

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019051401

黄河口水下三角洲刁口叶瓣的核素分布与沉积特征

宋莎莎^{1,2}, 孙永福^{2,3}, 宋玉鹏², 杜星², 董振芳²

1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

2. 自然资源部第一海洋研究所, 青岛 266061;

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266061

摘要: 于黄河水下三角洲刁口叶瓣东侧获取柱状样 K2, 对其进行¹³⁷Cs 活度分析, 发现活度剖面在 2.7 和 1.9 m 处分别存在一个最大蓄积峰和次级蓄积峰, 根据¹³⁷Cs 的大气沉降规律并结合沉积物粒度数据与黄河输沙量, 确定其最大蓄积峰对应于 1964 年, 次级蓄积峰对应于 1967 年。柱状样的粒度组分以深度 2.1 m 为界可明显划分为两段, 下段沉积物粒度组分稳定, 上段砂粒含量明显增大并在 1.9 m 处达最大值。对柱状样²¹⁰Pb_{ex} 的活度剖面分析表明, 其呈现两段式分布: 1.9~3.5 m 为衰变层, 0~1.9 m 为混合层。分析结果表明¹³⁷Cs 活度剖面的蓄积峰、沉积物粒度组分的改变以及²¹⁰Pb_{ex} 活度的两段式分布均记录了黄河入海口的变迁, 并与黄河入海泥沙量存在对应关系。本文统计了研究区 1958—2014 年的历史水深资料, 分析得出钻孔所处海域在 1964—1976 年 (刁口流路行河期) 的淤积厚度远大于 1976—2014 年 (清水沟流路行河期) 的侵蚀厚度, 因此柱状样 K2 的¹³⁷Cs 活度剖面的 1964 年最大蓄积峰与²¹⁰Pb_{ex} 活度衰变层得以存在。

关键词: ¹³⁷Cs 活度; 粒度; ²¹⁰Pb_{ex}; 河口变迁; 黄河水下三角洲

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

Nuclides distribution and sedimentary characteristics of the Diaokou course in Yellow River subaqueous delta

SONG Shasha^{1,2}, SUN Yongfu^{2,3}, SONG Yupeng², DU Xing², DONG Zhenfang²

1. School of geography and Marine science, NanJing University, NanJing 210023, China

2. The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China

3. Laboratory for Marine Geology and Environment, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China

Abstract: The columnar sample K2 was obtained from the east side of the Diaokou course of the Yellow River subaqueous delta. By ¹³⁷Cs activity measurement, it is found that there is a maximum accumulation peak at 2.7 m and a secondary accumulation peak at 1.9 m from the top respectively. After analyzing the atmospheric sedimentation rate of ¹³⁷Cs, the grain size of sediments and the sediment load of the Yellow River, we infer that the maximum accumulation peak corresponds to the year of 1964, and the secondary accumulation peak to the year of 1967. According to the grain-size distribution, the K2 can be subdivided into two sections above and below the boundary of 2.1 m. the grain-size component of the lower section is rather stable, while the sand content in the upper section keeps increasing and reaches the maximum at 1.9 m. The ²¹⁰Pb_{ex} activity profile exhibits a two-stage distribution pattern as well, 1.9m~3.5m is the decay layer, 0~1.9 m is the mixed layer. The accumulation peak of ¹³⁷Cs activity profile, the change of sediment grain size components and the two-stage distribution of ²¹⁰Pb_{ex} activity all record the mouth migration of the Yellow River. The sediment discharge of the Yellow River also plays an important role in the distribution of nuclides and sediment grain size. Based on the historical bathymetric data of the study area collected from 1958 to 2014, we could conclude that the deposited thickness of research area during the period from 1964 to 1976 (Diaokou River Passage) is much larger than the eroded thickness from 1976 to 2014 (Qingshuigou River Passage).

Key words: ¹³⁷Cs; grain-size; ²¹⁰Pb; mouth migration; the Yellow River subaqueous delta

河口水下三角洲是由河流携带的沉积物堆积形成的水下地质体, 是流域物质沉积和侵蚀的重要

载体, 它记录了流域环境的演变历史, 包括自然变化过程和人类活动的影响痕迹^[1], 因此对其研究具

资助项目: 国家重点研发计划“水合物井场地层变形多场耦合计算及稳定性评价”(2017YFC), 国家重点研发计划“装置海试与应用”(2018YFC0309204)

作者简介: 宋莎莎(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事同位素地球化学及年代学方面的研究, E-mail: songsasa@fio.org.cn

通讯作者: 孙永福(1964—), 男, 研究员, 博士, 主要从事海洋工程地质方面的研究, E-mail: sunyongfu@fio.org.cn

收稿日期: 2019-05-14; 改回日期: 2019-11-12. 文凤英编辑

有重要意义。水下三角洲的发育受到入海水沙和海洋动力作用的双重制约,前者使岸线向海延伸、三角洲处于建设阶段,后者使岸线向陆蚀退、三角洲处于衰减阶段^[2]。黄河是著名的高含沙河流,中下游以善淤、善决、善徙为特点,自1855年改道入渤海以来,在莱州湾与渤海湾交界处形成沉积厚度约15 m的现代黄河水下三角洲,它是含沙量高的单向淡水流与潮汐、波浪、环流多向咸水流相互作用组成的一个复杂动力系统^[3]。

部分学者曾利用实测水深地形资料对黄河废弃水下三角洲进行冲淤演变的研究^[4-8],发现黄河水下三角洲的冲淤演变主要集中在新老河口周围:1968—1976年刁口河口区域形成3个淤积中心且最大淤积厚度都在10 m左右,1976—1996年此区域形成3个侵蚀中心且平均年侵蚀深度在0.4 m左右;研究也表明黄河口改道后,老河口在水深15 m以浅海域冲刷作用最为强烈,水深15 m以深海域冲刷作用较为缓和。可靠的年代数据是研究沉积物环境演变的基础,人工放射性核素¹³⁷Cs(半衰期30.2a)与自然放射性核素²¹⁰Pb(半衰期22.7a)作为百年尺度的测年方法被广泛运用于沉积物的定年与沉积速率的计算^[9-10]。为了探讨黄河水下三角洲沉积环境的变化以及发育演变的规律,前人利用¹³⁷Cs与²¹⁰Pb的研究主要集中在沉积环境和特征方面的变化。李凤业对黄河水下三角洲4个柱状样的²¹⁰Pb的分析表明,其受到海洋动力及河道变迁的制约出现混合区—衰变区—本底区的多阶段分布,且沉积速率最低为1.29 cm/a,最高为14.52 cm/a^[11]。成国栋根据黄河三角洲东部钻孔岩芯的²¹⁰Pb垂直剖面发现,泥沙的再沉积作用是普遍的,且对²¹⁰Pb起到了稀释作用^[12]。李建芬等研究了渤海湾西岸的²¹⁰Pb和¹³⁷Cs的测年情况,发现该地区现代沉积速率从东向西依次为1~3、0.35和0.1 cm/a,并划分出了3个相应的现代沉积亚区:开放高潮坪亚区、近端盐沼亚区和远端盐沼亚区^[13]。任寒寒对清水沟叶瓣的两个柱状样的沉积物粒度和²¹⁰Pb活度分布进行分析发现,沉积物粒度组成的突变记录了黄河入海口的变迁以及²¹⁰Pb活度呈现多阶段和倒置式分布^[14]。已有的工作对黄河水下三角洲沉积环境的演变、沉积特征和沉积速率的研究均做出了重要贡献^[15-18],但是在其他因素如黄河入海水沙、海洋动力的变化以及地形演变的综合研究较少涉足。研究表明黄河水下三角洲的¹³⁷Cs与²¹⁰Pb活度可能呈现非理想型分布,利用其进行定年与沉积速率的计算也存在诸多不确定性,因此在研究方法与

内容上可能稍显单薄。

黄河多次改道,河口海岸地区水动力作用复杂,部分地区沉积环境极不稳定,其中刁口流路水下三角洲作为现代黄河三角洲最后一个废弃叶瓣,发育年代距今不过半个世纪,整个沉积与侵蚀的过程记录也相对完整,为研究三角洲叶瓣演变规律提供了很好的研究素材,具有极高的研究价值。本文通过分析黄河入海口的变迁与入海水沙量的变化探究黄河水下三角洲¹³⁷Cs和²¹⁰Pb的分布规律及其影响因素,而后将其与沉积物粒度数据和历史水深数据资料相结合,分别从正演与反演的角度分析刁口叶瓣沉积环境的演变,最后综合考虑黄河口变迁在沉积物粒度和核素活度分布上的表现,并探究三者的对应关系。希望本文的研究成果能够为黄河水下三角洲及类似于本文研究区的河口海岸等地提供核素分布以及沉积特征的理论基础。

1 样品采集与分析

1.1 样品采集

本文研究区位于黄河三角洲侧缘沉积区,处于最新废弃的黄河口水下三角洲刁口叶瓣东侧(图1)。沉积物柱状样K2(38.2°N、118.9°E)于2014年使用重力取样设备取自黄河口水下三角洲刁口叶瓣,取样处水深约为10 m(2014年实测水深),柱状样长3.5 m,具体采样站位信息如图1所示。柱状样采集后进行密封,并在垂直状态下运输和保存。室内对沉积物柱状样以等10 cm间隔分样后,进行粒度实

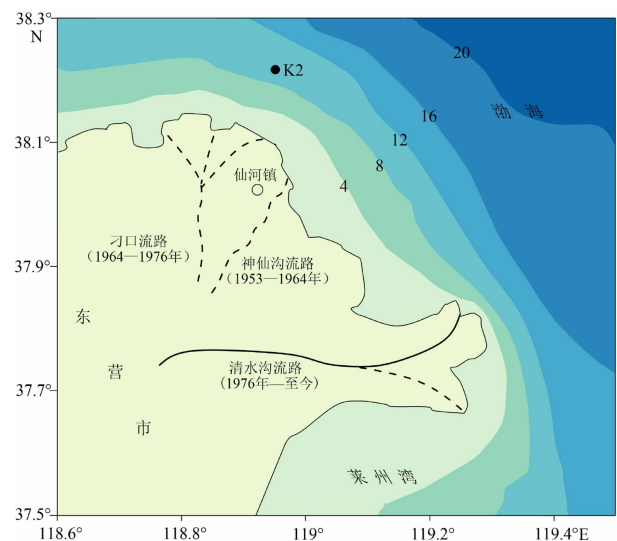


图1 研究区位置图

Fig.1 The location of study area

验与放射性核素活度的分析与测量。

1964年1月,黄河在罗家屋子人工破堤,河水北流入海,这是黄河的第六次改道,1964—1976年,黄河经刁口流路的分流河道进入渤海,而后形成水下三角洲;1976年黄河在西河口(渔洼东北)截流改道,河水东流经清水沟进入渤海,原刁口流路水下三角洲由于缺少泥沙供应,在复杂的海洋动力作用下(波浪、潮汐、潮流等)遭受冲刷和侵蚀,因此本文研究区经历了先淤积后侵蚀的沉积环境的转变。

1.2 实验分析

粒度的分析步骤如下:取适量样品放入洗净的烧杯中,加入5 mL 30%的双氧水后摇匀,30 min后加入2 mL约0.1 mol/L的六偏磷酸钠,静置24 h,并用超声波振荡器分散30 min后,用英国Malvern公司生产的Mastersizer 2000型激光粒度分布测量仪进行沉积物粒度测试。仪器测量范围为0.02~2 000 μm ,重复测试的相对误差<2%。

核素的分析步骤如下:将样品置于烘箱中80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干,研磨搅拌均匀后制成分装干样。放射性核素 ^{210}Pb 与 ^{137}Cs 采用 γ 谱仪直接测量的方法,仪器为美国Canberra公司生产的Be-3830的HPGe- γ 能谱仪,

经表征的BEGe高纯锗平面探测器,探头有效直径70 mm,有效面积3 800 mm^2 ,能量范围10 keV~10 MeV;探测器相对效率>35%。 ^{137}Cs 的含量用661.62 keV γ 射线的全能峰面积计算。 ^{210}Pb 的比活度由46.5 keV γ 射线的全能峰面积计算, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度为 ^{210}Pb 与 ^{226}Ra 比活度的差值, ^{226}Ra 活度根据351.9 keV γ 射线的普峰面积计算。 ^{137}Cs 和 ^{226}Ra 的标准样品由中国原子能研究科学院提供。

2 实验结果

2.1 沉积物粒度变化特征

柱状样K2的沉积物粒度参数如图2所示。沉积物组分以粉砂为主,占总量的60%~82%,均值为73.7%,砂粒含量18%~38.5%,均值为26%;黏粒含量很少且仅有少数层位检出,为1.1%~1.25%。垂向上,沉积物粒度组成以2.1 m为界可明显划分为2段:下段(2.1~3.5 m)沉积物组分以粉砂和砂粒为主,砂粒含量稳定,且不含有黏粒,此阶段平均粒径较小,均值为0.024 mm;上段(0~2.1 m)出现黏粒,砂粒含量明显增大,沉积物组分以粉砂和砂为主,在1.9 m处砂粒含量均达到最大值,为38.5%,此

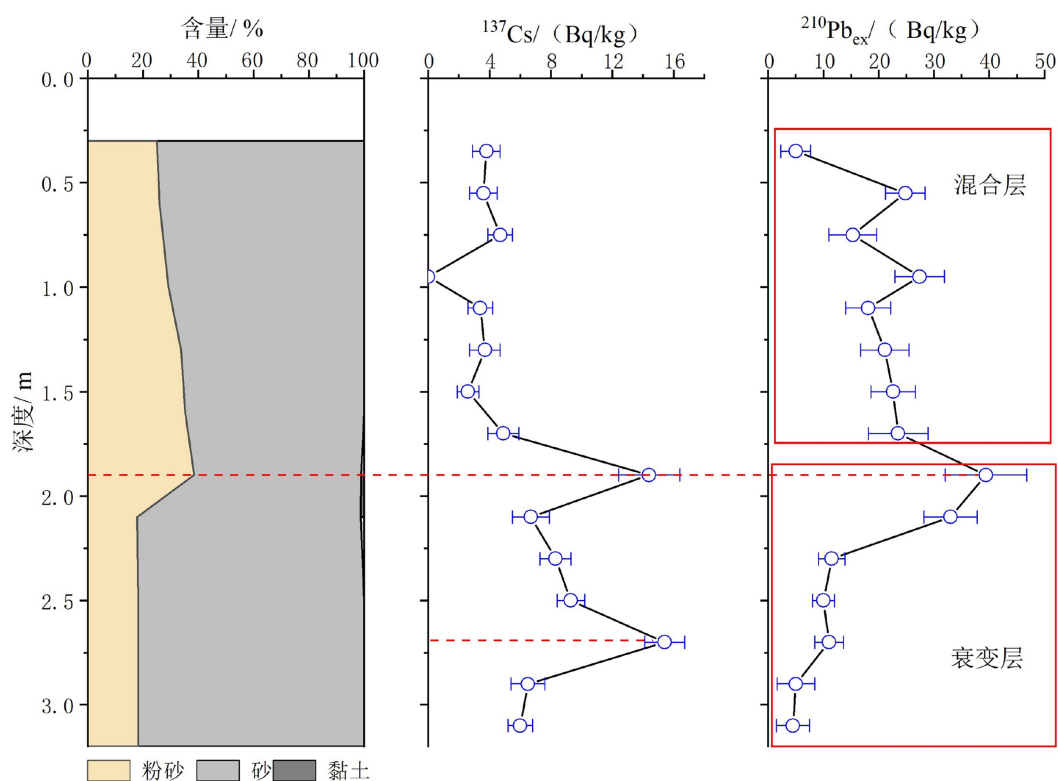


图2 柱状样K2的沉积物粒度参数、 ^{137}Cs 活度剖面以及 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度剖面
Fig.2 Sediment grain size composition, activity profile of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ of K2

阶段平均粒径较大,均值为0.053 mm。沉积物粒度组分的变化受到沉积环境改变的严重影响,据研究黄河携带泥沙入海后将导致水下三角洲区域沉积物粒度的粗化^[19]。

2.2 ¹³⁷Cs 活度剖面

柱状样 K2 的 ¹³⁷Cs 活度剖面如图 2 所示。该柱状样 ¹³⁷Cs 活度范围为 (2.6±0.7)~(15.4±1.3) Bq/kg, 活度均值为 6.2 Bq/kg。图中可看出,该沉积物柱状样的 ¹³⁷Cs 活度剖面存在一个最大蓄积峰和一个次级蓄积峰,最大蓄积峰位于 2.7 m 处,次级蓄积峰位于 1.9 m 处(与沉积物粒度组分中砂粒含量最大值出现处相对应),¹³⁷Cs 的放射性活度在 1.9 m 以深总体水平较高,在 1.9 m 以浅骤降并始终保持较低水平,两处蓄积峰值活度分别为 15.4±1.3 Bq/kg 和 14.4±2.0 Bq/kg。

2.3 ²¹⁰Pb_{ex} 活度剖面

柱状样 K2 的 ²¹⁰Pb_{ex} 活度分布如图 2 所示。该柱状样 ²¹⁰Pb_{ex} 活度范围为 (5±3.7)~(39±4.6) Bq/kg, 整体并未随深度出现指数式衰变,而呈现两段式分布的现象,因此未通过 ²¹⁰Pb_{ex} 获取钻孔处的多年平均沉积速率。图 2 显示,以 1.9 m 为界,可以将 ²¹⁰Pb_{ex} 活度垂向分布划分为两段:下段(1.9~3.5 m) ²¹⁰Pb_{ex} 随深度呈指数式衰变,且深度越大越靠近其本底值,为衰变层;上段(0~1.9 m) ²¹⁰Pb_{ex} 分布异常,违背其衰变规律,出现倒置分布的现象,分析其为混合层,反映此阶段研究区由沉积环境不稳定导致沉积物的快速沉积与侵蚀。本文推测 ²¹⁰Pb_{ex} 的这种阶段分布方式与黄河入海口变迁造成的沉积环境变化具有明显相关性。

3 讨论

3.1 研究区历史水深变化

本文搜集了黄河水利委员会实测的 1:10 万研究区历年海图,主要采集到 1959、1968、1976、1999、2007、2014 年海域内的部分水深数据,底图源于 1984、1999、2007 与 2014 年的 Landsat 遥感影像,后使用 ArcGis 通过插值——栅格生成 6 期水深图(图 3)。1964 年前,黄河未从刁口流路入海,本研究区海底地貌地形基本处于稳定状态,因此将 1959 年的海底地形视作 1964 年的初始地形。图 3 显示,本研究区域地势总体呈现出西南高东北低的趋势,等水深线

大体平行于 NW-SE 方向,与区域内波浪常浪向 NE 方向相垂直^[20],海底地形的坡度随水深逐渐变缓。

比较各期水深图发现,1959—1976 年研究区水深快速变浅且等深线快速向海推进;1976—2014 年研究区水深逐渐变大且等深线曲折,因此水深变化与黄河入海口变迁相关。1964—1976 年(刁口流路行河期),黄河携带大量水沙由刁口入海,研究区快速淤积,海底地貌处于建设期,淤积厚度达 5 m;1976 年后(黄河改道清水沟),研究区缺乏泥沙供应并在海洋动力(波浪、潮流、潮汐等)的作用下遭受冲刷与侵蚀,近岸河口区域侵蚀作用尤为强烈,海底地貌处于蚀退期,钻孔 K2 所在区位冲刷厚度达 3 m。刘勇等研究发现^[21],黄河口水下三角洲刁口叶瓣 1976—1999 年的最大冲刷中心与 1964—1976 年的最大堆积中心吻合,冲刷厚度达 8 m。因此本区域并非侵蚀中心区域,且侵蚀厚度未超过三角洲建设阶段的淤积厚度,于是推断研究区在 1964 年以前及黄河改道刁口初期的沉积物未遭受侵蚀作用,因此柱状样 K2 下部(2.1~3.5 m)沉积环境稳定。

3.2 柱状样 K2 的蓄积峰值

¹³⁷Cs 是 20 世纪 50 年代大气核试验产生的放射性核素,据联合国原子辐射科学委员会(UNSCEAR)的报告(2012 年)显示,全球 ¹³⁷Cs 的大气沉降受到地球风带与气压带的影响,因此同纬度圈内 ¹³⁷Cs 的沉降趋势基本一致,其差异主要由降水量不同导致。本文选取与黄河三角洲位于同一纬度带的东京地区(35°68'98"N、139°69'32"E)参照其 ¹³⁷Cs 大气沉降趋势(图 4)。据日本东京核尘埃沉降监测资料,1963 年的 ¹³⁷Cs 沉降量约占沉降总量的 20%,此后 ¹³⁷Cs 年沉降量骤减并始终保持较低水平;1986 年前苏联切尔诺贝利核事故有沉降异常显示,但是远低于核爆期间的年均沉降量,约为 1963 年沉降量的 1/15,且对东亚影响极小^[22]。因此在理想的沉积环境下,即区域内未发生混合扰动、侵蚀和再迁移作用,¹³⁷Cs 可测得的起始层位为 1954 年,最大蓄积峰应出现在 1963 年,次级蓄积峰应出现在 1959 年。国内相关研究表明,湖泊与海洋沉积物中的 ¹³⁷Cs 峰值多对应于 1963—1964 年,且不应存在 1986 年的蓄积峰值^[23-26]。

河口及三角洲区域的 ¹³⁷Cs 除大气沉降输入外,还存在流域侵蚀输入,因此黄河携带大量泥沙入海对研究区的 ¹³⁷Cs 活度分布产生重要影响。本文根据近年来《中国泥沙公报》和黄河水文站的资料统

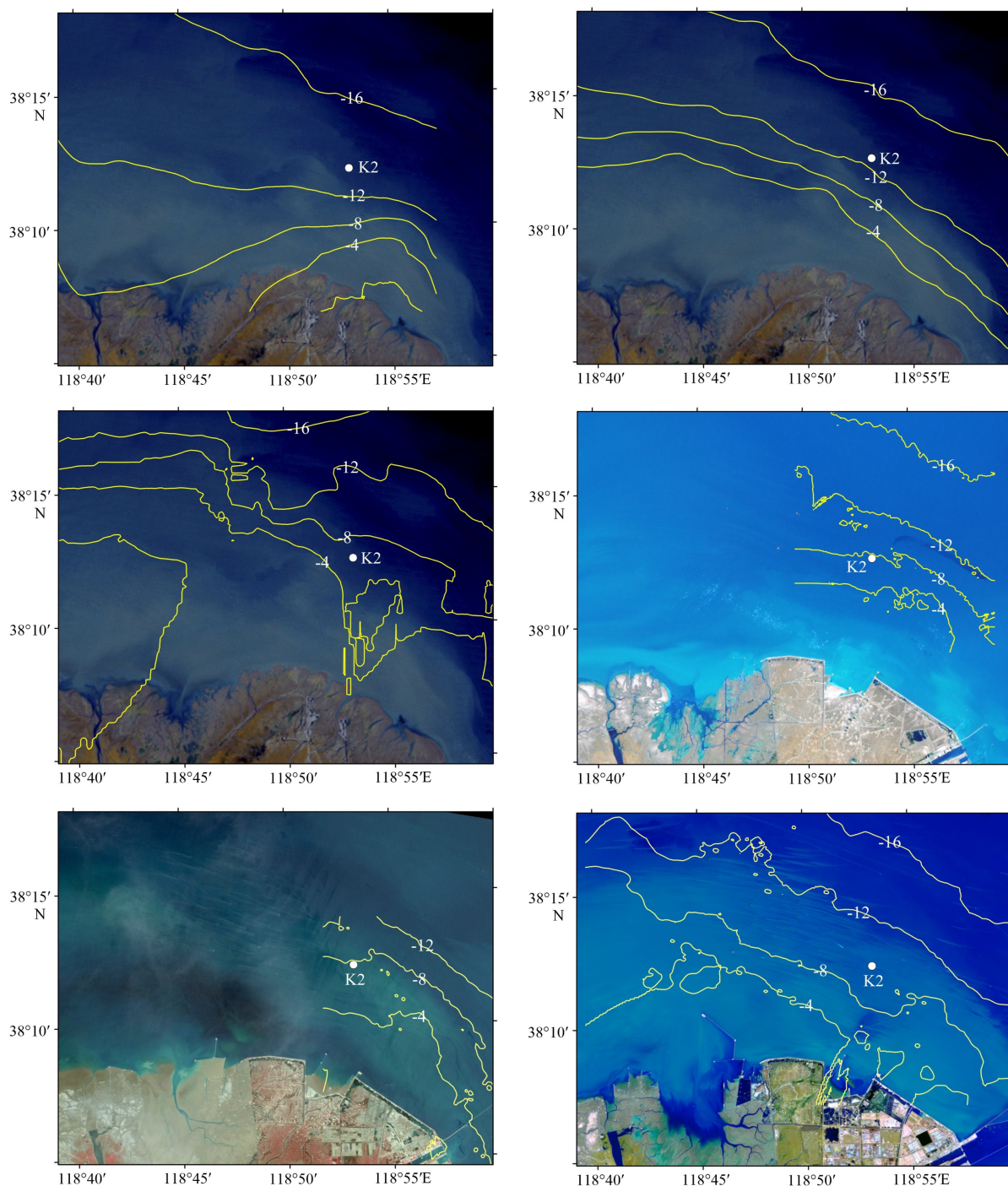


图 3 研究区 1959—2014 年各期水深图 (水深依次为 1959、1968、1976、1999、2007 和 2014 年; 遥感图依次为 1984、1984、1984、1999、2007、2014 年, 黄河口遥感影像始于 1984 年)

Fig.3 Bathymetric map of study area from 1959 to 2014 (water depth for 1959, 1968, 1976, 1999, 2007 and 2014. remote sensing images for 1984, 1984, 1984, 1999, 2007, 2014. Landsat of the Yellow River estuary begins from 1984)

计黄河于 1964—1976 年的输沙量(图 5)。黄河于 1964 年 1 月人工破堤后由刁口流路入海, 所携泥沙共计 142 亿 t, 这些泥沙在近岸海域快速淤积使得岸线迅速向海推进。历史资料显示, 1967 年黄河输沙量达最大值, 为 20.9 亿 t, 1964 年次之, 为 20.3 亿 t; 1967 年后, 黄河入海泥沙量下降且呈现小幅波动的

趋势, 这与黄河中上游多个大坝的建立有关。1964 年黄河改道刁口流路携带大量泥沙入海, 研究区沉积物迅速沉积、核素富集, 因此¹³⁷Cs 活度陡然增大, 这与¹³⁷Cs 大气沉降峰值叠加, 共同形成柱状样 2.7 m 处的最大蓄积峰; 1967 年¹³⁷Cs 大气沉降量下降但河流入海泥沙量达最大值, 形成柱状样 1.9 m 处的次

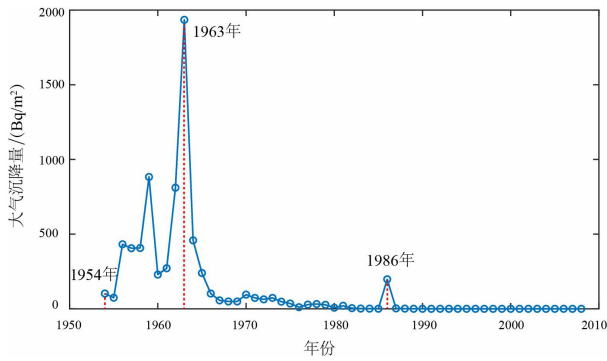
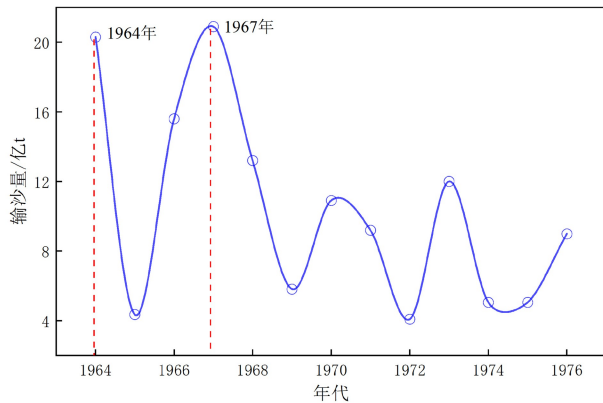
图4 东京地区1954—2008年的 ^{137}Cs 大气沉降通量Fig.4 ^{137}Cs atmospheric deposition flux from 1954 to 2008 of Tokyo

图5 1964—1976年黄河输沙量的年际变化图

Fig.5 Interannual variation of sediment discharge of the Yellow River from 1964 to 1976

级蓄积峰。

3.3 研究区沉积环境演变的粒度与核素证据

黄河入海口的变迁导致研究区沉积环境在三角洲侧缘和海岸沉积环境间转变,而这种变化在沉积物粒度、 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度分布以及 ^{137}Cs 活度分布上均有表现(图2)。1964年前(黄河未从刁口流路入海)研究区沉积环境稳定,沉积物无黄河输沙来源,因此柱状样K2下部的沉积物粒度组分变化稳定;此时核素主要为大气沉降来源, ^{137}Cs 与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 均遵守核素分布规律, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度剖面在深度1.9~3.5 m呈现理想的衰变形式,这与李凤业研究的 ^{210}Pb 混合区—衰变区—本底区的阶段式分布结论相符^[11],由于柱状样长度的限制,研究区并未出现本底层。1964年,黄河携带大量泥沙由刁口流路入海,研究区沉积物来源于黄河入海泥沙且堆积速度很快,此时 ^{137}Cs 除大气沉降外还存在流域输入来源,两者共同作用形成2.7 m处的最大蓄积峰。1967年(柱状样1.9 m处),黄河入海泥沙量最大, ^{137}Cs 活度出现

次级蓄积峰值,这时 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度与沉积物中砂粒含量均达到最大值。沉积物粒度组分的突变为2.1 m处,未与 ^{137}Cs 最大蓄积峰(2.7 m)相对应,本文推测可能由两点原因造成:(1)黄河入海泥沙的2/3堆积在口门处,河流改道初期研究区泥沙来量相对较小,随着岸线的不断推移,研究区泥沙堆积不断增多,而后沉积物粒度组分发生变化。(2)黄河所携泥沙中以粉砂为主,占55%~88%,砂占7%~34%,与研究区底质沉积物类型有较高一致性,因此在改道初期沉积物粒度组分变化不大,后由于黄河泥沙与水动力的改变造成沉积物粒度组分的突变。1976年(黄河改道清水沟)后,研究区缺少入海泥沙供应,沉积环境极不稳定,波浪、潮流和潮汐等成为本区的主要动力作用,研究区遭受冲刷与侵蚀作用且沉积物的再悬浮与再沉积现象显著,沉积物粒径较1964—1976年小幅度下降,但仍比1964年前大。柱状样K2在0~1.9 m(1967年)先后经历沉积物的快速堆积与侵蚀,因此 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 表现为混合层。

综上所述,本文将柱状样K2的深度2.7 m处定为1964年,深度1.9 m处定为1967年;因此推断研究区1964—1967年沉积物淤积厚度为0.8 m,这一结果与统计的历史水深数据相符。柱状样K2的沉积物砂粒含量在1.9 m处的最大值、 ^{137}Cs 活度剖面1.9 m处的次级蓄积峰与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度分布以1.9 m为界的阶段式划分均记录了黄河改道由刁口入海并在1967年达到入海泥沙量最大值的过程。

4 结论

(1)柱状样K2的 ^{137}Cs 活度剖面存在两个蓄积峰值,最大蓄积峰值(2.7 m处)对应于1964年,次级蓄积峰(1.9 m处)对应于1967年。在沉积环境不稳定区域可结合事件性沉积或其他测年手段进行 ^{137}Cs 的辅助定年。

(2)柱状样K2的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 呈现明显的两段式分布,这种分布方式与黄河口变迁及沉积物来源的变化相关。1967年前,研究区沉积环境较稳定、泥沙来源单一并在1967年达到最大值, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 表现为衰变层;1967年后,研究区沉积环境复杂,沉积物经历了先堆积后侵蚀, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 表现为混合层。

(3)黄河口变迁造成研究区沉积环境的演变在 ^{137}Cs 活度、沉积物粒度与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度的分布上均有表现。虽然黄河改道清水沟后本区遭受侵蚀作用,但侵蚀厚度远低于淤积厚度,且1964年(黄河改道清水沟)前的沉积物未遭受侵蚀。

参考文献 (References)

- [1] 常瑞芳, 崔青, 欧素英. 黄河口水下三角洲海底冲蚀沟发育的动力机制探讨[J]. 海洋学报, 1999, 21(3): 90-97. [CHANG Ruifang, CUI Qing, OU Suying. Study of dynamic mechanism for the formation and growth of gullylandform on the subaqueous delta near old Huanghe River mouth [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21(3): 90-97.]
- [2] 仲德林, 刘建立. 黄河改道后河口至黄河海港海岸冲淤变化研究[J]. 海洋测绘, 2003, 23(1): 49-52. [ZHONG Delin, LIU Jianli. Research on the scour-and-fill structure from the river mouth to the harbour bank of Yellow River after the diversion [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2003, 23(1): 49-52.]
- [3] 彭俊, 陈沈良. 近60年黄河水沙变化过程及其对三角洲的影响[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1353-1362. [PENG Jun, CHEN Shenliang. The variation process of water and sediment and its effect on the yellow river delta over the six decades [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1353-1362.]
- [4] 彭俊, 陈沈良, 陈一强, 等. 黄河三角洲侵蚀性岸段水下岸坡地质灾害及其空间分布[J]. 海洋通报, 2014, 33(1): 1-6. [PENG Jun, CHEN Shenliang, CHEN Yiqiang, et al. Geological hazards and their spatial distribution in the subaqueous slope at the erosive coast of the Yellow River delta [J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(1): 1-6.]
- [5] 张晓龙, 李培英. 现代黄河三角洲的海岸侵蚀及其环境影响[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(5): 475-479. [ZHANG Xiaolong, LI Peiying. Coastal erosion and its environmental effect in the Modern Yellow River Delta [J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(5): 475-479.]
- [6] 刘淑平. 黄河三角洲冲淤时空变化特征及发展趋势预测[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2007. [LIU Shuping. Study on spacial-temporal evolution of erosion/deposition of Yellow River delta and trend forecast[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2007.]
- [7] 李广雪, 薛春汀. 黄河水下三角洲沉积厚度、沉积速率及砂体形态[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1993, 13(4): 35-44. [LI Guangxue, XUE Chunting. Sediment thickness, sedimentation rate and silt body shape of the Yellow River subaqueous delta lobe [J]. *Marine Geology & Quaternary geology*, 1993, 13(4): 35-44.]
- [8] 程天文, 赵楚年. 我国主要河流入海径流量、输沙量及对沿岸的影响[J]. 海洋学报, 1985, 7(4): 460-471. [CHENG Tianwen, ZHAO Chunian. Runoff, sediment transport and impact on coastal areas of major rivers in China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1985, 7(4): 460-471.]
- [9] Goldberg E D. Geochronology with ^{210}Pb [C]/Radioactive Dating Proceedings of the Symposium on Radioactive Dating Held by the International Atomic Energy Agency in Co-operation with the Joint Commission on Applied Radioactiv. Athens: International Atomic Energy Agency, 1963: 121-131.
- [10] Huh C A, Su C C. Sedimentation dynamics in the East China Sea elucidated from ^{210}Pb , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ [J]. *Marine Geology*, 1999, 160(1): 183-196.
- [11] 李凤业, 袁巍. 近代黄河三角洲海域 ^{210}Pb 多阶分布与河口变迁[J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(5): 566-570. [LI Fengye, YUAN Wei. Stage distribution of ^{210}Pb and implication of migration of the channel to the modern huanghe river delta [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1992, 23(5): 566-570.]
- [12] 成国栋, 业渝光, 刁少波. 黄河三角洲的 ^{210}Pb 剖面与再沉积作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(2): 1-10. [CHENG Guodong, YE Yuguang, DIAO Shaobo. ^{210}Pb profile and redeposition of the Yellow river delta Cheng Guodong [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1995, 15(2): 1-10.]
- [13] 李建芬, 王宏, 夏威夷, 等. 渤海湾西岸 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 测年与现代沉积速率[J]. 地质调查与研究, 2003, 26(2): 114-128. [LI Jianfen, WANG Hong, XIA Weilan, et al. ^{210}Pb and ^{137}Cs dating and modern sedimentation rate on the western coast of Bohai bay [J]. *Geological Survey and Research*, 2003, 26(2): 114-128.]
- [14] 任寒寒, 范德江, 张喜林, 等. 黄河入海口变迁的沉积记录: 来自粒度和 ^{210}Pb 的证据[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(4): 21-29. [REN Hanhan, FAN Dejiang, ZHANG Xilin, et al. Sedimentary records of the Yellow River mouth migration: evidence from grain-size and ^{210}Pb [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(4): 21-29.]
- [15] Zhou L Y, Liu J, Saito Y, et al. Modern sediment characteristics and accumulation rates from the delta front to prodelta of the Yellow River (Huanghe) [J]. *Geo-Marine Letters*, 2016, 36(4): 247-258.
- [16] Bi N S, Yang Z S, Wang H J, et al. Sediment dispersion pattern off the present Huanghe (Yellow River) subdelta and its dynamic mechanism during normal river discharge period [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 86(3): 352-362.
- [17] Xing G P, Wang H J, Yang Z S, et al. Spatial and temporal variation in erosion and accumulation of the subaqueous Yellow River delta (1976-2004) [J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 74(sp1): 32-47.
- [18] 王厚杰, 原晓军, 王燕, 等. 现代黄河三角洲废弃神仙沟-刁口叶瓣的演化及其动力机制[J]. 泥沙研究, 2010(4): 51-60. [WANG Houjie, YUAN Xiaojun, WANG Yan, et al. Evolution of the abandoned Shenxiangou-Diaokou delta lobe: processes and mechanism [J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(4): 51-60.]
- [19] 王庆, 王小鲁, 李雪艳, 等. 黄河三角洲南部废弃三角洲潮间滩涂表层沉积粒度特征及其粗化现象[J]. 第四纪研究, 2017, 37(2): 353-367. [WANG Qing, WANG Xiaolu, LI Xueyan. Grain size characteristics and coarsening phenomenon of inter-tidal flat surficial sediment along the abandoned southern Yellow River sub-delta [J]. *Quaternary study*, 2017, 37(2): 353-367.]
- [20] 李平, 朱大奎. 波浪在黄河三角洲形成中的作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(2): 39-46. [LI Ping, ZHU Dakui. The role of wave action on the formation of Yellow River delta [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1997, 17(2): 39-46.]
- [21] 刘勇, 李广雪, 邓声贵, 等. 黄河废弃三角洲海底冲淤演变规律研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(3): 27-34. [LIU Yong, LI Guangxue, DENG Shenggui, et al. Evolution of erosion and accumulation in the abandoned subaqueous delta lobe of the Yellow River [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 22(3): 27-34.]
- [22] Hirose K, Igarashi Y, Aoyama M, et al. Long-term trends of plutonium fallout observed in Japan [J]. *Radioactivity in the Environment*, 2001, 1: 251-266.

- [23] 万国江, 林文祝, 黄荣贵, 等. 红枫湖沉积物¹³⁷Cs垂直剖面的计年特征及侵蚀示踪[J]. *科学通报*, 1990, 35(19): 1487-1490. [WAN Guojiang, LIN Wenzhu, HUANG Ronggui, et al. Sedimentation dating and erosion tracing of ¹³⁷Cs for sediment in Hongfeng Lake [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(19): 1487-1490.]
- [24] 李春梅, 王红亚. 贵州省西南部麦岗水库沉积物的¹³⁷Cs和²¹⁰Pb测年与沉积速率研究[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 215-219. [LI Chunmei, WANG Hongya. ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb dating and inference of sedimentation rate for maigang reservoir in southwest Guizhou province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(2): 215-219.]
- [25] Aoyama M, Hirose K, Miyao T, et al. ¹³⁷Cs activity in surface water in the western North Pacific [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2001, 248(3): 789-793.
- [26] 郝立波, 刘海洋, 陆继龙, 等. 松花湖沉积物¹³⁷Cs和²¹⁰Pb分布及沉积速率[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009(3): 470-473. [HAO Libo, LIU Haiyang, LU Jilong, et al. Distribution and deposition rate of ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb in songhua lake sediments [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2009(3): 470-473.]