仪器设备安装和维护、观测站与科研人员的联络。维护工作主要是针对仪器清理和更换,以及偶然发生的渔民拖网作业损毁事件。科研组的功能是搭建工程技术与科学家之间的桥梁,例如,向科学家介绍数据的用途、评价数据质量、征集观测需求等。

(3)观测系统的基本理念是克服科研所需长期观测的困难,以组织方式向科研人员提供高质量的数据,这里的人员本身并不做研究,但科研组的人员可有25%的研究时间,形成示范性的科研成果,科学家做研究时可以寻求平台的帮助,如仪器布设等,只需支付少量网络数据处理费。

(4)管理数据软件向全球研究者开放,他们可在登记之后成为网络用户。数据免费提供,网上可下载由原始数据分析的数据,并使用软件本身的功能制作供用户所需的图表等产品,并保存为各种格式的文件,如PDF文档。两个系统正式运行后2年,登记使用数据的全球科学家达千人。

(5)除固定点的观测外,还有其他来源的数据,如遥感、水下滑翔机、水下无人船等的观测数据,凡在本区范围内的,尽量定期纳入供研究者调用。与站上数

据不同的是,观测系统的数据是实时提供的。此外,还有水域范围内定期往返的轮渡等船只被要求沿航线测定相关数据,定期并入软件数据库。

(6)经费80%来自政府,20%为自筹。员工考核与论文和专利没有关联,有效提供数据是主要指标。使用数据的科学家越多,说明业绩越好,本单位的经费就能增加。

(7)每年举行一次大型科学研讨会,邀请世界各地科学家参加。在系统设计初期和建成后,实时邀请科学家提出观测和数据采集需求。

观测系统的建成使得数据采集能力快速提高,加强与科研人员的联络就变得十分重要。VENUS和NEPTUNE通过与科学家的联络机制,关注前沿科学问题^[9],如海底地质地球物理(如与板块运动相联系的地震、海啸、火山爆发)、海岸沉积地貌过程、风暴等极端事件沉积、生态系统过程(鱼类活动、浮游生物暴发、海洋动物迁移等)、环境动态检测等,支持科学家提出的特殊数据采集需求(如鲸类发声记录、死亡大动物引发的觅食事件图像记录等)。

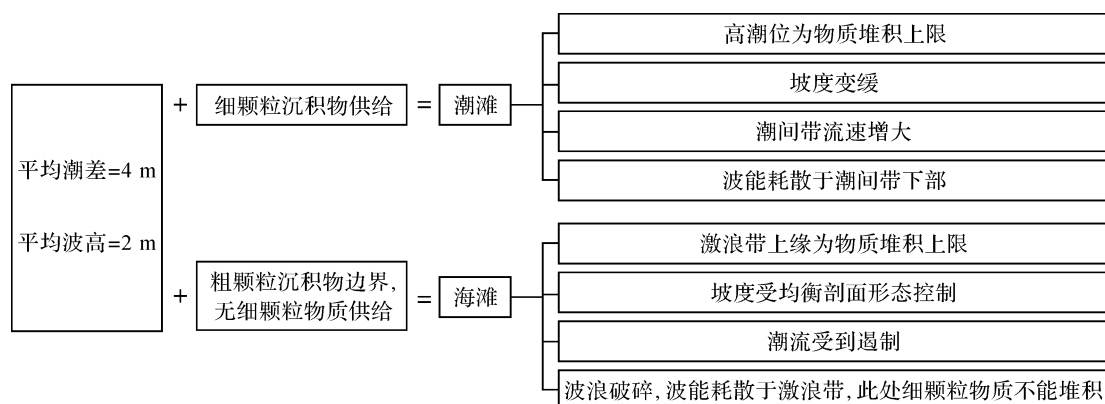
在2008年国家基金委调研美国海洋研究期间,笔者也从蒙特利湾研究所了解到科学家联络的另一种新模式。该研究所是专门从事仪器研制和技术发展的机构,为了加强与研究的融合,设置“科研联络组”,大约有7位人员,他们的主要任务是利用新仪器采集的数据,发表研究论文,给出“数据使用示范”。

2 东海内陆架泥质沉积的若干前沿方向和科学问题

2.1 内陆架泥质沉积的过程-产物关系

由过程而了解产物是沉积动力学的基本方法^[10]。例如,潮滩和砂砾质海滩是两种非常不同的地貌-沉积体系,前者为潮汐占优的环境,后者为波浪占优的环境。一个海域,同时受到潮汐、波浪影响,为何会有如此差异?主要是因物源不同所致(图1a),如果细颗粒沉积物供给充足,堆积过程将使得坡度变缓,潮流加强,波浪作用减弱,进一步促进细颗粒沉积物堆积,最终形成潮滩(图1b);反之,如果细颗粒沉积物供给不足,在岸线附近的堆积被波浪作用所阻,狭窄的潮间带不能形成较强的潮流,水动力始终被波浪控制,只有砂砾质沉积物能够停留,最终形成砂砾质海滩(图1c)。可见,过程和产物具有一一对应的关系。

东海是典型的宽广陆架,且长江输入的细颗粒沉积物在内陆架水域堆积,形成了大规模泥质沉积



(a)在相同假设潮汐、波浪条件下,细颗粒和粗颗粒沉积物分别形成潮滩和海滩的过程



(b)潮滩地貌景观(上海南汇嘴)



(c)海滩地貌景观(海南岛陵水海岸)

图 1 相近水动力条件下因物质供给因素的不同导致堆积产物的巨大差异

Fig. 1 Differences in material supply under similar hydrodynamic conditions lead to large differences in the deposits

区^[11-12]。长江入海物质的很小一部分被截留于潮间带和浅滩,另一部分进入水下三角洲,而大部分被陆架水流输送,形成从舟山群岛到闽江河口的大面积泥区。这个结论很大程度上是通过物质收支测量而得到的,即探测泥区的范围和厚度,进而对比各个区块的堆积总量,并以一段时间的平均入海通量为参照。所需的数据主要是沉积速率,浅层地球物理探测、地形和水深图对比、钻孔及沉积物柱状样分析是主要数据来源(表 1)。例如,假定入海通量为 4.8×10^8 t/a,而测定的河口附近、水下三角洲之内的年平均堆积量约为 2.0×10^8 t/a,那么净输出物质占比就是 60%左右。因此,收支计算代表的是长时间的累积效应,即便测量的各部分物质总量以及入海通量很准确,也不能代表沉积物收支的现状,更难以说明未来的演化趋势。

泥区各部位的沉积速率和地貌演化,也需要沉积物收支分析的信息,但同样受到前述计算方法的约束。长江三角洲的一些重要部位,如潮间带湿地、港

口水域、航道等,收支测算经常进行,这虽然能够获得冲淤值,但基于实测地层厚度、高程对比、沉积速率测定的计算结果只是针对过去已经发生的,很少涉及动力过程和机理的分析。

如果把泥质沉积看成是体系演化的产物,那么仅仅依靠沉积速率测定是不能解释这一产物的由来、现状和未来演化的,必须要依赖于动力过程的分析。这不仅需要采集物质数据,还要采集水动力数据。以往所用的手段主要包括考察船航行调查、遥感、全潮水文观测、岸基水文/潮位站等。如表 1 所示,除全潮水文观测、数值模拟外,其余方法所获数据都有时间分辨率偏低、或缺乏空间代表性、或在数据可靠性上有不足等问题。自从 20 世纪 80 年代初全国海岸带和海涂资源综合调查以来,全潮水文观测一直是沉积动力学的主要方法,迄今在长江口及邻近海域进行过此类观测的站次数以千计。

沉积动力学的关键在于,沉积速率不是测算的,而是由动力学计算而得的。沉积物连续方程、收支方

程定义了沉积速率的时空变化^[2]。以水深、流速、流向、温度、盐度、悬沙质量浓度等为基础数据,可分析沉积物沉降速率、起动条件、输运率等参数,然后应用控制方程进行运算,得到沉积速率。该方法不仅可以解释沉积体系的现状,而且可以预测未来。对于本区

域的沉积物静水和动水沉降速率、絮凝作用、起动条件、悬沙输运等基础性问题已做过大量的动力过程分析。在过程-产物关系预测上,河口三角洲生长极限^[13]、潮汐水道冲刷^[14]、潮滩沉积记录形成^[15]、河口拦门沙形成过程^[16-17]是动力学方法应用的实例。

表 1 海岸-陆架水域沉积动力学常用数据采集方式及其特点

Tab. 1 The techniques and characteristics of data collection in the field of sediment dynamics of coastal and continental shelf waters

数据采集方式	数据类型	分辨率、连续性等特性
浅层地球物理探测	层序划分、厚度及其物性、平面分布	垂向分辨率较低($10^{-1} \sim 10^0$ m)
地形和水深图对比	底床高程及其时间序列	时间分辨率较低(通常为 $10^1 \sim 10^2$ a)
钻孔、沉积物柱状样	沉积物粒度、测年、堆积速率、矿物组成、地球化学参数	连续性多变,时间分辨率受其影响(通常为 $10^1 \sim 10^3$ a)
考察船航行调查	各类观测数据的大面分布	时间分辨率较低(季节至年际尺度)
卫星遥感、无人机	水面温度、盐度、悬沙质量浓度、水色等	时间分辨率较低(通常 $> 10^4$ s)
地波雷达	表层流速、地形等	观测期内连续,时间分辨率在 10^1 s 之内,数据误差相对较大
全潮水文观测	水深、流速、流向、温度、盐度、悬沙质量浓度等	观测期内连续,时间分辨率为 $10^0 \sim 10^3$ s
岸基水文/潮位站	水位、温度、盐度、悬沙质量浓度等	连续,大多位于水域边缘
数值模拟	水位、流速、流向等	数据质量受输入参数控制

全潮水文观测一直是必备手段,但其局限性也日益显现。河口海岸水域观测工作的艰巨性以及近岸水域繁忙的交通条件使得观测的效率难以提高,更重要的是长时间尺度数据的重要性凸显。新的学术思想要靠新的观测事实来激发,过程-产物关系的新问题(如风暴沉积、浅水沉积物重力流、泥质床面消浪等过程)均涉及长期连续观测,因此观测技术水平亟需提升。

2.2 泥质沉积与生态系统的关系

长江口及内陆架泥区与生态系统之间存在着关联性,两者均受到悬沙入海通量的影响。长江为海洋浮游植物提供了丰富的营养物质,所形成的生物量大,支撑了吕四、长江口和舟山三个渔场,江苏南部海岸的大规模紫菜生产也与长江有关。长江冲淡水在输送营养物质的同时,也带来悬沙。悬沙质量浓度可影响光合作用,过高的悬沙质量浓度会降低水层光照强度。冲淡水与外海水团之间的锋面控制浮游植物生产,而该锋面也可能是悬沙锋面位置所在,它所在地点的水深和海底地形也会影响浮游植物。同时,悬沙质量浓度与沉积物沉降通量成正比,悬沙质量浓度越高的地方,泥区沉积速率越高。然而,如何定量表达上述关系,以建立泥区演化与生物生产的关系,目前由于观测尤其是长期观测非常不足,还难以根据过程分析来实现。

从沉积地质的角度看,藻类暴发和低氧,在长时间尺度上有着不同的影响^[18]。在藻类暴发水域,大量颗粒态有机质在泥区堆积,底层水和沉积物低氧对鱼类和底栖动物有负面影响。与此同时,水层低氧则

意味着垂向通透条件的缺失,保存于泥区的有机质可转化为浅层天然气。据估算,全新世时期长江泥质沉积层储藏的天然气达 10^8 t 量级^[19]。

低氧水层特征影响长江口泥区的有机质含量,从上层直达底床的低氧层,可阻止水层通透,降低沉积层内的氧化速率,同时对再悬浮的物质也能起到减缓衰减的作用。相反,如果低氧层仅限于上层,则沉积层内的有机质保存潜力将下降。为了量化有机质含量与低氧的关系,亟需长周期、高分辨率的底部水层营养盐、悬沙、温度、盐度、溶解氧、水流湍动等数据。

泥区沉积速率与悬沙质量浓度的关系还暗含着一个有趣的问题:水下三角洲生长所需的长江入海通量临界值^[20]。根据长江三角洲物质在一段时期的输出占比为 60% 的看法,进而假定相当于这个占比的物质总量必定逃逸水下三角洲范围,向外海扩散,此值就可作为临界值,因为实际的人海通量小于此值时,用于扩散的物质出现亏损,只能以水下三角洲本身为源给予补充。但入海通量临界值还缺乏准确的定量表达,原因之一是基于冲淤速率的测量结果^[21]时间分辨率低;另一个原因是对水下三角洲泥区缺乏充分的动力学分析。泥区连续观测数据将有助于这个问题的解决。

泥区对于长江口区域的防灾减灾也有重要意义。目前随着气候变暖、海面上升、风暴加剧的趋势显现,加强海堤是人们的第一个反应。然而要保持硬质海堤的防浪标准,将会付出过大的代价。为了提高海堤的抗浪能力,并使海堤本身得到保护,需在堤前构建

盐沼湿地和生物礁,其生态位的保障需要沉积动力的设计。另一个容易被忽视的是泥区的消浪作用。初步研究表明,泥质海底对浪能耗散的作用可能超越底部摩擦效应,大浪传入内陆架泥区时,其底部切应力引发强烈再悬浮过程,使得波高迅速降低^[22];当风暴浪进入浅水、泥底海湾时,波能耗散将更快^[23]。关于泥区消浪过程的研究,长江口水域底部边界层的连续观测可提供重要数据。

2.3 泥质沉积特征值及碳库机制

海洋细颗粒沉积物的组分往往在区域或全球尺度上表现出较为一致的现象,例如其颗粒态有机碳含量在陆架、海岸为 1% 量级,而在深海为 0.1% 量级,这种较窄的变量值范围称为“特征值”。在物质供给、水动力、地形和水深、地理位置等条件差异较大的情况下,特征值现象是如何形成的,需要进行动力机制的研究^[24]。

就长江泥质沉积的颗粒态有机碳含量特征值而言,所涉及的因素有初级生产、沉积速率、颗粒物沉降速率、再矿化等。对比深海环境,近岸水域的动力过程要复杂得多。从各个因素的数量级估算,可解释深海环境有机碳含量:若沉积速率为 $0.1 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 量级,相当于 $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的沉降通量,则 0.1% 颗粒态有机碳含量意味着碳通量为 $0.1 \times 10^{-3} \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 量级。大洋初级生产为 $10^{-2} \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 量级,因此与产出相比,约 99% 的有机质在堆积前就已降解。这与沉降所需的时间尺度有关,细颗粒物

质沉降速率一般为 $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,因此从海表面沉降至海底需要 1~10 a 时间。根据这些约束性数值,衰减方程($dM/dt = -kM$, M 为有机碳含量, k 为衰减系数)中的衰减系数约为 4.6 a^{-1} ,半衰期约为 48 d。内陆架区域初级生产达 $10^{-1} \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 量级,而颗粒物沉降到底部的时间将小于半衰期。若沉积速率为 $10^{-2} \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$,则沉降通量为 $10^1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;若有机碳含量为 1% 量级,则其埋藏通量为 $10^{-1} \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,与初级生产处于同一量级。图 2 显示了相同衰减系数条件下深海和近岸水域有机碳埋藏通量的差异,前者沉降历时长,有机质大幅度衰减;后者沉降历时短于一个半衰期,因此沉降通量与生物生产较为接近。此外,到了外陆架,随着水深的加大,沉积速率下降,沉降时间拉长,水层再矿化加强,有机碳埋藏通量跟着下降,这可能使得有机碳含量保持相对稳定。但上述变量或参数的准确刻画,需要观测数据的支持,否则有机质衰减系数的取值范围难以准确定义。

此外,陆架环境沉积物再悬浮过程加大了水层矿化作用^[25],在图 2 中相当于延长了衰减时间,有机质总量将沿着衰减曲线下降。还有一个问题是,泥质沉积中的有机质是否存在抗衰减能力的差异性? 如果没有差异,可使用同一条衰减曲线,否则应根据有机质的不同类型构建一族衰减曲线。目前可用于再悬浮过程及其对应的有机质矿化过程分析的数据还较少。

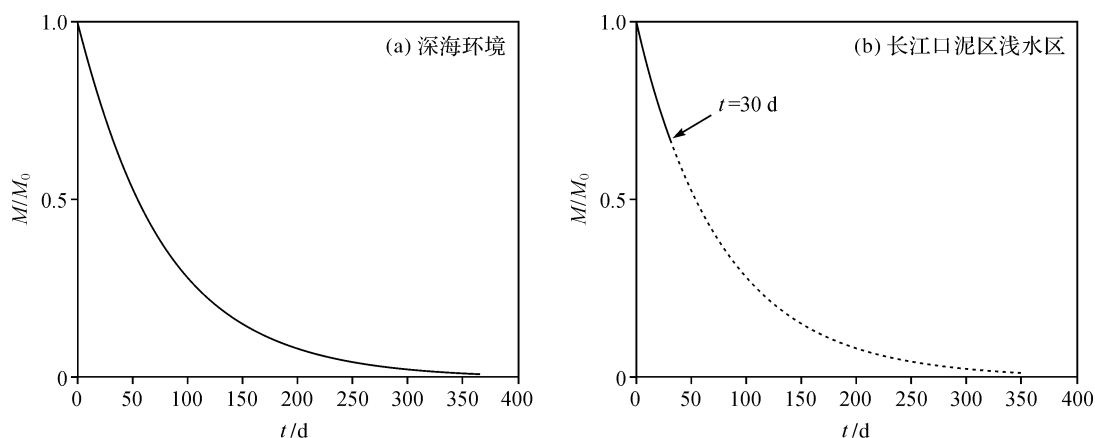


图 2 有机质暴露于水层的时间对埋藏的影响示意图

Fig. 2 Diagrams showing the effect of organic matter exposure time on the burial pattern

(M/M_0 为无量纲比值, M 为水体有机碳含量, M_0 为沉降前水体有机碳初始含量。 $k=4.6 \text{ a}^{-1}$; 半衰期=48 d。图 a 所示为深海环境的长时间暴露, 350 d 之后有机质仅保留 1%; 图 b 所示为长江口泥区浅水区短时间暴露, 30 d 后沉降至海底, 有机质仍保留 70%。)
(M/M_0 denotes a dimensionless quantity, where M is the content of organic carbon in the water column, and M_0 is the initial value of the organic carbon content before the settling process begins. $k=4.6 \text{ a}^{-1}$; Half-life = 48 d. fig. a: long-term exposure (i. e. 350 d) to the deep-sea environment, with 1% organic matter preservation; and fig. b: short-time (i. e. , 30 d) exposure to shallow water column, in the mud area of the Changjiang Estuary, with 70% organic matter preservation.)

颗粒态有机碳含量特征值与碳库动态相关联。海洋碳库主要有沉积、生物量和溶解有机质等三类,而以沉积碳库为最大,全球埋藏的无机碳总量达 0.5×10^9 BMT ($1 \text{ BMT} = 10^{15} \text{ g C}$),有机碳超过 0.1×10^9 BMT^[26]。对于“碳中和”而言,碳库的增量部分是有贡献的,而其存量部分是无贡献的。由于长江沉积物、溶解物入海通量大^[27-28],加上地下水物质输入^[29],又注入高生物生产的东海宽广陆架水域^[30],因此河口及邻近水域三大碳库均有较大规模。长江细颗粒沉积物的通量为 $10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 量级,中全新世以来的总量达 10^{12} t 量级,主要堆积于河口及内陆架^[12]。长江泥质沉积的有机质含量为 1% 量级^[19],因此沉积物总量中所含的有机碳库的规模为 $10^8 \sim 10^9 \text{ t C}$ 。按长江口高初级生产区 (10^5 km^2 量级的水域面积)和生物生产 ($600 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 量级)^[30-31] 计算,生物量碳库约为 $0.6 \times 10^8 \text{ t C}$ 的规模。按照本区域海水体积 (平均水深与面积之积, 10^4 km^3 量级) 在全球海洋的占比计算,溶解有机碳约有 4×10^{-3} BMT,即 $4 \times 10^6 \text{ t C}$ 。可见 3 个碳库中沉积碳库是最大的,而且其增量潜力也最明显,它与持续的沉积作用有关。生物量和溶解有机质碳库目前主要是存量性的,未来如何发挥增量潜力,需开展进一步研究。

东海陆架区泥区是陆源、海源有机碳埋藏和保存的重要场所^[32],但碳库的增量依赖于细颗粒沉积物的持续堆积和有机碳埋藏通量。在河流入海通量恒定的条件下,长江河口三角洲存在着生长极限^[13],达到此极限之后,陆上和水下三角洲均不再生长,主要泥质沉积区转移到远端泥区,即浙闽沿岸泥。这一过程可能伴随着颗粒态有机质来源和堆积地对应关系的变化,当有机质供给量大的地点正好对应于高沉积速率时,碳库增量潜力最大,而如果两者的匹配度下降,则碳库增量潜力也下降。

目前,随着流域人类活动的加剧,长江入海通量下降,正在导致从河口到陆架区的沉积物和有机质“源/汇”状况转换^[33-35],呈现河口三角洲沉积速率降低、河口泥区沉积物粗化、碳埋藏率下降趋势。除人类活动外,泥质沉积碳库增量潜力与气候变化本身也存在着互馈关系,表现在沉积物供给和生物生产均受到气候变化的影响。未来碳库增量潜力的预估需要深入分析上述过程。图 3 是本区域碳库增量潜力预估的技术路线图,对观测数据提出了更高的期待。

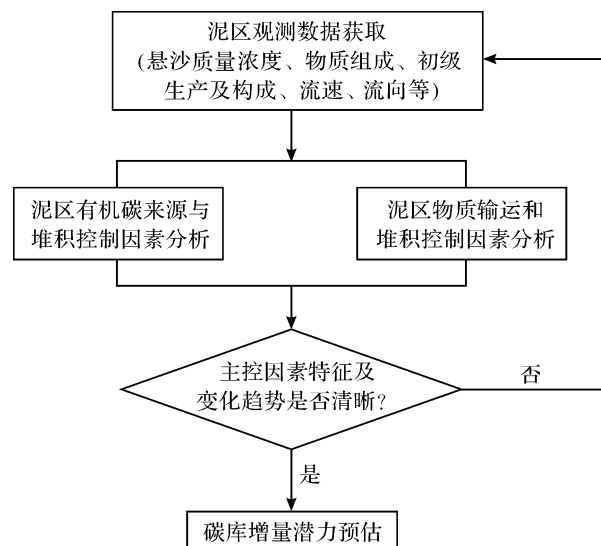


图 3 基于长期观测和过程-机制分析的长江口泥区碳库增量潜力预估技术路线图

Fig. 3 Technical flow chart for estimating the potential of carbon reservoir in the Changjiang Estuary mud area, using long-term observation and process-mechanism analysis

3 讨论:观测系统对沉积动力学及相关研究的支撑作用

从前述的长江口泥区沉积动力学的 3 个前沿问题,可总结一系列需要新型观测系统予以支撑的研究内容,包括:

- (1) 长江入海临界通量的量化和理论表述;
- (2) 长江河口泥区对流域入海通量变化的响应和未来趋势;
- (3) 泥区沉积物重力流形成条件和过程;
- (4) 泥区沉积物有机质含量与初级生产、低氧水层的关系;
- (5) 长江泥质沉积浅层天然气与有机质埋藏率的关系;
- (6) 泥区浪能耗散及其机制;
- (7) 多个沉降-再悬浮周期下的颗粒态有机质衰减曲线(或曲线族);
- (8) 颗粒态有机质碳库增量潜力。

具体而言,所需的长期观测数据包含底部边界层、水层、以及特殊(新型)数据(表 2)。其中有些数据是常规性的,有现成的传感器,还有一些数据属于尚未能够实时获取、或者从未测过的,需要研制新型传感器(如生物颗粒种属鉴定仪、现场基因测序仪等)。

表 2 前述 3 个科学问题对观测系统的数据采集需求

Tab. 2 Data collection associated with the observational systems, as required by the study on the scientific problems outlined in the text

观测内容	数据类型	传感器及其他设备
底部边界层	高频流速矢量、压力、底部切应力、流体密度、重力流流速、床面高程变化速率、底质采样等	高频流速仪、压力仪、水位仪、切应力感应仪、密度仪、密度流重力流流速仪、床面高程仪、采样器等
水层	流场、温度、盐度、悬沙质量浓度、颗粒态有机质含量、溶解物质含量(营养盐、溶解氧等)、水样采集等	ADCP、CTD、悬沙质量浓度仪(浊度计)、生物地球化学探测仪、水样采集设备、水下无人船和滑翔机等
特殊或新型数据	浮游生物图像、生物颗粒物种识别、微地貌图像、基因测序等	成像设备、新型传感器

底部边界层的连续观测不仅可以获取长时间序列的沉积物参数,以便与长江入海物质进行对比,而且可以捕捉到重力流、风暴等事件信息。陆架沉积物重力流的发现已有多年的^[36],但长江泥质沉积区的重力流强度、发生频率、对远端泥长期演化的影响等问题的解决,要靠充分的数据积累。风暴期间的记录,可提供长江口泥区消浪作用的关键证据。此外,床面切应力的长期观测也可用于细颗粒物起条件的分析,以便在现有基础^[37]上获得湍动影响下的沉积物起动曲线族。

水层观测对于涉及生态系统、低氧层和悬沙运动等研究内容提供了不可缺少的数据。有机质埋藏率、浅层天然气、有机碳库增量等问题的核心是有机质衰减系数,依据生物生产、低氧层分布、悬沙质量浓度、颗粒态有机质含量、营养盐含量、溶解氧含量等的时间序列,再加上物理海洋学参数(流场、温度、盐度等),就可根据有机质的收支方程,探讨颗粒态有机碳在多种条件下的衰减问题。而衰减系数的确定,是碳库潜力研究的关键。

一些特殊或新型数据,如生物颗粒识别、微地貌形态、基因测序数据等,含有关于物源、沉积体特征和演化的大量信息,但过去很难得到,可以观测站网为平台,促进相关仪器设备的研制,以便跟上新问题研究的数据需求。

4 结论

本文以长江口沉积动力学的 3 个前沿问题为例,论证长期连续观测对未来研究的重要性,提出如下几点看法:

(1)海洋观测站网是未来科研的重要支撑平台,其任务是高效实施长期观测、保证数据质量。该项任务是从传统科研活动中分离出来的,但在观测需求、数据产品提供、新型数据使用上要与研究相融合,需要建立研究和技术人员之间的联络机制;未来海洋观测站网应逐步完善运行机制,实现既分离又融合的工作方式。

(2)长江口及邻近海域的泥质沉积过程-产物关系、泥质沉积在生态系统动力学中的作用、泥质沉积碳库增量潜力,这 3 个前沿问题的研究均需要海洋观测站网的支撑,传统观测方式已难以满足数据分辨率、连续性的要求。

(3)本区域海洋观测系统在底部边界层、水层、新型数据上可支撑多项研究内容的长期观测数据需求。底部边界层连续观测将有助于重力流、泥区消浪作用、紊动影响下的沉积物起动曲线族等问题的解决。水层观测将有助于有机质衰减系数的研究,进而获得有机质埋藏率、浅层天然气、有机碳库增量等问题的答案。一些新型数据含有物源、沉积体特征和演化的大量信息,可以观测站网为平台,进行相关仪器设备的研制。

致谢 加拿大维多利亚大学技术规划研究院对作者的调研活动提供了支持。作者参加国家自然科学基金委员会 2008 年 12 月组织的访美活动,获得了蒙特利湾研究所等多个机构的海洋观测和运行机制信息。美国罗格斯大学 SCOTT GLENN 和 HUGH ROARTY 访问河口海岸学国家重点实验室期间(2016 年 4 月 12 日)作了大洋和美国近岸两个观测站网数据采集的学术报告,与作者讨论了研究和观测的分离、融合问题。刘祯娟帮助绘制图件。本文在第六届地球系统科学大会(上海,2020 年 7 月 7 日—10 日)第 46 专题(海底观测网的关键科学问题和国家需求)分会场宣读。本文审稿专家提出了修改意见。谨此致谢。

参考文献(References):

- [1] STOMMEL H M. The sea of the beholder[M]. Princeton: American Society of Meteorology Press, 2010: 165.
- [2] GAO Shu, COLLINS M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves[J]. Marine Geology, 2014, 352: 268-294.
- [3] KING M D, GREESTONE R. EOS reference handbook: A guide to NASA's Earth Science Enterprise and the Earth Observation System[J]. National Aeronautics and Space Administration, 1999, 134: 361.
- [4] LIN M W, YANG C J. Ocean observation technologies: A review

- [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33: 32. DOI:10.1186/s10033-020-00449-z.
- [5] KIRKHAM H. Lessons learned from the NEPTUNE power system, and other deep-sea adventures[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2006, A567: 524-526.
- [6] BARNES C R, BEST M M R, PAUTET L, et al. Understanding earth-ocean processes using real-time data from NEPTUNE, Canada's widely distributed sensor networks, Northeast Pacific [J]. Geoscience Canada, 2011, 38(1): 21-30.
- [7] TAYLOR S M. Transformative ocean science through the VENUS and NEPTUNE Canada ocean observing systems[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2009, A602: 63-67.
- [8] HEESEMANN M, INSUA T L, SCHERWATH M, et al. Ocean net-works Canada: From geohazards research laboratories to smart ocean systems[J]. Oceanography, 2014, 27(2): 151-153.
- [9] MATABOS M, PIECHAUD N, DE MONTIGNY F, et al. The VENUS cabled observatory as a method to observe fish behaviour and species assemblages in a hypoxic fjord, Saanich Inlet (British Columbia, Canada)[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2015, 72(1): 24-36.
- [10] 高抒. 中国东部陆架全新世沉积体系:过程—产物关系研究进展评述[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 845-855.
- GAO Shu. Holocene sedimentary systems over the Bohai, Yellow and East China Sea region: Recent progress in the study of process-product relationships[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 845-855.
- [11] GAO Shu. Holocene shelf-coastal sedimentary systems associated with the Changjiang River: An overview[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(12): 4-12.
- [12] JIA Jianjun, GAO Jianhua, CAI Tinglu, et al. Sediment accumulation and retention of the Changjiang (Yangtze River) subaqueous delta and its distal muds over the last century[J]. Marine Geology, 2018, 401: 2-16.
- [13] GAO Shu. Modeling the growth limit of the Changjiang Delta [J]. Geomorphology, 2007, 85(3-4): 225-236.
- [14] XIE Dongfeng, GAO Shu, WANG Yaping. Morphodynamic modelling of open-sea tidal channels eroded into a sandy seabed [J]. Geo-Marine Letters, 2008, 28(4): 255-263.
- [15] GAO Shu. Modeling the preservation potential of tidal flat sedimentary records, Jiangsu coast, eastern China[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(16): 1927-1936.
- [16] YU Qian, WANG Yunwei, GAO Shu, et al. Modeling the formation of a sand bar within a large funnel-shaped, tide-dominated estuary: Qiantangjiang Estuary, China[J]. Marine Geology, 2012, 299-302: 63-76.
- [17] XIE Dongfeng, PAN Cunhong, WU Xiuguang, et al. The variations of sediment transport patterns in the outer Changjiang Estuary and Hangzhou Bay over the last 30 years[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(4): 2999-3020.
- [18] NORTH F K. Petroleum geology[M]. Boston: Allen and Unwin, 1985: 607.
- [19] 林春明, 张霞. 江浙沿海平原晚第四纪地层沉积学与天然气地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 248.
- LIN Chunming, ZHANG Xia. Late Quaternary stratigraphy sedimentology and natural gas geology in the coastal plain of Jiangsu and Zhejiang Provinces[J]. Beijing: Science Press, 2018: 248.
- [20] YANG S L, BELKIN I M, BELKINA A I, et al. Delta response to decline in sediment supply from the Yangtze River: Evidence of the recent four decades and expectations for the next half-century[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 57(4): 689-699.
- [21] LUAN Hualong, DING Pingxing, YANG Shilun, et al. Accretion-erosion conversion in the subaqueous Yangtze Delta in response to fluvial sediment decline[J]. Geomorphology, 2021, 382: 107680.
- [22] SAMIKSHA S V, VETHAMONY P, ROGERS W E, et al. Wave energy dissipation due to mudbanks formed off southwest coast of India[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2017, 196: 387-398.
- [23] KIM T R, LEE J H. The difference in wave environments between intertidal sand beaches and mud flats [J]. Journal of Coastal Research, 2013, SI65: 517-522.
- [24] 王文昊, 高抒, 徐杨佩云, 等. 江苏中部海岸潮滩沉积速率特征值的数值实验分析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 656-665.
- WANG Wenhao, GAO Shu, XU Yangpeiyun, et al. Numerical experiments for the characteristic deposition rates over the tidal flat, central Jiangsu coast [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2014, 50(5): 656-665.
- [25] GAO Shu. Sediment and carbon accumulation on continental shelves[M]//LIU K K, ATKINSON L, QUINONES R, et al. Carbon and nutrient fluxes in continental margins: a global synthesis. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 587-596.
- [26] LIBES S M. An introduction to marine biogeochemistry[M]. New York: John Wiley, 1992: 734.
- [27] CHEN Xiqing. An integrated study of sediment discharge from the Changjiang River, China, and the delta development since the Mid-Holocene[J]. Journal of Coastal Research, 1996, 12(1): 26-37.
- [28] WANG Xiaona, WU Ying, BAO Hongyan, et al. Sources, transport and transformation of dissolved organic matter in a large river system: illustrated by the Changjiang River, China [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2019, 124(12): 3881-3901.
- [29] LIU Jian'an, DU Jinzhou, WU Ying, et al. Nutrient input through submarine groundwater discharge in two major Chinese estuaries: the Pearl River Estuary and the Changjiang River Estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2018, 203: 17-28.
- [30] 郑元甲, 陈雪忠, 程家骅, 等. 东海大陆架生物资源与环境[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003: 835.
- ZHENG Yuanjia, CHEN Xuezhong, CHENG Jiahua, et al. Biological resources and environment of the East China Sea Continental shelf [J]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2003: 835.
- [31] GAO Shu, WANG Yaping. Changes in material fluxes from the Changjiang River and their implications on the adjoining continental shelf ecosystem[J]. Continental Shelf Research, 2008, 28: 1490-1500.

- [32] 张明宇, 常鑫, 胡利民, 等. 东海内陆架有机碳的源—汇过程及其沉积记录[J]. 沉积学报, 2021, 39(3): 593-609.
ZHANG Mingyu, CHANG Xin, HU Limin, et al. Source-to-sink process of organic carbon on the inner shelf of the East China Sea and its sedimentary records[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(3): 593-609.
- [33] DAI Zijun, MEI Xuefei, DARBY S E, et al. Fluvial sediment transfer in the Changjiang (Yangtze) river-estuary depositional system[J]. Journal of Hydrology, 2018, 566: 719-734.
- [34] GAO Jianhua, JIA Jianjun, KETTNER A J, et al. Reservoir-induced changes to fluvial fluxes and their downstream impacts on sedimentary processes: The Changjiang (Yangtze) River, China [J]. Quaternary International, 2018, 493: 187-197.
- [35] GAO Jianhua, SHI Yong, SHENG Hui, et al. Rapid response of the Changjiang (Yangtze) River and East China Sea source-to-sink conveying system to human induced catchment perturbations [J]. Marine Geology, 2019, 414: 1-17.
- [36] WRIGHT L D, FRIEDRICHS C T. Gravity-driven sediment transport on continental shelves: a status report[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(17-18): 2092-2107.
- [37] YANG Yang, WANG Yaping, GAO Shu, et al. Sediment resuspension in tidally-dominated coastal environments: new insights into the threshold for initial movement[J]. Ocean Dynamics, 2016, 66(3): 401-417.

Dynamic processes of the East China Sea inner shelf mud deposits associated with the Changjiang (Yangtze River) and their environmental consequences: An appeal for long-term observation requirements

GAO Shu

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 200093, China)

Abstract: A large scale mud deposit associated with the Changjiang (Yangtze River) has been formed over the inner shelf waters of the East China Sea. It serves as both source and sink for fine-grained sediment and organic matter. Three scientific problems in regional sediment dynamics have been identified, i. e., the process-product relationships of the mud deposit, the role played by the mud in ecosystem dynamics, and the potential of future magnitude of the carbon reservoir contained in the sedimentary system. The research topics include the future evolution of the Changjiang mud deposit, the generation of sediment gravity flows, organic matter content in the deposit in relation to water column primary production and hypoxia, wave energy attenuation over the mud bed, the decay of particulate organic matter in response to resuspension, and the carbon reservoir pattern in relation to the evolution of the mud deposit. Such research requires an enhanced ability to collect long-term, continuous, high-resolution data associated with the benthic boundary layer, the water column and some new sources (e. g., data derived from in situ imagery analysis). The bottom boundary layer data are useful to the studies on sediment gravity flow, wave energy dissipation over the mud area, and the turbulence-influenced sediment initiation conditions. The water column data will help to establish the delay curves of organic matter, which is critical to deal with the organic matter burial rate, the formation of shallow gas, and the carbon reservoir issues. Furthermore, there is a demand to collect innovative types of data, to obtain additional information on material source and mud deposit evolution, which awaits technological breakthroughs from the observation systems.

Key words: Ocean Observation Systems; fine-grain sediment; benthic boundary layer; source-sink relationship; carbon budgeting; ecosystems; Changjiang (Yangtze River) Estuarine-coastal waters