

文章编号: 1000-0550(2013)05-0845-11

# 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<sup>①</sup>

高 抒

(南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室 南京 210093)

**摘 要** 渤、黄、东海是典型的物源供给丰富的宽广陆架环境,形成的全新世沉积记录十分丰富。本区域潮汐作用、陆架环流作用和沉积物重力流导致的物质运输都很活跃;陆架沉积动力过程与全新世沉积体系的空间分布、物质组成、堆积速率、层序年代等特征相联系。全新世陆架与海岸沉积具有高分辨率、空间分布的不连续和沉积记录的片段性等特征。江苏海岸全新世中期海岸沉积、杭州湾全新世早—中期沉积、浙闽沿岸全新世沉积和其他陆架泥质沉积可从物质来源(海面上升中的沉积改造和河流入海通量)、输运—堆积过程、沉积层序形成的先后次序、陆架沉积记录的未来状况等方面进行分析。数值模拟可用于深化本区的过程—产物关系研究。

**关键词** 沉积物输运—堆积过程 全新世沉积体系 过程—产物关系 沉积记录 中国东部陆架

**第一作者简介** 高 抒 男 1956 年出生 教授 博士 海洋地质学、沉积动力学、海岸地貌学研究 E-mail: shugao@nju.edu.cn

**中图分类号** P534.63+2 **文献标志码** A

沉积记录含有海面变化信息,因此学者们尝试以全球海面变化作为地层的时间标尺,早期 Lyell 等人就提出过这样的主张<sup>[1]</sup>。L. L. Sloss 于 1963 年提出全球自寒武纪以来有过 6 次大的层序循环,可作为层序边界的一级控制<sup>[2]</sup>。P. R. Vail 等提出了“Global Eustatic Chart”(全球海面—地层序列图式)理论,试图在较小的时间尺度上建立沉积层序与海面位置的对应关系<sup>[3]</sup>。这个理论最为直接的应用是解释陆架、海岸区域的地层特征:如果海面变化曲线为已知,则沉积层序覆盖的时段和缺失的时间范围就可以推论出来。全球海面—地层序列图后来经 B. U. Haq 等人进行了补充修改<sup>[4~7]</sup>,现在已成为层序地层学的核心理论。

然而,全球海面—地层序列图式只考虑了海面位置这一因素,而未包括原始地形、沉积物供给、输运和堆积过程等因素,因而不能给出沉积体系的空间分布格局。L. L. Sloss 本人曾提出,陆架与海岸沉积实际上受控于上述四个因素,只是限于当时的条件,只重点分析了海面变化因素的长时间尺度效应<sup>[1]</sup>。对于长时间尺度的问题,如果我们只是关注层序的先后次序问题,那么这样的分析也许是合理的<sup>[8,9]</sup>。但是,

一旦涉及较短时间尺度的问题,如全新世陆架—海岸沉积体系的分布及其演化,则其他因素是不能忽略的。在沉积动力学领域,人们根据长期的现场观测,试图将过程与沉积环境产物即沉积层序和记录的特征相联系<sup>[10~12]</sup>。美国学者还推动了一个重要研究计划即 STRATFORM 来专门研究过程—产物关系<sup>[13]</sup>。

就原始地形而言,在海面位置固定的情形下,陆架的宽窄和海底坡度是地质历史上构造和沉积演化的结果。陆源沉积物的供给决定了单位时间内陆架所接收的沉积物的多少,这部分沉积物是陆地风化剥蚀而产生的。按照这两个因素可划分陆架的四种端元类型,例如中国东部陆架(渤、黄、东海)属于沉积物供给多、陆架宽广的陆架,孟加拉湾沿岸属于沉积物供给多、陆架狭窄的陆架,欧洲北海属于沉积物供给少、陆架宽广的陆架,而北美洲西部海岸水域属于沉积物供给少、陆架狭窄的陆架。陆架宽窄和沉积物供给多少决定了水动力和物质运动的环境,具体而言陆架沉积物输运过程有三种典型的状况,一是潮汐或潮流—波浪共同作用导致的物质输运,二是伴随陆架环流的细颗粒物输运,三是重力流引起的近底床物质输运。陆架沉积物堆积的产物是沉积记录,它是研

<sup>①</sup>国家重大科学研究计划项目“扬子大三角洲演化与陆海交互作用过程及效应研究”(批准号:2013CB956500)资助  
收稿日期:2013-07-31

究全球变化的重要材料。

渤、黄、东海作为物源供给丰富的宽广陆架的典型,形成的陆架沉积记录十分丰富。本文的目的是根据近年来的本区域全新世沉积体系研究中所获的数据和资料,探讨海岸-陆架环境中的沉积物输运过程及其产物的关系问题,进而提出本领域需要进一步研究的问题。

## 1 渤、黄、东海区域特征

渤、黄、东海区域是全球具有代表性的陆架泥质沉积分布区之一,这里河流沉积物供给量比欧洲北海高出了2个数量级,泥质沉积发育良好<sup>[14]</sup>。当系统外部无源或内部无输出时,海底沉降和再悬浮反复进行,不产生床面净冲淤,只有当外部有物质来源,泥区才会形成并持续生长。本区季风气候导致的强降水和流域较大的坡降导致很高的河流沉积物入海通量<sup>[15]</sup>,这是泥质沉积形成的物质条件。

在面积并不大的渤、黄、东海区域,有长江、黄河以及其他众多中、小河流入海,而且这些河流大部分是悬沙浓度较高的。全新世时期形成的长江三角洲的陆地面积就达到了 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,还有一块 $1.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的水下三角洲<sup>[16~20]</sup>;杭州湾的充填沉积与长江有关<sup>[21]</sup>和浙闽沿岸的厚度达40 m的泥质沉积也被认为是长江的远端三角洲<sup>[22~25]</sup>。黄河历史上决口频发,使大量沉积物堆积于华北平原,在渤海和南海黄海也各形成了三角洲<sup>[26~29]</sup>。1127~1855年,黄河在江苏海岸入海,岸线由于沉积物的输入迅速向海推进,短时间内就形成了巨大的三角洲和滨海平原堆积体<sup>[30]</sup>。现代黄河三角洲的陆地面积超过 $5\,500 \text{ km}^2$ ,是在1855年以来形成的;山东半岛北侧的泥质堆积体被认为是黄河远端三角洲<sup>[31~34]</sup>,这个泥质堆积体的沉积物还进一步向海扩散,在北黄海中部形成大面积的泥质沉积区<sup>[14, 35~38]</sup>。此外,在韩国西南海岸也有厚层的全新世泥质沉积,其物质来源有多种观点,韩国学者认为是来自韩国的入海小河<sup>[35, 39, 40]</sup>。

作为陆架宽广而沉积物供给贫乏陆架的典型代表,欧洲北海的全新世沉积,如潮流脊、潮流沙席、潮流滩、堡岛海滩等,主要是早期沉积体被海面上升后的波浪、潮流作用改造的产物。渤、黄、东海区域也有这样的沉积体,如渤海东部和江苏岸外的潮流脊<sup>[41, 42]</sup>、朝鲜西海岸的潮流脊<sup>[43]</sup>、长江口外北侧的扬子大浅滩<sup>[44]</sup>、长江口外深水区的古潮流脊<sup>[45, 46]</sup>,它们均形成于全新世,但物质是来自下伏地层的改造。

## 2 沉积物输运和堆积过程

### 2.1 潮汐作用导致的物质输运

渤、黄、东海区域潮汐作用十分显著,如杭州湾是举世闻名的强潮海湾,黄海沿岸(江苏海岸南部和朝鲜、韩国海岸)的最大大潮潮差也超过了7 m。本区内陆架水深小、坡度缓,再加上波浪的叠加,悬沙输运十分活跃。

潮流输沙的观测主要是通过全潮水文观测的方式进行的,在过去的三十多年里本区观测过的站位数以千计。每次观测持续约26小时,从固定位置的船上测定水层中不同层位的水位、流速、流向、悬沙浓度、温盐度等参数的时间序列<sup>[47]</sup>。全潮水文观测数据的分析可以提供涨落潮和潮周期的潮流流速、悬沙浓度、悬沙通量和输运率的特征值,但用来估算长时期的物质输运量则有很大的不确定性,这主要是由于观测时段的代表性难以评价。尽管如此,这类数据对于输运过程和机理的分析(如再悬浮和扩散过程)和数值模型运算(如模型输入参数的确定)是非常重要的。此外,近年来较多地利用锚系或长期观测站来获得较长的时间序列<sup>[48, 49]</sup>;长江口周边水域的7个站位上的悬沙浓度长期观测表明,除潮流外,悬沙浓度深受季节性的波浪变化和河流入海通量变化的影响,两者均可影响长江河口最大浑浊带的位置和特征<sup>[49]</sup>。

利用数值模型获取沉积物输运信息的方法如今被普遍应用。例如,研究者们对黄河口和渤海<sup>[50~52]</sup>、以及长江口及邻近海区进行了悬沙输运模拟<sup>[53, 54]</sup>,结果表明悬沙浓度特征和分布是受潮流控制的,而悬沙的长距离输运与海域陆架环流格局有关。在江苏海岸,Xing等<sup>[55]</sup>用Mike 12模型计算了江苏海岸水域冬、夏季浪-流共同作用下的悬沙浓度,均与实测值相近;该文还提出冬季再悬浮强度的提高是由于水温的影响而非波浪的影响。这与Wang等<sup>[56]</sup>的结果不同,他们也进行了江苏沿岸浪-流共同作用的悬沙浓度特征和输运模拟,显示波浪有显著作用,且模拟的冬季悬沙扩散格局与遥感图像中显示的相似,输往岸外济州岛方向。上述模拟结果的分歧很明显,今后应通过潮流物质输运的进一步研究来消除。

### 2.2 陆架环流输运

沉积物运动可由于陆架环流而造成。陆架环流是风、水面梯度和水体密度差异共同作用的结果。海洋表层水在风的作用下会顺着风向运动,一旦运动起

来之后,又会受到科氏力的作用而发生流向偏转。水体的水平运动必然导致水面高度的改变,进而使重力产生作用。陆架不同地点的水体密度由于温、盐度的差异而不同,密度较大的水体倾向于下沉,而密度较小倾向于涌升,这样也能引发水平和垂向的流动。渤、黄、东海区陆架空间容量大,又有黑潮和长江等河流淡水径流的汇入,因而形成了复杂的水团分布和运动格局<sup>[57~59]</sup>。本区陆架环流的流速远低于潮流,通常只有 $1\sim 10\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级<sup>[60]</sup>。然而,由于细颗粒物质的沉降速度低,因此可被陆架环流长距离搬运,甚至跨越整个陆架<sup>[10]</sup>。

关于本区域沉积物向深海扩散的过程和机理,目前研究还不够深入。间接的证据主要是来自物源示踪<sup>[61~63]</sup>和陆架泥质区堆积速率<sup>[64~66]</sup>的研究。物源示踪的方法主要是根据堆积区沉积物的特征来判别物源,从而追踪输运路径。示踪物的类型很多,如重金属(Cu、Pb、Cd等)<sup>[67]</sup>、陆源稀土元素<sup>[68]</sup>、河流物质中的磁性矿物<sup>[69,70]</sup>、黏土矿物<sup>[25,71]</sup>、化学风化指数(CIA)<sup>[72]</sup>、<sup>210</sup>Pb和<sup>137</sup>Cs等放射性同位素<sup>[73,74]</sup>、陆源有机质<sup>[75]</sup>等。例如,利用长江沉积物中的重金属Cu、Pb、Cd可追踪长江沉积物向陆架、杭州湾等地的输运和堆积,并从沉积记录中分析流域流域人类活动的变化<sup>[67]</sup>。冲绳海槽2.8万年的黏土矿物分析指示了长江影响程度的历史演化 $2.8\sim 1.4\times 10^4\text{ aB.P.}$ 为长江物质(低海面) $1.4\sim 0.84\times 10^4\text{ aB.P.}$ 为陆架改造物质 $8.4\sim 1.5\times 10^3\text{ aB.P.}$ 来自台湾的物质占优,之后长江物质重新占据主导地位<sup>[71]</sup>。台湾和长江来源的黏土矿物都是伊利石占优,但长江的伊利石结晶度较低且含蒙皂石和高岭石,故台湾海峡北部堆积区的物源可依据这些差异加以区分<sup>[25]</sup>。对粒径数据进行归一化处理,地球化学指标显示东海海底物质来自中国河流,而黄海物质来自中、韩两国河流<sup>[40]</sup>。众多研究者进行了本区域泥区沉积速率的测量和计算,方法主要是柱状样采集和<sup>210</sup>Pb-<sup>137</sup>Cs分析<sup>[38,63~65,76,77]</sup>。分析结果表明,岸线附近由于物质供给丰富而沉积速率较高,可达 $10^0\sim 10^1\text{ cm/a}$ 量级;除此之外,开敞陆架的大部分区域沉积速率为 $10^{-1}\text{ cm/a}$ 量级。

陆架环流的悬沙输运机理分析依赖于现场观测和数值模拟。对陆架环流本身的观测和模拟在物理海洋领域已进行了不少,如黑潮输运通量<sup>[78]</sup>、陆架环流特征的观测<sup>[79]</sup>、黄东海3D陆架环流数值模拟<sup>[80]</sup>等。悬沙输运模拟方面也有多篇论文,如韩国学者对

黄、东海海域所做的悬沙输运数值模拟<sup>[81]</sup>。东海陆坡区底部有向冲绳海槽水平输运的悬沙,其原因是黑潮本身形成的局部环流,在黑潮主流与台湾岛之间形成向海运动的底流<sup>[82]</sup>。根据2000~2008年的多次大面观测数据的分析,黄、东海区夏季的悬沙总量有 $0.18\times 10^9\text{ t}$ <sup>[83]</sup>。由于季风和波浪作用的影响,冬季悬沙总量应更高,如黄河口冬季的悬沙浓度和输运率均远高于夏季,近岸区表现为夏季为汇、冬季为源,冬季悬沙输运率为 $10^0\sim 10^1\text{ kg/m/s}$ 量级,而夏季仅为 $10^{-2}\sim 10^0\text{ kg/m/s}$ <sup>[84]</sup>。应用浪流耦合模型计算不同条件下的黄河沉积物输运,表明在陆架环流作用下,细颗粒物质可以“溢出”渤海,绕过山东半岛进入黄海<sup>[52]</sup>。日本学者M. Watanabe<sup>[85]</sup>1996~1999年连续三年的水文模拟(包括悬沙浓度模拟)结果显示,在1998年长江大洪水中,悬沙可横跨陆架输往冲绳海槽,并且认为输运是以底部浑浊层运动的方式而进行的。

在遥感研究方面,根据对MODIS海洋水色遥感数据的分析<sup>[86,87]</sup>,提出黄、东海冬季向外海扩散的表层浑浊水体中的悬浮物主要来源于江苏沿岸的海底物质再悬浮,并进一步提出黄、东海冬季悬沙扩散主要是由冬季风驱动的陆架环流而导致的<sup>[88]</sup>。此外,根据2002~2008年的海洋水色、海表温度、风速、海表高程异常等数据,近岸区悬沙浓度大于 $50\text{ mg/L}$ 的水体1~4月向海扩散,而7~9月退缩于江苏近岸水域<sup>[89,90]</sup>;遥感图像显示江苏海岸悬沙在冬季沿扬子大浅滩向外扩散,形成悬沙羽状流(Sediment Plume)。

以上研究引发了一个有趣的问题:在风成陆架环流的作用下,一个简化的模式是冬季上层水体向岸运动、底层水体为下沉流,而夏季上层水体向外海运动、底层水体为上升流,因此近岸悬沙得以在冬季逃逸陆架而在夏季被圈闭于陆架水域<sup>[91]</sup>;但是,遥感图像解译结果是冬季表层水体携带悬沙向外海扩散,同时外陆架底层水呈现为下沉流<sup>[82]</sup>。显然,在黄、东海,悬沙跨陆架逃逸的通路还需要进一步研究,除风成环流外,对陆架区存在的多种水团的运动,包括正压和斜压效应的影响,以及水团间锋面过程,应加强观测和模拟分析。

### 2.3 重力流物质输运

关于河口与陆架的沉积物重力流(Sediment gravity flow)本区最早的研究是针对黄河而进行的,黄河水体悬沙浓度很高,易于形成密度流<sup>[92,93]</sup>。之后的

研究表明,密度流的形成并不以高浑浊度的河水为必要条件,如波浪在底床上引起的再悬浮也会改变水体的密度,如果这个密度高于周边水体,就会导致下坡运动<sup>[94]</sup>。长江河口区潮流和波浪共同作用下再悬浮频繁发生,再加上台风、寒潮的影响再悬浮强度可以进一步提升,这使得研究者相信这里是一个适合于沉积物重力流研究的典型环境<sup>[95]</sup>。

沉积物重力流经常与底部浑浊层相联系,在海底峡谷环境中观测到的底部浑浊层往往是沉积物重力流的标志<sup>[96,97]</sup>,但在坡度很缓的陆架区底部浑浊层的运动(包括下坡运动)也可在陆架环流作用下发生,因此仅凭底部浑浊层的存在是不能确定沉积物重力流作用大小的。Honda等<sup>[98]</sup>观察到低<sup>14</sup>C含量的沉积物从陆坡输往冲绳海槽,此类物质应为年龄较老的陆架沉积,表明底部再悬浮和底部浑浊层的重要性。Hoshika等<sup>[99]</sup>在东海的三个锚系站获取了夏季大小潮周期的底床以上10 m处的连续流速、悬沙浓度和温盐度数据,显示调查期间再悬浮和沉降的反复发生,但他们认为底部浑浊层的下坡运动是季风环流驱动的。Oguri等<sup>[77]</sup>获得了类似的观测结果,在东海陆架上观测到的底部浑浊层悬沙浓度大于20 mg/L,显示向下坡方向运动的迹象,但在所给出的悬沙向深海运输的概念图中只有陆架环流作用,未提及重力流作用。在冲绳海槽和陆坡区,锚系站位上测得的流速和沉积物捕集器样品分析表明,底部浑浊层运动多集中于海底峡谷附近,其强度与潮流等水流相关性不大,而呈现为阵发性事件,表明是重力流作用所致<sup>[100]</sup>。冲绳海槽冬季悬沙通量大,显示了季风环流的影响;在水层中,600 m高度的垂向沉降通量小于底层,表明底部浑浊层的影响<sup>[101]</sup>。极端事件如台风引发的再悬浮事件往往形成底部浑浊层,如在2009年发生的一次台风期间,在浙闽沿岸泥区观察到底层悬沙浓度的明显升高,台风前后相差很大<sup>[102]</sup>。东海大陆架台风期间底部浑浊层的运动也被观测到了<sup>[103]</sup>。在黄河水下三角洲的悬沙输运模拟中,也重现了浑浊水团的下坡运动,并认为重力流是起了显著作用的<sup>[104]</sup>。上述观测和模拟结果都提出了沉积物重力流在本区域是一种重要作用,但如何从陆架水平和垂向环流中分离出沉积物重力流的效应,还需要更深入的研究。

本区沉积物重力流作用的证据之一是长江、黄河等大河的远端三角洲的形成,长江远端三角洲位于浙闽海岸内陆架,而黄河远端三角洲位于山东半岛东北

部水域,均表现为具斜坡堆积体(Cliniform)形态的泥质沉积<sup>[23,32,33,105]</sup>。这种在浅地层记录中以平行状推进的斜坡沉积难以用水层中悬沙的沉降来简单地解释。水层中悬沙浓度的平面分布有一个概率,从统计角度看,悬沙浓度高值位置应位于某一个固定地点附近,如果悬沙沉降是一个主控因素,则悬沙浓度高值区附近应成为沉积中心,但实际情况是沉积层以平行方式向外推进,因此斜坡沉积的形成是沉积物重力流存在的一个证据。长江口附近活跃的再悬浮过程和广泛分布的斜坡沉积使这里成为底部浑浊层和沉积物重力流的一个关键研究区<sup>[95]</sup>,尽管如此,目前的研究工作还进行得较少。

### 3 陆架全新世沉积形成及其科学问题

#### 3.1 沉积物输运研究的有效性

到目前为止关于沉积物输运已经做了很多研究,但这些结果能在多大程度上解释渤、黄、东海区域的全新世沉积体系特征呢?以下两个例子给出了正面的答案,说明还是有一定成功性的。第一个例子是黄海中部泥区的沉积速率的计算。前已述及,在渤、黄、东海已采集了大量柱状样,进行了沉积速率测定。黄海中部泥区的沉积物来源于黄河、废黄河三角洲和扬子大浅滩<sup>[38]</sup>,沉积速率为1 mm/a量级。若用沉积物输运方法(根据床面高程变化方程)来估算,由于陆架环流流速的量级是 $0.1 \text{ ms}^{-1}$ ,悬沙浓度的量级是 $0.01 \text{ kg/m}^3$ ,水深的量级是50 m,故沉积物净输运率的量级为 $0.1 \text{ kg/m/s}$ 。此外,而黄海的空间尺度是100 km,因此根据沉积物连续方程底床的堆积速率应为1 mm/a量级,与<sup>210</sup>Pb测定结果一致。这就是说,用沉积动力学方法能够说明泥质沉积形成的时间尺度。

第二个例子是东海陆架潮流脊的演化问题。东海陆架上有很多潮流脊,分布于不同水深的海域<sup>[45,46,107]</sup>。潮流脊的形成条件是要有较强的往复流流场和充分的粗颗粒沉积物供给,在更新世海退阶段和全新世海面上升阶段流场条件都可满足<sup>[107]</sup>,而在现今海面条件下,虽然流速较低,但观测结果表明仍然可以使潮流脊发生迁移<sup>[46]</sup>。日本学者关于全新世早、中期的潮流流场模拟显示,不同海面时期的较强往复流流场正好与不同高程的潮流脊体系相对应<sup>[108,109]</sup>。我国研究者的古流场模拟也得出了类似的结果<sup>[110,111]</sup>。关于粗颗粒沉积物供给的条件,以上研究表明老地层中淘洗出来的粗颗粒物足以构成潮流脊的基础。因此,从水动力和沉积动力的角度能

够解释这类堆积体的形成过程。今后通过物质分选和运输的模拟,将能更好地再现这些潮流脊体系的演化历程。

### 3.2 过程 产物的对应关系

海洋沉积动力学的重要应用之一,是以正演方式探讨陆架全新世沉积的过程—产物关系<sup>[12,13]</sup>。在产物方面有几个重要的问题,首先是在全新世海面变化的背景下沉积体系是何时开始发育的,第二是沉积体系中高分辨的沉积记录的平面分布,第三是所形成的沉积记录所覆盖的时间段。

在江苏海岸,从全新世中期(约6 500 aB. P.)到宋代的1127年,岸线缓慢向海推进,五千多年时间里淤长了约10 km,但此后的八百多年里黄河在本区入海,岸线淤进了50~60 km<sup>[30]</sup>,这两个时段的全新世沉积体系的形成速度有数量级的差异。目前,江苏中部海岸的继续淤长依赖于废黄河三角洲侵蚀和岸外辐射沙脊区的物质供给<sup>[30]</sup>,但从全新世历史看两个物源的重要性是不对等的,现在如果两个物源都重要,就表明辐射沙脊区的动力状况有了很大改变。因此,从公元1127年之前的岸线演化动态模拟入手,有可能确定辐射沙脊区所在海底的改造强度及此后沉积动力过程的变化。此外,将废黄河三角洲和江苏中部海岸看成一个小型、局部的源汇系统并进行沉积动力过程模拟,可以揭示1127年以来潮滩沉积体系的演化格局。

长江三角洲是一个重要的全新世堆积体。研究表明,长江三角洲的主体记录了四、五千年的历史<sup>[112,113]</sup>。此前长江的沉积物可能主要用于充填流域和河口的沉积盆地,到了距今2 000 a,长江沉积物才大量进入开敞陆架区。三角洲生长的模拟研究表明,在自然条件下,三角洲的初期生长是很快的,但后来逐渐变缓;随着时间的推移长江三角洲并不会无限变大,它存在一个生长极限<sup>[19]</sup>。目前,由于自然和人类活动的共同作用,长江沉积物的大部分甚至全部向外扩散,三角洲的生长可能已经停止<sup>[20]</sup>。长江沉积物向海扩散,最终堆积在何处?一般认为,除了少部分随陆架环流输往外陆架(见前述),这些物质主要堆积于杭州湾和浙闽沿岸,但杭州湾和浙闽沿岸泥质沉积的性质还需要进一步厘清。

杭州湾全新世沉积厚达百米量级<sup>[21]</sup>,而其中现代长江(即过去2 000 a)的沉积物只有十几米厚度,覆盖于这个下切河谷沉积体系的表层<sup>[114,115]</sup>。长江沉积物2 000 aB. P.之前并不到达杭州湾,而钱塘江

的入海泥沙通量很小,那么杭州湾全新世早、中期物质来源于何处?从沉积动力上看,岸外物质在海面上升中的改造可以提供物源。例如,东海外陆架的水下沙脊的沉积构造显示了表征潮流脊整体迁移的斜层理,原先泥质物质含量较高的底质在迁移中被改造为砂质。位于30 m之下的沙脊下伏地层为老于两万年的泥质沉积<sup>[46]</sup>。这就不排除在全新世海面上升中泥质沉积被改造为沙脊、冲刷产生的悬沙物质被搬运至近岸区堆积的可能性;这个模式也能解释杭州湾沉积物的年龄测定结果。在老地层被改造的情况下,上层物质被输运并堆积于沉积体下部,而上层物质随后才被输运,因而所形成的沉积体的<sup>14</sup>C年龄出现倒置现象<sup>[41]</sup>。此时,<sup>14</sup>C测定的是物质的年龄,而不是堆积事件的年龄,堆积事件是更加晚近的事情。杭州湾全新世沉积的下部厚度达80 m,也出现了年龄倒置,且上下层的年龄较为一致。这难以解释为一个瞬间堆积事件,而岸外物质输送则可以解释这些特征。事实上,在海面上升的各个时期本区域的大部分属于强潮环境<sup>[108,109]</sup>,陆架上的全新世沉积经常显示被改造和在搬运的特征<sup>[35]</sup>。通过全新世早、中期的潮流流场模拟,可以计算东海外陆架潮流脊受改造的强度和产生的细颗粒物数量,进而模拟这些物质的去向和堆积地点,以解决杭州湾全新世沉积的层序特征和形成年代问题。在<sup>14</sup>C方法由于“老碳”问题<sup>[116]</sup>而失效的情况下,沉积动力方法可能给出一个合理的年代学框架。长江三角洲全新世沉积也属于河谷下切区产物<sup>[18]</sup>,数值模拟有可能揭示全新世早期长江河口不仅没有物质输出,相反还是一个岸外海底改造物质的堆积地点。

浙闽沿岸的泥质沉积也有类似的问题。有些研究者认为,陆架环流对浙闽沿岸泥的形成有重要作用,认为该泥质沉积都是由高海面之后长江输入的物质构成的<sup>[23~25,117]</sup>。但是,浙闽沿岸泥区的钻孔样品的<sup>14</sup>C年龄普遍显示,上部几米泥质沉积是过去2 000 a形成的,而下部的主体部分则年龄较老,<sup>14</sup>C年龄大于4 000 a,上、下两之间有千年量级的沉积间断<sup>[23,118,119]</sup>。这一观察结果与4 000 aB. P.长江沉积物主要充填流域和河口沉积盆地、最近2 000 a才大量进入开敞陆架区的结论相一致。在多个钻孔地点,表层为泥质物质,之下砂质物质含量提高<sup>[120]</sup>;近表层的沉积速率高于整个层序的平均沉积速率<sup>[117]</sup>,说明了沉积的不连续性。这里的情形与杭州湾相似,即上层是现代长江的,下层是海面上升过程中被改造的

物质所堆积的。因此,对东海外陆架地层在全新世海面上升时期中的潮流流场和沉积物输运进行模拟,辅之以浙闽沿岸局地物质的混合作用的分析,有助于浙闽沿岸泥的上下两层结构和沉积间断的解释。将上述沉积层序特征解释为长江入海通量在全新世时期的变化是有趣的<sup>[117]</sup>,但却缺乏沉积动力过程的依据。

### 3.3 全新世沉积的未来演化趋势

从渤、黄、东海全新世沉积的研究中我们看到了不同沉积体系的空间分布和时间演化的多样性,这说明陆架沉积的格局不是仅由海面变化这一个因素决定的。因此,全球海面—地层序列图式理论<sup>[3]</sup>应理解为一个区域的全部可能的沉积在海面周期性变化下所能形成的最大时间覆盖范围,但它不能应用到一个具体的沉积体系。陆架宽度和坡度影响沉积体的可容空间大小,并影响沉积物重力流等过程的效应,沉积物供应率影响沉积速率及其空间分布,而沉积物输运和堆积过程影响陆架地貌演化和沉积体系的位置和规模。考虑了这些因素之后,就可能从全新世沉积的现状推论其未来演化趋势。这里,长江河口及邻近海域的沉积体系可作为一个实例,来说明为了分析其演化趋势、定量刻画各堆积体的分布,需要进行哪些研究。

前已述及,现代长江在陆架、海岸地区的沉积体系是在河谷下游盆地充填之后才开始形成的,故高分辨率的长江三角洲记录并非从全新世的初期开始,而且随着三角洲生长区域极限,今后此类记录也会终止。因此,长江三角洲这样一个重要堆积体所覆盖的时间长度实际上只占全新世的一小部分;从整个全新世时间段来看,长江三角洲有沉积记录的时段呈现出“两端缩短”的格局,即全新世早期和晚期都会有沉积记录的缺失。长江三角洲停止生长时,河流入海物质将输往何处?这是由陆架沉积动力过程决定的;甚至在长江三角洲停止生长之前,陆架其他地点的沉积体系就开始形成了,而且不乏高分辨率的记录,例如杭州湾和浙闽沿岸泥区就是如此。由于陆架环流和沉积物重力流的变化,泥质沉积的堆积中心位置也会发生变化,因此它们也可能是“两端缩短”的记录。在陆源物质的持续供给下,新的沉积体系可以不断产生,因而本区的陆架、海岸地区的沉积体系是高分辨率的沉积记录片段,如能首尾相接,这可以形成环境演化研究的理想材料,这一点对于钻孔分析工作<sup>[121]</sup>是很重要的。

作为对比,我们可以比较沉积物供给贫乏的宽广陆架的沉积记录特征,以欧洲北海为代表。根据德国学者的研究,在全新世时期,由于陆源物质的缺乏,海底地层的改造时主要的物源;随着海面上升,整个沉积体系发生向岸的迁移,这样老的沉积体系不断被消除,海面稳定之后海岸逐渐达到地貌上的均衡态,沉积体系也就停止生长了<sup>[122]</sup>。因此,全新世沉积记录将有明显的“两端缩短”现象;不仅如此,再往下不会有新的沉积体系形成,不管今后全新世将持续多久,都不会有长时间段的新记录,总体上沉积记录的时间覆盖将远远短于全球海面—地层序列图式理论的预测值。

在全新世沉积的未来这个问题上,针对沉积物供给丰富程度不同的区域(如渤、黄、东海和欧洲北海)进行对比研究,并通过输运—堆积过程的模拟,可以推进陆架区过程—产物关系的研究。

## 4 结论

(1) 渤、黄、东海是典型的陆源沉积物供给丰富的宽广陆架,其物质输运格局受到潮流作用、陆架环流和沉积物重力流的控制。目前,对潮致物质输运的观测、机理分析和模拟研究较为深入,对陆架环流进行了观测和模拟,但机理分析还需进一步深入(如细颗粒物相深海输送的机理),对陆架沉积物重力流的观测和模拟还处于初步阶段,有关泥质斜坡沉积形成和底部浑浊层运动的研究亟待加强。

(2) 渤、黄、东海全新世沉积体系的形成可与物质输运过程相联系。已知的细颗粒物输运过程能够解释陆架泥质区的堆积速率,而古潮流模拟揭示了陆架潮流脊体系的形成条件。这一过程—产物关系可以推广至其他全新世沉积体系的形成演化研究,如江苏海岸的全新世中期海岸沉积、杭州湾全新世早—中期沉积、以及浙闽沿岸全新世沉积,以深化对物源、沉积体系初始形成、全新世沉积年代等问题的认识。

(3) “全球海面—地层序列图式”理论可以解释陆架海岸沉积层序的最大可能时间范围,但具体的沉积层序的空间分布范围和覆盖的时间段决定于陆架原始地形、物质供给和输运—堆积过程。渤、黄、东海的泥质沉积具有比较高的时间分辨率,综合考虑上述因素,有可能把不同地点的高分辨率沉积片段连接在一起,形成环境演化分析的理想沉积记录。此外,通过模拟研究,还可预测陆架沉积层序和记录的未来状况。

致谢 本文的部分内容曾在“中国东部陆架海沉积动力过程及其生物地球化学效应学术研讨会”(青岛,2012年10月12~15日)上宣读,并以“渤、黄、东海沉积物输运和堆积过程”为题,做了博士研究生《自然地理学进展》课程讲座。德国不莱梅大学 B. W. Flemming 教授在学术交流中提供了欧洲北海的全新世地层研究信息。谨此致谢。

### 参考文献(References)

- 1 Miall A D. The geology of stratigraphic sequences (2nd ed) [M]. Springer, Berlin, 2010, 522
- 2 Sloss L L. Sequences in the cratonic interior of North America [J]. Geological Society of America Bulletin, 1963, 74: 93-113
- 3 Vail P R, Mitchum R M, Todd R G Jr *et al.* Seismic stratigraphy and global changes of sea level. In: Payton C E (Ed.), Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration [J]. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1977, 26: 49-212
- 4 Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic [J]. Science, 1987, 235: 1156-1167
- 5 Sloss L L. Fourty years of sequence stratigraphy [J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100: 1661-1665
- 6 Haq B U, Schutter S R. A chronology of Paleozoic sea-level changes [J]. Science, 2008, 322: 64-68
- 7 Miall A D, Miall C E. Sequence stratigraphy as a scientific enterprise: the evolution and persistence of conflicting paradigms [J]. Earth Science Reviews, 2001, 54: 321-348
- 8 Kamp P J J, Naish T. Forward modelling of the sequence stratigraphic architecture of shelf cyclothem: application to Late Pliocene sequences, Wanganui Basin (New Zealand) [J]. Sedimentary Geology, 1998, 116: 57-80
- 9 Paola C. Quantitative models of sedimentary basin filling [J]. Sedimentology, 2000, 47 (Suppl. 1): 121-178
- 10 Nittrouer C A, Wright L D. Transport of particles across continental shelves [J]. Reviews of Geophysics, 1994, 32: 85-113
- 11 Sternberg R W, Aagaard K, Cacchione D, *et al.* Long-term near-bed observations of velocity and hydrographic properties in the northwest Barents Sea with implications for sediment transport [J]. Continental Shelf Research, 2001, 21: 509-529
- 12 Nittrouer C A, Austin J A, Field M E, *et al.* (ed.). Continental margin sedimentation: from sediment transport to sequence stratigraphy (IAS Special Publication 37) [M]. John Wiley, Chichester, 2009, 560
- 13 Nittrouer C A. STRATAFORM: overview of its design and synthesis of its results [J]. Marine Geology, 1999, 154: 3-12
- 14 Dronkers J, Miltenburg A G. Fine sediment deposits in shelf seas [J]. Journal of Marine Systems, 1996, 7: 119-131
- 15 Milliman J D, Farnsworth K L. River discharge to the coastal ocean: a global synthesis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 384
- 16 Chen J Y, Li D J, Chen B L, *et al.* The processes of dynamic sedimentation in the Changjiang Estuary [J]. Journal of Sea Research, 1999, 41: 129-140
- 17 Chen Z Y, Song B, Wang Z, *et al.* Late Quaternary evolution of the sub-aqueous Yangtze Delta, China: sedimentation, stratigraphy, palynology, and deformation [J]. Marine Geology, 2000, 162: 423-441
- 18 Li C X, Wang P, Sun H P, *et al.* Late Quaternary incised-valley fill of the Yangtze delta (China): its stratigraphic framework and evolution [J]. Sedimentary Geology, 2002, 152: 133-158
- 19 Gao S. Modeling the growth limit of the Changjiang Delta [J]. Geomorphology, 2007, 85: 225-236
- 20 Gao S, Wang Y P, Gao J H. Sediment retention at the Changjiang sub-aqueous delta over a 57 year period, in response to catchment changes [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 95: 29-38
- 21 Lin C M, Zhuo H C, Gao S. Sedimentary facies and evolution in the Qiantang River incised valley, eastern China [J]. Marine Geology, 2005, 219: 235-259
- 22 Qin Y S, Zhao Y Y, Chen L R, *et al.* Geology of the East China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1996: 357
- 23 Liu J P, Li A C, Xu K H, *et al.* Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea [J]. Continental Shelf Research, 2006, 26: 2141-2156
- 24 Liu J P, Xu K H, Li A C, *et al.* Flux and fate of Yangtze river sediment delivered to the East China Sea [J]. Geomorphology, 2007, 85: 208-224
- 25 Xu K H, Milliman J D, Li A C, *et al.* Yangtze and Taiwan derived sediments on the inner shelf of East China Sea [J]. Continental Shelf Research, 2009, 29: 2240-2256
- 26 Xue C T. Historical changes in the Yellow River delta, China [J]. Marine Geology, 1993, 113: 321-329
- 27 Yu L S. The Huanghe (Yellow) River: a review of its development, characteristics, and future management issues [J]. Continental Shelf Research, 2002, 22: 389-403
- 28 Liu J, Saito Y, Wang H, *et al.* Stratigraphic development during the Late Pleistocene and Holocene offshore of the Yellow River delta, Bohai Sea [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 36: 318-331
- 29 Chen Y Z, Syvitski J P M, Gao S, *et al.* Socio-economic impacts on flooding: a 4000 year history of the Yellow River, China [J]. AM-BIO, 2012, 41: 682-698
- 30 Gao S. Modeling the preservation potential of tidal flat sedimentary records, Jiangsu coast, eastern China [J]. Continental Shelf Research, 2009, 29: 1927-1936
- 31 Liu J P, Milliman J D, Gao S. The Shandong mud wedge and post-glacial sediment accumulation in the Yellow Sea [J]. Geo-Marine Letters, 2002, 21: 212-218
- 32 Liu J P, Milliman J D, Gao S, *et al.* Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea [J]. Marine Geology, 2004, 209: 45-67
- 33 Liu J, Saito Y, Wang H, *et al.* Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off Shandong Peninsula [J]. Marine Geology, 2007, 236: 165-187



- 34 Yang Z S , Liu J P . A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology* , 2007 , 240: 169-176
- 35 Park S C , Lee H H , Han H S , *et al.* Evolution of late Quaternary mud deposits and recent sediment budget in the southeastern Yellow Sea [J]. *Marine Geology* , 2000 , 170: 271-288
- 36 Gao S , Jia J J . Modeling suspended sediment distribution in continental shelf upwelling/downwelling settings [J]. *Geo-Marine Letters* , 2003 , 22: 218-226
- 37 Gao S . Mud deposits on eastern China continental shelves: an overview. In: Kasyanov V L , Lutaenko K A ( Ed. ) , Reports of the international APN-START global change research awareness raising symposium in Northeast Asia [M]. *Dalnauka* , Vladivostok , 2005 , 177-190
- 38 Lim D I , Choi J Y , Jung H S , *et al.* Recent sediment accumulation and origin of shelf mud deposits in the Yellow and East China Seas [J]. *Progress in Oceanography* , 2007 , 73( 2 ) : 145-159
- 39 Lee H J , Chu Y S . Origin of inner-shelf mud deposit in the southeastern Yellow Sea: Huskan Mud Belt [J]. *Journal of Sedimentary Research* , 2001 , 71: 144-154
- 40 Lim D I , Jung H S , Choi J Y , *et al.* Geochemical compositions of river and shelf sediments in the Yellow Sea: grain-size normalization and sediment provenance [J]. *Continental Shelf Research* , 2006 , 26: 15-24
- 41 Liu Z X , Xia D X , Bern S , *et al.* Tidal deposition systems of China's continental shelf , with special reference to the eastern Bohai Sea [J]. *Marine Geology* , 1998 , 145: 225-253
- 42 Wang Y , Zhang Y Z , Zou X Q , *et al.* The sand ridge field of the South Yellow Sea: origin by river-sea interaction [J]. *Marine Geology* , 2012: 291-294; 132-146
- 43 Off T . Rhythmic linear sand bodies caused by tidal currents [J]. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* , 1963 , 47: 324-341
- 44 Liu Z X . Yangtze Shoal—a modern tidal sand sheet in the northwestern part of the East China Sea [J]. *Marine Geology* , 1997 , 137 , 321-330
- 45 Yang C S . Active , moribund and buried tidal sand ridges in the East China Sea and the Southern Yellow Sea [J]. *Marine Geology* , 1989 , 88: 97-116
- 46 Liu Z X , Bern S , Saito Y , *et al.* Internal architecture and mobility of tidal sand ridges in the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research* , 2007 , 27: 1820-1834
- 47 Shi Z . Behaviour of fine suspended sediment at the North passage of the Changjiang Estuary , China [J]. *Journal of Hydrology* , 2004 , 293: 180-190
- 48 Wang H J , Yang Z S , Li Y H , *et al.* Dispersal pattern of suspended sediment in the shear frontal zone off the Huanghe ( Yellow River ) mouth [J]. *Continental Shelf Research* , 2007 , 27: 854-871
- 49 Chen S L , Zhang G A , Yang S L , *et al.* Temporal variations of fine suspended sediment concentration in the Changjiang River estuary and adjacent coastal waters , China [J]. *Journal of Hydrology* , 2006 , 331: 137-145
- 50 Jiang W S , Pohlmann T , S ndermann J , *et al.* A modelling study of SPM transport in the Bohai Sea [J]. *Journal of Marine Systems* , 2000 , 24: 175-200
- 51 Jiang W S , Pohlmann T , Sun J , *et al.* SPM transport in the Bohai Sea: field experiments and numerical modeling [J]. *Journal of Marine Systems* , 2004 , 44: 175-188
- 52 Lu J , Qiao F L , Wang X H , *et al.* A numerical study of transport dynamics and seasonal variability of the Yellow River sediment in the Bohai and Yellow seas [J]. *Estuarine , Coastal and Shelf Science* , 2011 , 95: 39-51
- 53 Chen B , Wang K . Suspended sediment transport in the offshore near Yangtze Estuary [J]. *Journal of Hydrodynamics* , 2008 , 20: 373-381
- 54 Hu K L , Ding P X , Wang Z B , *et al.* A 2D/3D hydrodynamic and sediment transport model for the Yangtze Estuary , China [J]. *Journal of Marine Systems* , 2009 , 77: 114-136
- 55 Xing F , Wang Y P , Wang H V . Tidal hydrodynamics and fine-grained sediment transport on the radial sand ridge system in the southern Yellow Sea [J]. *Marine Geology* 2012 , 291-294: 192-210
- 56 Wang X H , Qiao F L , Lu J , *et al.* The turbidity maxima of the northern Jiangsu shoal-water in the Yellow Sea , China [J]. *Estuarine , Coastal and Shelf Science* , 2011 , 93: 201-211
- 57 Li G X , Han X B , Yue S H , *et al.* Monthly variations of water masses in the East China Seas [J]. *Continental Shelf Research* , 2006 , 26: 1954-1970
- 58 Zhang L , Liu Z , Zhang J , *et al.* Reevaluation of mixing among multiple water masses in the shelf: an example from the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research* , 2007 , 27: 1969-1979
- 59 Chen C T A . Chemical and physical fronts in the Bohai , Yellow and East China seas [J]. *Journal of Marine Systems* , 2009 , 78: 394-410
- 60 Lee H J , Chao S Y . A climatological description of circulation in and around the East China Sea [J]. *Deep-Sea Research II* , 2003 , 50: 1065-1084
- 61 Yang S Y , Jung H S , Lim D I , *et al.* A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea [J]. *Earth-Science Reviews* , 2003 , 63: 93-120
- 62 Yang S Y , Lim D I , Jung H S , *et al.* Geochemical composition and provenance discrimination of coastal sediments around Cheju Island in the southeastern Yellow Sea [J]. *Marine Geology* , 2004 , 206: 41-53
- 63 Yang S Y , Youn J S . Geochemical compositions and provenance discrimination of the central south Yellow Sea sediments [J]. *Marine Geology* , 2007 , 243: 229-241
- 64 DeMaster D J , McKee B A , Nittrouer C A , *et al.* Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research* , 1985 , 4: 143-158
- 65 Huh C A , Su C C . Sedimentation dynamics in the East China Sea elucidated from <sup>210</sup>Pb , <sup>137</sup>Cs and <sup>239</sup> <sup>240</sup>Pu [J]. *Marine Geology* , 1999 , 160: 183-196
- 66 Li F Y , Li X G , Song J M *et al.* Sediment flux and source in northern Yellow Sea by <sup>210</sup>Pb technique [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology* , 2006 , 24( 3 ) : 255-263
- 67 Lin S , Hsieh I J , Huang K M *et al.* Influence of the Yangtze River



- and grain size on the spatial variations of heavy metals and organic carbon in the East China Sea continental shelf sediments [J]. *Chemical Geology*, 2002, 182: 377-394
- 68 Song Y H, Choi M S. REE geochemistry of fine-grained sediments from major rivers around the Yellow Sea [J]. *Chemical Geology*, 2009, 266: 328-342
- 69 Wang Y H, Yu Z G, Li G X, *et al.* Discrimination in magnetic properties of different-sized sediments from the Changjiang and Huanghe Estuaries of China and its implication for provenance of sediment on the shelf [J]. *Marine Geology*, 2009, 260: 121-129
- 70 Zhang W G, Ma H L, Ye L P *et al.* Magnetic and geochemical evidence of Yellow and Yangtze River influence on tidal flat deposits in northern Jiangsu Plain, China [J]. *Marine Geology* 2012, 319-322: 47-56
- 71 Dou Y G, Yang S Y, Liu Z X, *et al.* Clay mineral evolution in the central Okinawa Trough since 28 ka: Implications for sediment provenance and paleoenvironmental change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 288: 108-117
- 72 Yang S Y, Li C X, Cai J G. Geochemical compositions of core sediments in eastern China: implication for Late Cenozoic paleoenvironmental changes [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 229: 287-302
- 73 Chung Y C, Chung K, Chang H C, *et al.* Variabilities of particulate flux and  $^{210}\text{Pb}$  in the southern East China Sea and western South Okinawa Trough [J]. *Deep-Sea Research II*, 2003, 50: 1163-1178
- 74 Du J Z, Wu Y F, Huang D K, *et al.* Use of  $^7\text{Be}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  tracers to the transport of surface sediments of the Changjiang Estuary, China [J]. *Journal of Marine Systems*, 2010, 82: 286-294
- 75 Zhu C, Xue B, Pan J M, *et al.* The dispersal of sedimentary terrestrial organic matter in the East China Sea (ECS) as revealed by biomarkers and hydro-chemical characteristics [J]. *Organic Geochemistry*, 2008, 39: 952-957
- 76 Alexander C R, DeMaster D J, Nittrouer C A. Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 1991, 98: 51-72
- 77 Oguri K, Matsumoto E, Yamada M, *et al.* Sediment accumulation rates and budgets of depositing particles of the East China Sea [J]. *Deep-Sea Research II*, 2003, 50: 513-528
- 78 Hsueh Y, Schultz J R, Holland W R. The Kuroshio flow-through in the East China Sea: a numerical model [J]. *Progress in Oceanography*, 1997, 39(2): 79-108
- 79 Lee H J, Jung K T, Foreman M G G, *et al.* A three-dimensional mixed finite-difference Galerkin function model for the oceanic circulation in the Yellow Sea and the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20, 863-895
- 80 Lee H J, Jung K T, So J K, *et al.* A three-dimensional mixed finite-difference Galerkin function model for the oceanic circulation in the Yellow Sea and the East China Sea in the presence of M2 tide [J]. *Continental Shelf Research*, 2002, 22: 67-91
- 81 Choi B H, Mun J Y, Ko J S, *et al.* Simulation of Suspended Sediment in the Yellow and East China Seas [J]. *China Ocean Engineering*, 2005, 19: 235-250
- 82 Sheu D D, Jou W C, Chung Y C, *et al.* Geochemical and carbon isotopic characterization of particles collected in sediment traps from the East China Sea continental slope and the Okinawa Trough northeast of Taiwan [J]. *Continental Shelf Research*, 1999, 19: 183-203
- 83 Dong L X, Guan W B, Chen Q, *et al.* Sediment transport in the Yellow Sea and East China Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93: 248-258
- 84 Yang Z S, Ji Y J, Bi N S, *et al.* Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93: 173-181
- 85 Watanabe M. Simulation of temperature, salinity and suspended matter distributions induced by the discharge into the East China Sea during the 1998 flood of the Yangtze River [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71: 81-97
- 86 Yuan D L, Zhu J R, Li C Y, *et al.* Cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas indicated by MODIS satellite observations [J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 70: 134-149
- 87 Zhang M W, Tang J W, Dong Q, *et al.* Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 392-403
- 88 Yuan D L, Hsueh Y. Dynamics of the cross-shelf circulation in the Yellow and East China Seas in winter [J]. *Deep-Sea Research II*, 2010, 57: 1745-1761
- 89 Shi W, Wang M H. Satellite observations of the seasonal sediment plume in central East China Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2010, 82: 280-285
- 90 Shi W, Wang M H. Satellite views of the Bohai Sea, Yellow Sea, and East China Sea [J]. *Progress in Oceanography*, 2012, 104: 30-45
- 91 Gao S, Cheng P, Wang Y P *et al.* Characteristics of suspended sediment concentrations over the areas adjacent to the Changjiang River estuary, the summer of 1998 [J]. *Marine Science Bulletin*, 2000, 2(1): 14-24
- 92 Wright L D, Wiseman W J, Bornhold B D, *et al.* Marine dispersal and deposition of Yellow River silts by gravity-driven underflows [J]. *Nature*, 1988, 332: 629-632
- 93 Wright L D, Wiseman W J, Yang Z S, *et al.* Processes of marine dispersal and deposition of suspended silts off the modern mouth of the Huanghe (Yellow River) [J]. *Continental Shelf Research*, 1990, 10: 1-40
- 94 Sternberg R W, Cacchione D A, Paulson B, *et al.* Observations of sediment transport on the Amazon subaqueous delta [J]. *Continental Shelf Research*, 1996, 16: 697-715
- 95 Wright L D, Friedrichs C T. Gravity-driven sediment transport on continental shelves: a status report [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26: 2092-2107
- 96 Liu J T, Lin H L. Sediment dynamics in a submarine canyon: a case of river sea interaction [J]. *Marine Geology*, 2004, 207: 55-81
- 97 Oiwane H, Tonai S, Kiyokawa S, *et al.* Geomorphological development of the Goto Submarine Canyon, northeastern East China Sea

- [J]. *Marine Geology* 2011 ,288: 49-60
- 98 Honda M C , Kusakabe M , Nakabayashi S *et al.* Radiocarbon of sediment trap samples from the Okinawa trough: lateral transport of <sup>14</sup>C-poor sediment from the continental slope [J]. *Marine Chemistry* , 2000 ,68: 231-247
- 99 Hoshika A ,Tanimoto T , Mishima Y , *et al.* Variation of turbidity and particle transport in the bottom layer of the East China Sea [J]. *Deep-Sea Research II* ,2003 ,50: 443-455
- 100 Chung Y C , Hung G W. Particulate fluxes and transports on the slope between the southern East China Sea and the South Okinawa Trough [J]. *Continental Shelf Research* ,2000 ,20: 571-597
- 101 Iseki K , Okamura K , Kiyomoto Y. Seasonality and composition of downward particulate fluxes at the continental shelf and Okinawa Trough in the East China Sea [J]. *Deep-Sea Research II* ,2003 ,50: 457-473
- 102 Li Y H , Wang A J , Qiao L , *et al.* The impact of typhoon Morakot on the modern sedimentary environment of the mud deposition center off the Zhejiang-Fujian coast ,China [J]. *Continental Shelf Research* , 2012 ,37: 92-100
- 103 Bian C W , Jiang W S , Song D H. Terrigenous transportation to the Okinawa Trough and the influence of typhoons on suspended sediment concentration [J]. *Continental Shelf Research* , 2010 ,30: 1189-1199
- 104 Wang Y , Wang H J , Bi N S *et al.* Numerical modeling of hyperpycnal flows in an idealized river mouth [J]. *Estuarine , Coastal and Shelf Science* ,2011 ,93: 228-238
- 105 Yoo D G , Lee C W , Kim S P , *et al.* Late Quaternary transgressive and highstand systems tracts in the northern East China Sea mid-shelf [J]. *Marine Geology* ,2002 ,187: 313-328
- 106 Liu J , Saito Y , Kong X H , *et al.* Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea [J]. *Marine Geology* ,2010 ,278: 54-76
- 107 Bern S , Vagner P , Guichard F , *et al.* Pleistocene forced regressions and tidal sand ridges in the East China Sea [J]. *Marine Geology* , 2002 ,188: 293-315
- 108 Uehara K , Saito Y , Hori K. Paleotidal regime in the Changjiang ( Yangtze ) estuary , the East China Sea , and the Yellow Sea at 6 ka and 10 ka estimated from a numerical model [J]. *Marine Geology* , 2002 ,183 ,179-192
- 109 Uehara K , Saito Y. Late Quaternary evolution of the Yellow/East China Sea tidal regime and its impacts on sediments dispersal and seafloor morphology [J]. *Sedimentary Geology* ,2003 ,162: 25-38
- 110 Zhu Y , Chang R. Preliminary study of the dynamic origin of the distribution pattern of bottom sediments on the continental shelves of the Bohai Sea , Yellow Sea and East China Sea [J]. *Estuarine , Coastal and Shelf Science* ,2000 ,51: 663-680
- 111 Chen Q Q , Zhu Y R. Holocene evolution of bottom sediment distribution on the continental shelves of the Bohai Sea , Yellow Sea and East China Sea [J]. *Sedimentary Geology* ,2012 ,273-274: 58-72
- 112 Hori K , Saito Y , Zhao Q H , *et al.* Sedimentary facies of the tide-dominated paleo-Changjiang ( Yangtze ) estuary during the last transgression [J]. *Marine Geology* ,2001 ,177: 331-351
- 113 Hori K , Saito Y , Zhao H Q , *et al.* Architecture and evolution of the tide-dominated Changjiang ( Yangtze ) River delta , China [J]. *Sedimentary Geology* ,2002 ,146: 249-264
- 114 Xie D F , Wang Z B , Gao S *et al.* Numerical modeling of the formation of tidal channel system in Hangzhou Bay , China [J]. *Continental Shelf Research* ,2009 ,29: 1757-1767
- 115 Yu Q , Wang Y W , Gao S , *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
- 116 Scholl D W. Recent sedimentary record in mangrove swamps and rise in sea level over the southwestern coast of Florida: Part 2 [J]. *Marine Geology* ,1964 2: 343-364
- 117 Xu K H , Li A C , Liu J P , *et al.* Provenance , structure , and formation of the mud wedge along inner continental shelf of the East China Sea: a synthesis of the Yangtze dispersal system [J]. *Marine Geology* ,2012 ,291-294: 176-191
- 118 Zheng Y , Kissel C , Zheng H B , *et al.* Sedimentation on the inner shelf of the East China Sea: magnetic properties , diagenesis and paleoclimate implications [J]. *Marine Geology* ,2010 268: 34-42
- 119 Xu F J , Li A C , Li T G , *et al.* Rare earth element geochemistry in the inner shelf of the East China Sea and its implication to sediment provenances [J]. *Journal of Rare Earths* 2011 ,29: 702-709
- 120 Xiao S B , Li A C , Liu J P , *et al.* Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea [J]. *Palaeogeography , Palaeoclimatology , Palaeoecology* ,2006 ,237: 293-304
- 121 Liu J , Saito Y , Kong X H *et al.* Sedimentary record of environmental evolution off the Yangtze River estuary , East China Sea , during the last 13 000 years , with special reference to the influence of the Yellow River on the Yangtze River delta during the last 600 years [J]. *Quaternary Science Reviews* ,2010 ,29: 2424-2438
- 122 Flemming B W , Davis R A Jr. Holocene evolution , morphodynamics and sedimentology of the Spiekeroog Barrier Island system ( southern North Sea ) [J]. *Senckenbergiana Maritima* ,1994 ,24: 117-155

## Holocene Sedimentary Systems over the Bohai , Yellow and East China Sea Region: Recent Progress in the Study of Process-Product Relationships

GAO Shu

( Ministry of Education Key Laboratory for Coast and Island Development , Nanjing University , Nanjing 210093)

**Abstract:** The shallow marine regions consisting of the Bohai , Yellow and East China Seas represent a typical wide continental shelf environment with abundant terrestrial sediment supply. Here , a variety of sedimentary records have been formed during the Holocene period. The Holocene sedimentary systems developed here have unique characteristics in terms of spatial distribution , material composition , Sedimentation rate and the timing of accumulation , which are related to active sediment transport processes induced by tides , shelf circulations and sediment gravity flow. The sedimentary records thus formed tend to be high resolution slices , i. e. , each record has a resolution of  $< 10^2$  years and covers a part of the Holocene period. In the field of process-product relationship study , the mid-Holocene coastal deposits on the Jiangsu coast , the early to middle Holocene sequences of the Hangzhou Bay , the Holocene mud deposits off the Zhejiang-Fujian coasts and the other mud areas over the region are of importance. These systems may be understood by identifying the material supply ( from both sea bed reworking during the sea level rise event and river discharges) , transport-accumulation processes , the formation of the sediment sequences and the future evolution of the sedimentary systems , for which numerical modeling becomes increasingly important.

**Key words:** sediment transport-accumulation processes; Holocene sediment systems; process-product relationships; sedimentary records; eastern China shelf seas