

DOI:10.3724/SP.J.1140.2011.03001

南黄海江苏岸外潮流沙脊远端沉积与演化

温春^{1,2}, 刘健^{2,3}, 张军强^{1,2}, 仇建东^{1,2}, 刁少波³, 岳保静³, 孙丽莎³, 孔祥淮³

(1 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 国土资源部 海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071;

(3 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要: SYS-0702孔位于南黄海江苏岸外潮流沙脊的远端(水深32 m), 其最顶部18.64 m岩心对应于潮流沙脊沉积。根据对潮流沙脊沉积物的岩性特征、粒度分析、AMS ¹⁴C测年资料和²¹⁰Pb测试分析, 结合通过该孔位的高分辨率浅地层剖面, 揭示了该远端沙脊的沉积特征、形成时间以及老黄河从江苏入海(1128—1855年)对沙脊沉积作用的影响。结果表明, 该远端沙脊形成于约2.5 cal. kaBP至今, 其内部的反射层向东、东北方向倾斜而下超至沙脊的底界面上; 沙脊内部的前积反射层倾角一般<0.2°, 大多呈上凸形态, 与底部的侵蚀界面相切; 远端沙脊总体上显示从下至上逐渐变粗的反粒序, 砂质沉积物中跃移组分达到80%以上, 悬浮组分不到20%, 分选性较好; 在老黄河从苏北入海期间(1128—1855年), 潮流沙脊远端的沉积速率较之前明显增加, 即由0.28~0.77 cm/a增加到1.10 cm/a; 在老黄河1855年再次改道入渤海后, 沙脊远端的沉积速率明显下降, 减少至0.23 cm/a。根据以往的研究, 长江古河口湾和苏北东台为辐射状潮流沙脊顶点的发育时间分别为8和6 kaBP, 至约2.5 cal. kaBP潮流沙脊由这两处向海进积至SYS-0702孔位所在的远端沙脊, 其直线平均进积速率分别为61.7 m/a和65.9 m/a; 自2.5 cal. kaBP以来沙脊远端向离岸方向进积的速率大为降低(约4 m/a), 可能与深水区潮流作用减弱、沉积物供应减少有关。

关键词: 潮流沙脊; 沉积特征; 老黄河; 南黄海

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2011)03-0001-09

潮流沙脊是在潮流主导作用下, 发育在陆架浅海、河口湾及海峡出口处的一种大致与潮流平行的线状沙体, 其发育演化主要受海平面变化、潮流动力和沉积物供应等因素的控制^[1-3]。20世纪70年代以来, 南黄海江苏岸外的潮流沙脊群就引起地学界的广泛兴趣, 众多学者对其物质来源、形成机制和演化模式做了大量的研究工作, 取得了丰硕的成果^[4-10]。但由于缺乏该潮流沙脊群远端的钻孔资料, 对其发展演化过程和进积速率的探讨大多还处于推测阶段^[8]。本文选择位于南黄海江苏岸外潮流沙脊群远端的1个钻孔岩心, 对其揭露潮流沙脊的岩心段进行沉积特征分析和²¹⁰Pb测试, 并结合地震剖面和AMS ¹⁴C测年数据, 研究其沉积年龄和沉积速率, 探讨老黄河(1128—1855年)在苏北入海对其发育的影响, 并初步分析其向海进积的速率。这一研究可获得该潮流沙脊群更为详尽的发育演化信息, 对于深入了解其发育进程具有重要的科学意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40876034); 国土资源部地质调查项目(1212010611401)

作者简介: 温春(1982—), 博士生, 从事海洋沉积学和海洋地球化学研究, E-mail: wenchun_321@163.com

收稿日期: 2011-02-27; **改回日期:** 2011-04-20. **张光威**编辑

1 地质环境

黄海是一个宽阔、相对较浅、地形平缓的边缘海, 位于平坦、构造稳定的大陆架之上(图1)。山东半岛将黄海分为南黄海和北黄海。北黄海的水深一般小于60 m, 南黄海的水深通常小于100 m。南黄海最宽处大约700 km, 水深向着黄海海槽变大, 该海槽在80 m等深线以内, 并且沿着NW—SE向延伸^[11]。

黄海地区的主要环流系统为黄海暖流和沿岸流(图1), 大部分海区为规则的半日潮, 仅山东半岛南岸出现一小块不规则的半日潮。以弶港为顶点发育了辐射状潮流场。江苏岸外潮流沙脊分布区平均潮差较大, 以弶港为中心向南和向北潮差逐渐降低, 从>6 m减少至2~3 m^[10]。在该沙脊群北部海域(射阳口-弶港之间)为强潮区, 垂直平均大潮流速超过1.5 m/s, 主流方向与岸线平行; 弶港以南至如东和长沙镇岸外, 垂直平均大潮流速为1.5 m/s, 主流方向为NWW—SEE, 与潮流通道方向一致^[10]。

黄河和长江输沙是黄海海域沉积物的主要来源。黄河向渤海输沙量的多年平均值大约为1.1×10⁹ t/a^[12], 但近年来已经减少至1.5×10⁸ t/a^[13];

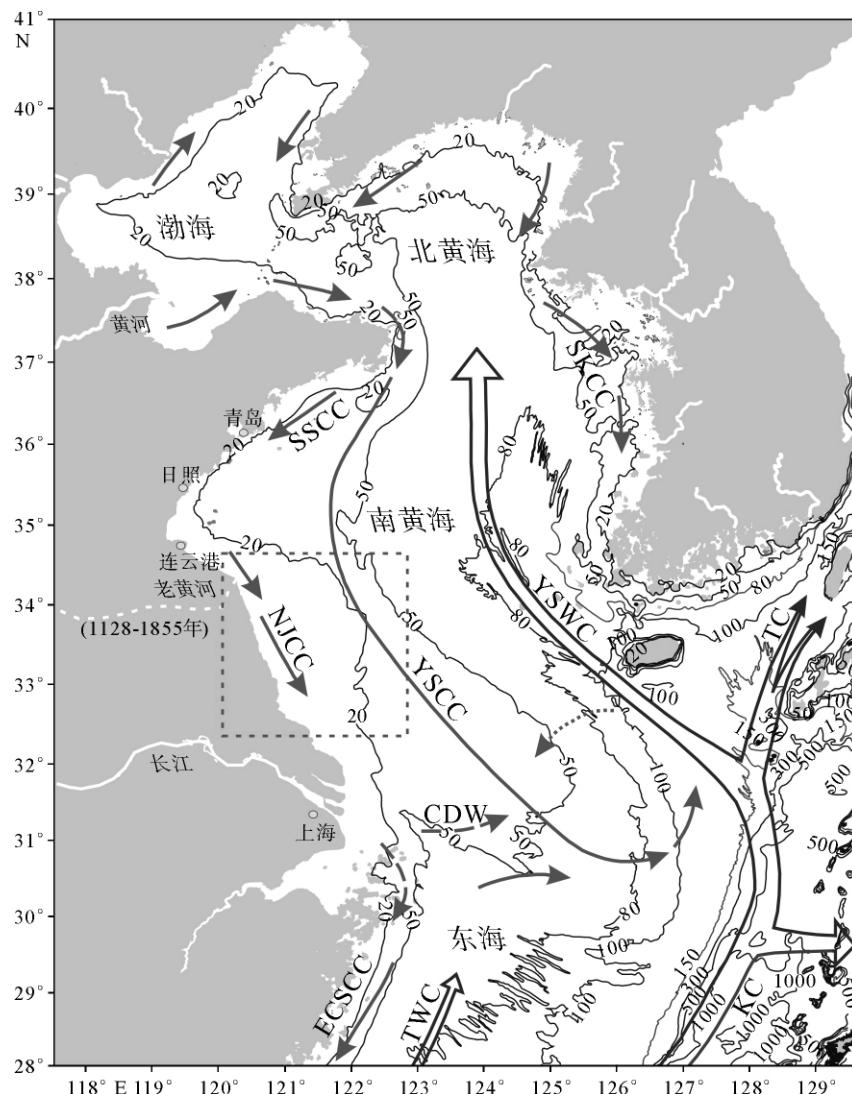


图 1 黄海及其邻区流系(冬季)与水深分布^[18]

(虚线方框指示南黄海江苏岸外潮流沙脊群分布区;水深单位:m;SSCC:山东半岛沿岸流;NJCC:江苏沿岸流;YSCC:黄海沿岸流;ECSCC:东海沿岸流;TWC:台湾暖流;YSWC:黄海暖流;CDW:长江冲淡水)

Fig. 1 Schematic map of the bathymetry and regional circulation pattern in the

Yellow Sea and adjacent areas during wintertime(modified after reference[18])

(Water depth in meters. The dashed square indicates the tidal sand ridge system off the Jiangsu coast.

SSCC: South Shandong Coastal Current; NJCC: North Jiangsu Coastal Current; YSCC: Yellow Sea

Coastal Current; ECSCC: East China Sea Coastal Current; TWC: Taiwan Warm Current;

TC: Tsushima Current; YSWC: Yellow Sea Warm Current; CDW: Changjiang Diluted Water)

长江向黄海西南部和东海北部的输沙量大约为 5×10^8 t/a。韩国河流向黄河东部的输沙量小于 3×10^7 t/a^[11]。1128 年冬宋王朝为阻止金兵南下,人为决河,使黄河由泗水入淮河,注入黄海;1855 年 6 月黄河在河南兰阳铜瓦厢决口,结束了七百多年入黄海的历史,再次入渤海^[14]。在从公元 1128 到 1855 年达 700 多年的时间里,黄河从江苏北部海岸流入南黄海,沿江苏海岸形成了大规模的水下三角洲沉积体(图 2)。

南黄海西部潮流沙脊群位于苏北岸外的老黄河水下三角洲和长江口之间的近岸海区,大部分分布于水深 50 m 以浅的海域,自弶港向外呈辐射状分布,沙脊群东西逾 140 km,南北近 200 km,总面积约 22 470 km²,由 70 多条沙脊和潮流通道组成^[15](图 2),沙脊群有 19 条主干沙脊,沙脊高数米至 20 m 左右,长达几十至近百千米^[10,16-17]。

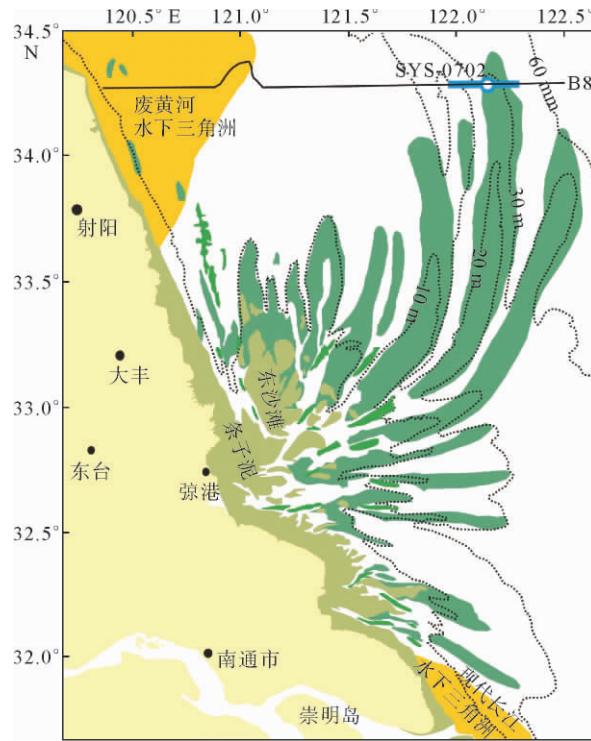


图2 苏北辐射状潮流沙脊地貌及SYS-0702孔和浅地层剖面B8测线的地理位置(据文献[10]修改)

B8测线上的蓝色段指示图3上的浅剖位置;水深单位:m

Fig. 2 Geomorphological map of radial sand ridges in the western South Yellow Sea (modified after reference[10]) with the location of core SYS-0702 and the shallow seismic profile B8

The blue section in the seismic profile B8 denotes the location of seismic profile in Fig. 3. Water depth in meters.

2 材料和方法

全取心钻孔SYS-0702(34°18.0919'N, 122°05.7459'E)位于南黄海西部陆架32 m水深处(图2),岩心长70.25 m。该孔的施工时间为2007年,施工任务由上海海洋石油局第一海洋地质调查大队承担,施工船为“勘407”海洋工程地质综合调查船。该钻孔岩心的采取率较高,其中泥质岩心的采取率超过90%,砂质岩心的采取率超过70%。2006年青岛海洋地质研究所在南黄海西部陆架实测了约4 100 km高分辨率浅地层剖面^[18],SYS-0702孔位于浅地层剖面B8测线的东端(图2)。根据浅地层剖面计算潮流沙脊厚度时,采用1 550 m/s的平均声速穿透速率^[18]。

本文选取SYS-0702孔0~20.5 m岩心段沉积物样品进行粒度测试和²¹⁰Pb测试,测试工作在青岛海洋地质研究所实验检测中心完成。粒度样品的取

样间距为8~10 cm,共取191个样品。²¹⁰Pb样品取自钻孔的辅助柱状样,0~40 cm取样间距为1 cm,共取样40个(实测23个样品),并在同一深度取粒度样品,用来做²¹⁰Pb粒度校正之用。

从粒度分析的原始样品中取样5 g左右,经双氧水和稀盐酸浸泡处理,除掉有机质和碳酸盐,然后洗盐,用六偏磷酸钠溶液经超声波分散后,用英国马尔文(MLVERN)公司生产的Mastersizer-2000型激光粒度分析仪进行粒度测试。该仪器的测量范围为0.02~2 000 μm,偏差<1%,重现性 $\phi 50 < 1\%$ 。

样品的²¹⁰Pb、²²⁶Ra和¹³⁷Cs的分析是利用 γ -谱仪(型号BE3830,美国CANBERRA公司生产)在青岛海洋地质研究所实验室测试的。具体方法是:试样烘干后,研磨成粉末,装入标准的测量器具内,压实并准确称量样品的质量,放入密闭的铅室测量样品中²¹⁰Pb、²²⁶Ra和¹³⁷Cs核素的比活度。过剩²¹⁰Pb放射性比活度(²¹⁰Pb_{ex})是根据样品中总的²¹⁰Pb放射性比活度减去²²⁶Ra的放射性比活度来获得的,并以样品中黏土粒级组分的含量来对²¹⁰Pb_{ex}进行粒度校正,以消除粒度对²¹⁰Pb_{ex}的影响^[19]。

SYS-0702孔0~20.5 m岩心段的AMS¹⁴C测年结果来自文献[18](表1),测年材料是螺和牡蛎壳。日历年是惯用年龄经过CALIB5.0.1^[20]校正所得,都是从公元1950年向前起算的,以cal. kaBP表示。

表1 南黄海SYS-0702孔顶部20 m岩心段

AMS¹⁴C测年数据(据文献[18])

Table 1 List of AMS¹⁴C ages from the uppermost 20 m of core SYS-0702 (from reference[18])

测年方法	测年深度/m	日历年/cal. kaBP
AMS ¹⁴ C	11.35	990(927~1 042)
AMS ¹⁴ C	16.20	1 621(1 550~1 686)
AMS ¹⁴ C	18.64	2 489(2 365~2 568)

3 结果

3.1 潮流沙脊地震反射特征

浅地层剖面B8测线的东端揭示了江苏岸外潮流沙脊群远端的沙脊(图3)。在浅地层剖面(位置见图2)上,潮流沙脊显示明显起伏的脊和谷,其内部的反射层向东、东北方向倾斜而下超至沙脊的底界面上,指示了沙体长期的净运移方向^[2,21]。沙脊内部的前积反射层倾角一般<0.2°,大多呈上凸形

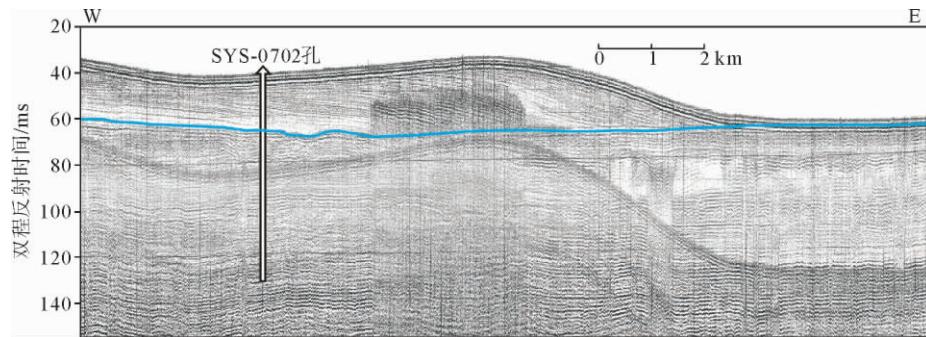


图3 通过南黄海SYS-0702孔的浅地层剖面(据文献[18]改动)

蓝线标明潮流沙脊的底界面

Fig. 3 Part of the west-east seismic profile passing through cores SYS-0702 (modified after reference[18])

The blue line indicates the basal boundary of the tidal sand ridges

态,即反射层上部的倾角较缓而其下部的倾角较陡,与底部的侵蚀界面相切。在沙脊群的远端,沙脊厚度一般10~20 m,向海逐渐尖灭。

3.2 岩性与粒度特征

SYS-0702孔0~18.64 m岩心段对应于潮流沙脊沉积(图4a),与下伏岩心段呈明显接触。本段岩心总体上显示粒度从下至上逐渐变粗的倒粒序,根据岩性特征可分为上下两个部分。下部(18.64~4.5 m)主要是灰-深灰色黏土质粉砂夹粉砂-细砂透镜体、线理或条带(<5 mm),或黏土质粉砂与粉砂-细砂薄互层,偶夹粉砂-细砂薄层,向上渐变为深灰绿色粉砂-细砂夹黏土质粉砂线理条带(<5 mm);上部(0~4.50 m)为粉砂-细砂,见交错层理。潮汐层理发育,含少量牡蛎碎片、贝壳碎片及小螺(长几个毫米),偶见泥砾,局部生物扰动较强。底栖有孔虫和介形虫组合以滨岸-陆架种为主,如 *Ammonia ketienensis* (Ishizaki), *Ammonia compressiuscula* (Brady), *Astrononion tasmanensis* Carter, *Epistominella naraensis* (Kuwano)等^[18]。

从粒度组分上来看,沉积物组成以粉砂为主,其次是砂,黏土含量最低,平均含量分别为60.73%、29.20%、10.07%,沉积物颗粒较细,平均粒径为5.12 ϕ ,变化范围为4.22~6.43 ϕ ,波动较小(图4c);从18.64 m处岩心底部到顶部砂的含量逐渐增多,粉砂和黏土的含量变化较小(图4b)。

在潮流沙脊砂质沉积物样品的概率累积曲线(图5a)中,跃移组分达到80%以上,悬浮组分不到20%,滚动组分缺失,与典型的潮流沙脊砂沉积物的特征一致^[10];样品的频率曲线(图5b)表明,频率曲线主峰明显,远高于其两侧的峰值,表明沉积物的分选性较好。

3.3 沉积速率

根据SYS-0702岩心上部18.64 m不同层位的AMS ^{14}C 测年数据^[18](图4d),忽略沉积物压实作用的影响,我们可以推算出潮流沙脊形成以来不同时段的沉积速率(图5)。老黄河从苏北入海的时间为1128—1855年,即在822 cal. aBP黄河改道苏北入海,开始为南黄海提供大量的沉积物^[14]。SYS-0702孔11.35 m处测年数据为990 cal. aBP,与老黄河从南黄海入海的时间非常接近,由此点将岩心大致分为两段:18.64~11.35 m段,沉积速率为0.28~0.77 cm/a(图4),平均沉积速率约为0.49 cm/a,此段沉积于老黄河从苏北入海前;11.35~0 m段,沉积厚度为11.35 m,沉积时间为1 050 a(从1950年往后约60年),平均沉积速率为1.10 cm/a,此段基本属于老黄河由南黄海入海(1128年)直至目前这段时间内的沉积物。

SYS-0702岩心上部0~40 cm的沉积物中, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的变化可划分为2段:最顶部0~18 cm段为表层混合层(SML),无明显变化趋向,代表了生物扰动作用产生的效果^[19,22];18~40 cm段 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 向下呈对数下降的趋势,沉积速率为0.23 cm/a。此段主要为1855年后黄河从南黄海再次改道,进入渤海之后约150年以来的沉积物。

4 讨论

4.1 黄河改道事件对潮流沙脊远端沉积作用的影响

江苏岸外潮流沙脊为典型的活动沙脊,研究表明活动沙脊一般发育于内陆架浅海环境,最大水深约为50~60 m^[10]。研究区的浅地层剖面和SYS-0702

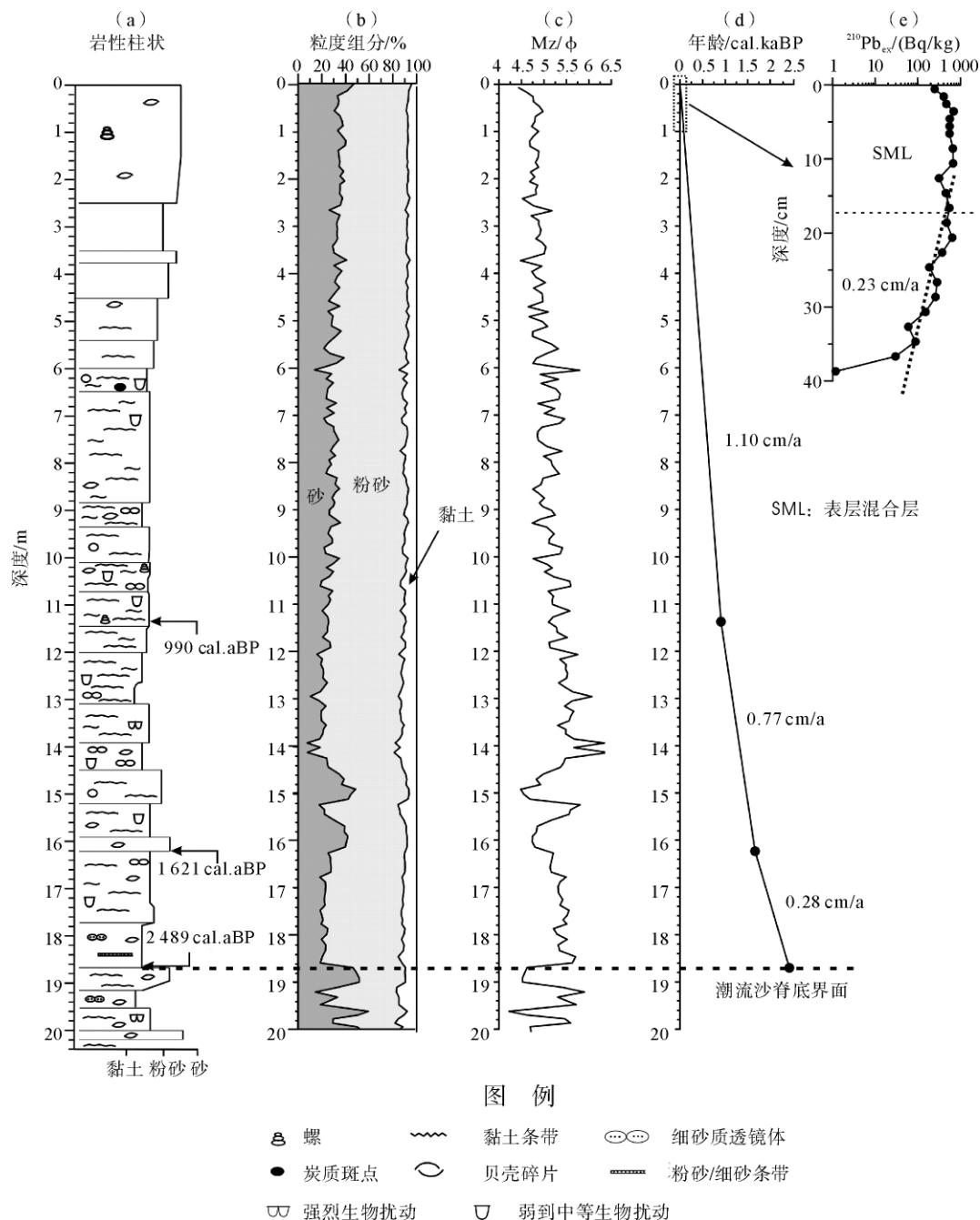


图4 南黄海SYS-0702孔0~20 m岩性柱状(a)、粒度组分(b)、平均粒径(c)、年龄-孔深剖面(d)和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度沿孔深的分布(e)

Fig. 4 The lithological column (a), grain-size components (b), mean grain size (c), age-depth profile (d), and excess ^{210}Pb activity-depth profile (e) of the uppermost 20 m of core SYS-0702

孔岩性资料都表明,该孔0~18.64 m岩心沉积物记录了潮流沙脊的进积活动。该孔位于水深32 m处,如果忽略沉积物的压实作用,那么,在钻孔位置潮流沙脊开始发育时的水深约为50 m,水深条件是适合潮流沙脊发育的。

虽然地学界对南黄海江苏岸外潮流沙脊的成因、形成时间和物源的看法尚有争议^[5-6,9,23],但都基

本认定以下观点:全新世早期或中期是沙脊群初始形成的时间,辐聚辐散的潮流场是沙脊群形成的必要条件,黄河和/或长江/或淮河来源的沉积物是沙脊群的主要物源。重矿物的分析表明,弶港辐射沙脊地区的北半部以黄河源沉积物为主,南半部以长江源为主,正对弶港的滨外地区则是长江源和黄河源河流沉积物的混合分布区^[8]。SYS-0702孔位于

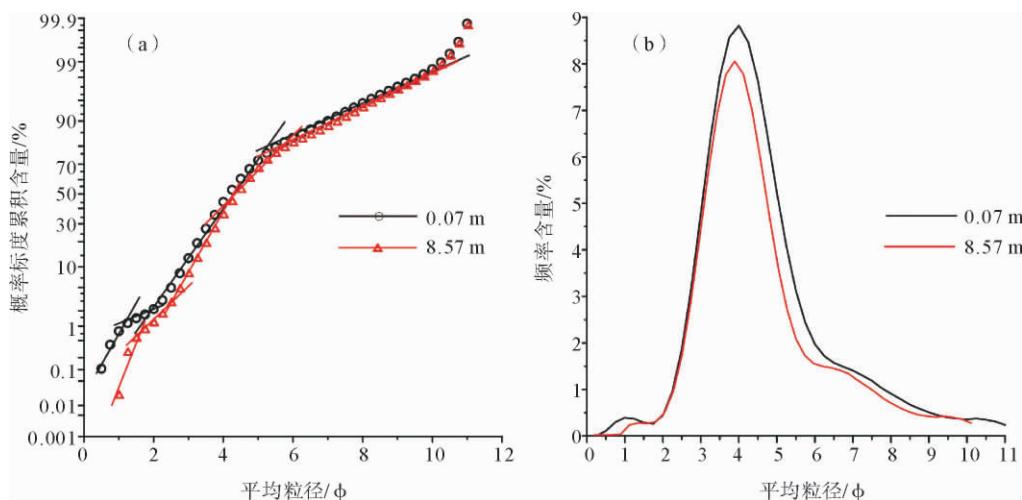


图 5 南黄海 SYS-0702 孔潮流沙脊沉积物典型粒度概率累积曲线(a)和频率曲线(b)

Fig. 5 Probability accumulative curves (a) and Grain-size frequency cures (b) of representative samples from the tidal sand-ridge deposits in core SYS-0702

潮流沙脊群的北部,其沉积物物源以黄河源为主,长江物质对此地影响很小。如前文所述, SYS-0702 孔所揭示的潮流沙脊沉积物的平均沉积速率从下至上变化明显,从 0.49 cm/a ($18.64 \sim 11.35 \text{ m}$) 变为 1.10 cm/a ($11.35 \sim 0 \text{ m}$), 最顶部为 0.23 cm/a ($0.40 \sim 0 \text{ m}$) (图 4), 其中 11.35 m 以上主要为 $1128 \sim 1855$ 年在黄河由苏北入海之后沉积的地层。很明显,黄河从苏北入海之后沙脊群远端的沉积速率显著升高,平均沉积速率为之前的两倍还要多,这表明老黄河于 $1128 \sim 1855$ 年在苏北海岸的入海深刻地影响了潮流沙脊的沉积过程。据史料记载,老黄河于 1128 年在苏北海岸进入南黄海,由于巨量沉积物的输入, $1128 \sim 1494$ 年期间老黄河口向海延伸速率为 41 m/a , $1495 \sim 1855$ 年期间河口延伸速率为 208 m/a ^[24-26]。沉积物在苏北沿岸快速堆积,为潮流沙脊发育提供了巨量的沉积物,潮流沙脊末端沉积速率受黄河入海的影响迅速升高,这与之前讨论的潮流沙脊北部沉积物主要来自于黄河相吻合。

SYS-0702 孔最顶部 40 cm 沉积物的沉积速率约为 0.23 cm/a , 基本代表了潮流沙脊远端自老黄河 1855 年北上入渤海之后 150 年来的沉积速率,该值远小于黄河在苏北入海期间的沉积速率,也小于黄河于 1128 年从苏北入海之前的沉积速率。老黄河北上入渤海之后,整个南黄海地区输沙量骤减;同时由于黄河的影响,淮河河道淤塞,改由洪泽湖转长江入海^[27], 淮河对南黄海的输沙也中断。有的研究认为,淮河对建造江苏岸外沙脊群物质的贡献与黄河、长江有着同样的重要性^[10]。因此, 1855 年黄河北徙之后,尽管废弃的苏北老黄河三角洲因海洋侵

蚀作用仍能向黄海提供大量泥沙^[10], 沙脊群远端的沉积速率还是较老黄河于 1128 年由苏北入海之前降低了。

4.2 潮流沙脊向海进积速率

全新世最大海侵以来,南黄海西部海岸带辐聚辐散的潮流场的位置曾经历 3 次变化,第 1 次以长江古河口湾为顶点 ($7 \sim 8 \text{ kaBP}$), 第 2 次位于现今陆上潮成砂区,以东台为顶点 ($5 \sim 6 \text{ kaBP}$), 第 3 次位于以弶港为顶点的现代海域 ($1 \sim 2 \text{ kaBP}$)^[9,28]。关于辐射潮流沙脊的形成有两种观点:一种认为不论供沙方式如何,都将是辐射状潮流场形成辐射状沙脊,沙脊规模与物源供应相关,潮成辐射沙脊体系与辐聚辐散的潮流场相伴而生^[7];因此, 8 kaBP 时,辐聚辐散的潮流场已经形成,开始发育潮流沙脊体系^[7,28]。另一种认为, $5 \sim 6 \text{ kaBP}$ 长江古河口湾被充填,长江带来的泥沙有可能冲出河口,进入河口以南和以北的海岸地区,才具备形成苏北陆上辐射状潮成沙脊体的条件,开始了潮流沉积体系的发育^[9,28]。根据以上两种观点,我们将以长江古河口湾和东台为辐射状潮流沙脊顶点的发育时间分别定为 8 kaBP 和 6 kaBP 。我们的研究表明,约 2.5 cal. kaBP 潮流沙脊的前缘已经进积到 SYS-0702 孔的位置。SYS-0702 孔与长江古河口湾和东台的距离分别为 339.3 和 230.7 km , 在 8 或 6 kaBP 至 2.5 cal. kaBP 时段内,潮流沙脊由这两处向海进积至 SYS-0702 孔位置,其进积速率为 61.7 和 65.9 m/a 。由于潮流场和潮流沙脊处于动态平衡状态,潮流沙脊向海进积也不是直线的,在潮流沙脊的演

化过程中还伴随着侵蚀沉积改造;同时,由于黄河的改道导致南黄海沉积物输入量的不同,潮流沙脊的进积速率也会有很大的不同。因此,我们计算的沙脊进积速率代表平均直线进积速率。根据两个顶点计算出的进积速率比较接近,表明8~6 kaBP这段时间内潮流沙脊的发展演化比较稳定,可能与该地区物源供应比较稳定有关。

然而,自2.5 cal. kaBP以来,潮流沙脊沿辐射状潮道方向向海进积的距离约10 km(图2),进积速率4 m/a,远小于沙脊自发育伊始从近岸向海进积的速率。这可能与沙脊远端水深较大(>30 m)而导致潮流作用减弱有关,也与深水区沉积物的供给减少有关;推测同期沙脊的迁移更多地发生在近岸浅水海区,并且沙脊沿平行岸线方向的移动可能要大于离岸方向。由于辐射潮流沙脊演化过程与冰消期以来的海面变化、岸线变迁、河流入海口变化、流场变化以及原始沉积的特征都密切相关^[10],对江苏岸外潮流沙脊演化过程的详尽了解还需要对其进行更深入的调查与研究。

5 结论

(1)南黄海陆架高分辨率浅地层剖面和SYS-0702孔0~18.64 m岩心沉积物记录了江苏岸外潮流沙脊群的远端沙脊,形成于2.5 cal. kaBP至今。该远端沙脊显示明显起伏的脊和谷,沙脊厚度一般10~20 m,向海方向逐渐尖灭,其内部的反射层向东、东北方向倾斜而下超至沙脊的底界面上。沙脊内部的前积反射层倾角一般<0.2°,大多呈上凸形态,与底部的侵蚀界面相切。远端沙脊总体上显示从下至上逐渐变粗的倒粒序,砂质沉积物中跃移组分达到80%以上,悬浮组分不到20%,分选性较好。

(2)在老黄河从苏北入海期间(1128—1855),潮流沙脊远端的沉积速率较之前明显增加,即由0.28~0.77 cm/a增加到1.10 cm/a。在老黄河于1855年再次改道入渤海后,沙脊远端沉积速率明显下降,减少至0.23 cm/a。

(3)根据以往的研究,长江古河口湾和苏北东台辐射状潮流沙脊顶点的发育时间为8 kaBP和6 kaBP,至2.5 cal. kaBP潮流沙脊由这两处向海进积至SYS-0702孔位所在的远端沙脊,其直线平均进积速率分别为61.7和65.9 m/a。2.5 cal. kaBP以来沙脊远端进一步向离岸方向进积的速率大为降低(4 m/a),可能与深水区潮流作用减弱、沉积物供应减少有关。

参考文献(References)

- [1] 杨子赓,王圣洁,张光威,等.冰消期海侵进程中南黄海潮流沙脊的演化模式[J].海洋地质与第四纪地质,2001,21(3):1-10. [YANG Zigeng, WANG Shengjie, ZHANG Guangwei, et al. Evolution model for South Yellow Sea tidal sand ridges during transgression in deglaciation[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2001, 21(3):1-10.]
- [2] Serge Berné, Pierre Vagner, François Guichard, et al. Pleistocene forced regressions and tidal sand ridges in the East China Sea[J]. Marine Geology, 2002, 188:293-315.
- [3] 刘振夏,余华,熊应乾,等.东海和凯尔特海潮流沙脊的对比研究[J].海洋科学进展,2005,23(1):35-42. [LIU Zhenxia, YU Hua, XIONG Yingqian, et al. A comparative study on tidal sand ridges in the East China Sea and Celtic Sea[J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(1):35-42.]
- [4] Li C X, Wang L, Li P. Preliminary study of the facies distribution in the Changjiang delta[J]. Journal of Tongji University, 1979, 3:1-14.
- [5] Liu Z X, Huang Y C, Zhang Q N. Tidal sand ridges in the southeastern Yellow Sea[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1989, 59(3):432-437.
- [6] 王颖,朱大奎,周旅复,等.南黄海辐射沙脊群沉积特点及其演变[J].中国科学D辑,1998,28(5):385-393. [WANG Yin, ZHU Dakui, ZHOU Lvfu, et al. The characteristics and evolves of tidal sand ridges in South Yellow Sea[J]. Science In China (Series D), 1998, 28(5):385-393.]
- [7] 朱玉荣.南黄海辐射状沙脊成因研究的新进展[J].海洋地质与第四纪地质,1998,18(3):113-118. [ZHU Yurong. New development of studies on origin of radiating sand ridges in the South Yellow Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 1998, 18(3):113-118.]
- [8] 张家强,李从先,丛友滋.苏北陆区古潮成沙体沉积动力环境及物源[J].海洋学报,1998,20(3):82-90. [ZHANG Jiaqiang, LI Congxian, CONG Youzi. Hydrodynamic environment and source of the old tidal sand body in the coastal plain of the northern Jiangsu[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20(3):82-90.]
- [9] Li C X, Zhang J Q, Fan D D. Holocene regression and the tidal radial sand ridge system formation in the Jiangsu coastal zone, east China[J]. Marine Geology, 2001, 173: 97-120.
- [10] 刘振夏,夏东兴.中国近海潮流沉积沙体[M].北京:海洋出版社,2004. [LIU Zhenxia, XIA Dongxing. Tidal Sands in the China Seas[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004.]
- [11] 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉,等.黄海地质[M].北京:海洋出版社,1989. [QIN Yunshan, ZHAO Yiyang, CHEN Lirong, et al. Geology of the Yellow Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1989.]
- [12] Milliman J D, Meade R H. Worldwide delivery of river sediment to the oceans[J]. Journal of Geology, 1983, 91:1-21.
- [13] Houjie Wang, Zuosheng Yang, Yoshiki Saito, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load

- (1950-2005): Impacts of climate change and human activities [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 57: 331-354.
- [14] 邹逸麟, 谭其骧, 史念海. 历史时期的水系变迁, 黄河[C]//中国自然地理:历史自然地理. 北京: 科学出版社, 1982: 38-86. [ZHOU Yilin, TAN Qixiang, SHI Nianhai. Changes of river system in China history, Yellow River[C]//Physical Geography of China: Historical Physical Geography. Beijing: Science Press, 1982: 38-86.]
- [15] 王颖. 黄海陆架辐射沙脊群[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 229-374. [WANG Ying. The Continental Shelf Radiated Sand Ridges of the Yellow Sea[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 229-374.]
- [16] 朱大奎, 安芷生. 江苏岸外辐射沙洲的形成和演变[C]//任美锷教授八十华诞地理论文集. 南京: 南京大学出版社, 1993: 142-147. [ZHU Dakui, AN Zhisheng. Study on Formation and Evolution of Jiangsu Offshore Radial Sandy Ridge[C]//Collected Geographic Work for Professor Ren Meie 80-year Anniversary Celebration. Nanjing: Nanjing University Press, 1993: 142-147.]
- [17] 李海宇, 王颖. GIS 与遥感支持下的南黄海辐射沙脊群现代演变趋势分析[J]. *海洋科学*, 2002, 26(9): 61-65. [LI Haiyu, WANG Ying. Change detection and trend analysis of the present evolution in submarine sand ridges of south Yellow Sea supported by GIS & remote sensing[J]. *Marine Sciences*, 2002, 26(9): 61-65.]
- [18] Jian Liu, Yoshiki Saito, Xianghuai Kong, 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.
- [19] Palinkas C M, Nittrouer C A, Walsh I P. Inner-Shelf Sedimentation in the Gulf of Papua New Guinea: A Mud-Rich Shallow Shelf Setting[J]. *Journal of Coastal Research*, 2006, 22(4): 760-772.
- [20] Stuiver M, Reimer P J, Reimer R W. CALIB 5.0.1. 2005. (<http://calib.qub.ac.uk/>).
- [21] 印萍. 东海陆架冰后期潮流沙脊地貌与内部结构特征[J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(2): 181-187. [YIN Ping. Geomorphology and internal structure of postglacial tidal sand ridges on the East China Sea shelf[J]. *Advance in Marine Science*, 2003, 21(2): 181-187.]
- [22] Antonio Cattaneo, Annamaria Correggiari, Leonardo Langone, et al. The late-Holocene Gargano subaqueous delta, Adriatic shelf: Sediment pathways and supply fluctuations [J]. *Marine Geology*, 2003, 193(1-2): 61-91.
- [23] 王建, 阎国年, 林晖, 等. 江苏岸外潮流沙脊群形成的过程与机制[J]. *南京师大学报: 自然科学版*, 1998, 21(3): 95-108. [WANG Jian, LU Guonian, LIN Hui, et al. Developing process and mechanism of tidal sand ridges off the coast of Jiangsu province[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science)*, 1998, 21(3): 95-108.]
- [24] 张忍顺. 苏北黄河三角洲及滨海平原的成陆过程[J]. *地理学报*, 1984, 39(2): 173-184. [ZHANG Renshun. Land-forming history of the Huanghe River delta and coastal plain of north Jiangsu[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1984, 39(2): 173-184.]
- [25] 叶青超. 试论苏北废黄河三角洲的发育[J]. *地理学报*, 1986, 41(2): 112-123. [YE Qingchao. On the development of the abandoned Yellow River delta in northern Jiangsu province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1986, 41(2): 112-123.]
- [26] 李元芳. 废黄河三角洲的演变[J]. *地理研究*, 1991, 10(4): 29-38. [LI Yuanfang. The evolution of the old Yellow River delta[J]. *Geographical Research*, 1991, 10(4): 29-38.]
- [27] 水利部淮河水利委员会《淮河志》编纂委员会. 淮河志第一卷·淮河大事记[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 74-75. [Editorial Board on Records of Huaihe River, Huaihe River of Ministry of Water Resources ed. *Records of Huaihe River (Vol. 1), History of Huaihe River*[M]. Beijing: Science Press, 1997: 74-75.]
- [28] 赵娟, 范代读, 李从先. 苏北海岸带潮流成辐射砂脊群的形成及其古地理意义[J]. *古地理学报*, 2004, 6(1): 41-48. [ZHAO Juan, FAN Daidu, LI Congxian. Formation of radial tidal sand ridge system and its palaeogeographical significance in coastal zone of northern Jiangsu Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(1): 41-48.]

SEDIMENTARY CHARACTERISTICS AND EVOLUTIONARY HISTORY OF THE DISTAL PART OF THE TIDAL SAND RIDGES IN THE SOUTH YELLOW SEA, OFF THE JIANGSU COAST

WEN Chun^{1,2}, LIU Jian^{2,3}, ZHANG Junqiang^{1,2}, QIU Jiandong^{1,2},
DIAO Shaobo³, YUE Baojing³, SUN Lisha³, KONG Xianghuai³

(1 College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environment Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China;

3 Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Abstract: The core SYS-0702 was recovered in the distal part of the tidal sand ridges in the South Yellow Sea, off the Jiangsu coast at a water depth of 32 m, and the uppermost 18.64 m of the core corresponds to the distal deposits of the sand ridges. Based on lithologic features, grain-size distribution pattern, AMS¹⁴C dating data and ²¹⁰Pb data of the core sediments, in combination with the high-resolution shallow seismic profile passing through the core site, this paper reveals the sedimentary characteristics of the distal sand ridges, formation time, and the influence of the old Yellow River on the sedimentation of the sand ridges when the river discharged into the South Yellow Sea from the Jiangsu coast during 1128 to 1855. The research results show that the distal sand ridges have been keeping active since about 2.5 cal. kaBP, and their internal reflections dip to the east and northeast downlapping onto the basal boundary of the sand ridges. The dip angles of the internal foresets are generally less than 0.2°, mostly convex in shape and tangent to the erosive surface of the sand ridges. The core section of the distal sand ridges roughly coarsens upward, and in the sandy sediments the saltation load is higher than 80% and the suspension load less than 20%, with a good sorting. During 1128—1855 when the old Yellow River entered the South Yellow Sea from the Jiangsu coast, sedimentation rates in the distal sand ridges increased significantly, from 0.28 ~ 0.77 cm/a before the river shifting up to 1.10 cm/a during the event. But the rate decreased to 0.23 cm/a after the old Yellow River going back to the Bohai sea in 1855. According to previous researches, the paleo-Yangtze river estuary and Dongtai were supposed to be the vertex of the radial tidal sand ridges in about 8 kaBP and 6 kaBP, respectively. The progradation of the sand ridges to the core site from the paleo-estuary during 8 ~ 2.5 kaBP and from Dongtai during 6 ~ 2.5 kaBP are about 61.7 m/a and 65.9 m/a, respectively. The progradation further towards the sea from the distal ridge, however, has reduced to about 4 m/a since about 2.5 cal. kaBP, which is considered to be caused by weakened tidal action and declined sediment supply in the deeper water.

Key words: south Yellow Sea; tidal sand ridges; sedimentary characteristics; old Yellow River