

孙璐, 单红仙, 张红, 等. 基于 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 分布和粒度特征的海床液化深度判定研究——以埤岛海域为例[J]. 海洋学报, 2023, 45(10): 105–113, doi:10.12284/hyxb2023091

Sun Lu, Shan Hongxian, Zhang Hong, et al. Determination of sediment liquefaction depth based on ^{210}Pb , ^{137}Cs distribution and grain-size characteristic: Take the Chengdao sea area as an example[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(10): 105–113, doi:10.12284/hyxb2023091

基于 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 分布和粒度特征的 海床液化深度判定研究 ——以埤岛海域为例

孙璐¹, 单红仙^{1,2}, 张红^{1,3}, 刘汉露¹, 贾永刚^{1,2*}

(1. 中国海洋大学 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061; 3. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要:黄河水下三角洲海床液化现象分布广泛, 对海底工程设施造成了极大威胁, 确定液化深度可为海上工程建设提供参考, 具有很大的理论意义和应用价值。在黄河水下三角洲北部埤岛海域液化扰动区钻探取得柱状沉积物对其进行剖面图像扫描、放射性核素和粒度成分测试, 获得图像分层特征、 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 活度及粒度剖面, 在此基础上计算得到沉积速率。结果表明: 埤岛海域受黄河 1976 年由刁口流路改道清水沟流路事件影响显著, 这一时期沉积速率大幅减小并呈现阶段性特征; 快速沉积时期表层沉积物频繁液化产生的砂层不断累积, 从而形成密集砂层; 通过分析 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 、 ^{137}Cs 活度剖面获得研究区液化历史的沉积记录, 判定历史液化深度至少为 5 m, 这一结论与前人研究相近。以 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 的活度为工具来判断沉积物液化历史及深度存在一定的可行性, 具有很大的发展潜力。

关键词:黄河水下三角洲; 放射性核素; 粒度特征; 液化深度

中图分类号: P736.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)10-0105-09

1 引言

黄河是为数不多年输沙量超过亿吨的河流, 河口海洋动力较弱, 大量泥沙堆积发育在近岸区域形成了巨大的黄河水下三角洲。自 1855 年改道自东营入海, 黄河口每年会向海推进大约 2 km^[1]。距今 100 多年间, 黄河共改道 50 余次, 其中不乏人为因素的结果。

黄河三角洲沉积物以粉质土为主, 饱和度及孔隙比均较高, 在波浪、潮汐、海流、风暴等因素的作用下易发生破坏, 广泛发育有液化、侵蚀、滑坡等海底灾害地质现象, 其中海床液化对海底工程设施的稳

定性产生很大威胁, 曾导致海底管道断裂等事件的发生^[2]。前人运用数值分析、室内模拟试验、原位观测等不同手段对液化的现象及机制等方面展开了研究。冷浩等^[3]采用数值模拟对波流作用下黄河三角洲硬壳层液化渗流形成机制展开研究, 得出表面硬壳层的存在会显著促进累积孔压消散过程的结论。刘志钦等^[4]在室内水槽实验过程中发现随着海底沉积物的液化振荡, 颗粒逐渐重新排列并压实, 液化地层随之呈现厚度降低和强度变大的现象。孙永福等^[5]根据液化分类的不同, 分别计算了风暴潮情况下不同水深时瞬时液化极限深度与残余液化极限深度, 并指

收稿日期: 2022-10-25; 修订日期: 2022-12-10。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877223, 42207181, U1906230)。

作者简介: 孙璐(1997—), 女, 山东省青岛市人, 从事沉积物液化机制研究。E-mail: sunlu9204@stu.ouc.edu.cn

* 通信作者: 贾永刚(1965—), 男, 教授, 主要从事海洋工程地质与海洋岩土工程研究。E-mail: yonggang@ouc.edu.cn

出在水深 8 m 时的液化深度最大, 在 50 年一遇的波浪作用下, 海床液化深度可达到 5.2 m^[6]。

鉴于液化导致的沉积物内部响应对海床强度等性质的影响, 其对海上油气资源开发活动威胁程度较高, 因此海床液化深度的判别工作存在一定的必要性。目前研究多聚焦于液化导致的沉积物内部组分构造的变化过程、液化后沉积物物理力学性质的变化, 对液化深度的研究相对较少, 且多采用数值计算、室内模拟实验及浅地层剖面调查等方法, 缺少对现场实际样品的分析, 尚无研究将放射性核素剖面作为工具应用于液化深度判定。近年来放射性核素 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 的应用范围逐渐扩大至水动力条件复杂的河口区域, 广泛用于探究沉积环境的变化和历史^[7], 已有学者将柱状沉积物的放射性核素分段特征作为黄河入海口变迁的证据^[8]。

本文通过分析柱状沉积物样品的放射性核素 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 比活度剖面以及粒度变化特征, 综合考虑放射性核素与粒度存在的关系, 并与液化作用机制及研究区的液化历史相结合, 探究基于放射性核素 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 数据判定液化深度的可行性。本研究旨在为埕岛海域的 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 分布规律提供数据支撑, 并引入一种新的判定液化深度手段, 为后续研究提供科学参考。

2 材料与方法

2.1 研究区与样品采集

研究区位于黄河三角洲北部地区埕岛海域, 该区

域形成于黄河改道刁口流路期间, 海底沉积物多为粉土, 冬春两季风暴潮事件频发, 水动力条件季节性变化明显。2021 年 12 月使用钻探取样在该区域采集柱状沉积物, 取样点处水深约为 12.5 m, 钻探总长度为 5 m, 分 3 段进行, 长度分别为 1.5 m、1.5 m、2 m。由于现场情况复杂, 实际取得样品长度为 0.94 m、1.09 m、1.74 m, 分别从属于 0~1.5 m、1.5~3.0 m、3.0~5.0 m 深度。样品站位见图 1。

2.2 分析方法

2.2.1 粒度分析

实验在中国海洋大学环境科学与工程学院土工测试实验室完成, 方法为比重计法(含筛析)。样品取出后首先放置于干净烧杯中, 然后将烧杯放入烘箱, 在 105℃ 下烘至恒量, 之后将烧杯冷却至室温, 加入 10 mL 质量分数浓度为 4% 的六偏磷酸钠溶液, 静置 24 h 使土颗粒完全分散。将分散好的土颗粒溶液过 0.075 mm 的细筛。筛下小于 0.075 mm 的土颗粒被冲入 1 000 mL 的量筒内, 之后按照密度计法的试验步骤, 记录 60 min、120 min 和 180 min 时的密度计读数。最后根据海洋地质规范, 利用华勘土工分析软件进行分析。筛上大于 0.075 mm 的土颗粒则被再次冲入烧杯内, 烘干、研磨, 按照标准筛分法步骤, 分别过孔径为 2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.1 mm、0.063 mm 的筛子, 获取各粒径范围内土颗粒的质量。

2.2.2 界限含水率实验

实验在中国海洋大学环境科学与工程学院土工测试实验室完成, 采用液塑限联合测定仪完成。然后

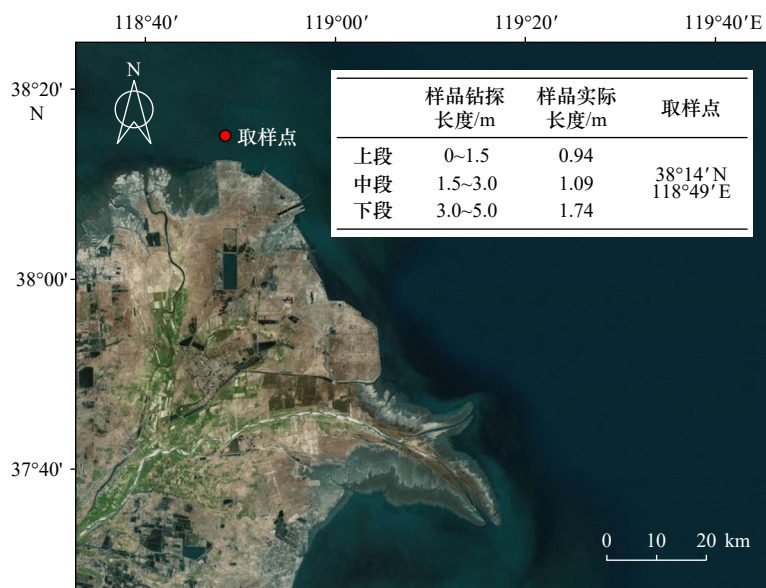


图 1 研究区位置

Fig. 1 The location of study area

分别测定各个土样的含水量,将数据绘制在圆锥下沉深度和含水量的关系图上,图中下沉深度为 10 mm 的点所对应的含水量为液限,下沉深度为 2 mm 的点所对应的含水量为塑限。

2.2.3 放射性核素活度测试

在中国海洋大学环境科学与工程学院土工测试实验室完成样品预处理,测试在青岛海洋科学与技术试点国家实验室同位素与地质测年平台进行。

沉积物样品以 6 cm 的间隔进行取样,共获得 46 份样品,将样品置于 105℃ 烘箱中烘干研磨至无明显颗粒状后称重,每一层位样品约 10 g,随后用特定样品盒进行分装,密封 15 d 以达到放射性核素的平衡。选用 γ 谱仪对放射性核素²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 的活度进行测量,仪器为美国 ORTEC 公司生产的井型高纯锗伽玛谱仪,配备有液氮回凝制冷器和超低本底铅室,测试获得²¹⁰Pb_{total}、²²⁶Ra 和¹³⁷Cs 的活度数据,计算得过剩铅(²¹⁰Pb_{ex}),公式如下:

$$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}} = ^{210}\text{Pb}_{\text{total}} - ^{226}\text{Ra}. \quad (1)$$

3 结果

3.1 粒度参数及其垂向分布特征

样品粒度参数特征如图 2 所示。沉积物以粉砂和黏土组分为主,其中砂粒含量为 0~36.6%,均值为 5.7%;粉砂含量为 15.7%~70.7%,均值为 46.2%;黏粒

含量为 8.6%~83.6%,均值为 48%。中值粒径在 3~69 μm 之间,均值为 13 μm ;平均粒径 ϕ 在 0.4~5.8 μm 之间,与中值粒径相比偏小;分选系数在 0.5~5 之间,不同层段分选系数差异较大;偏态范围为 0.2~0.8,分布为很正偏;峰态范围为 0.8~3.8。

根据沉积物粒度参数在垂向上的分布特征可将其分为 4 个层段(图 2)。层段 I (0.6~0.76 m) 砂粒含量较高,平均含量可达 24.6%,是中值粒径和平均粒径最大的层段,且波动幅度较大,可由此推导该层段沉积环境并不稳定;层段 II (0.76~1.5 m) 各组分含量较为稳定,整体粒径变化范围不大,呈缓慢减小趋势,整体较上一层段更加稳定,偏态逐渐变大,分选系数和峰态变化不明显,仅在 1.5 m 深度上下处有小幅波动;层段 III (2.12~3.0 m) 砂粒含量急剧下降至接近为 0,黏粒含量大幅上升,平均黏粒含量达 50%,中值粒径范围稳定在 5~10 μm 之间,平均粒径和分选系数均先缓慢减小,随后趋于稳定,最后在近 3 m 深度处短暂上升,偏态与峰态则变化趋势不明显;层段 IV (3.72~5.0 m) 粉砂组分含量下降,黏粒平均含量可达 70%,中值粒径变化不大,平均粒径和分选系数小幅波动,分选变好,偏态整体波动较大、变化趋势不明显,峰态维持在较高水平且变化范围大。

3.2 沉积物剖面分层特征

黄河三角洲沉积物在沉积过程中受到物源、波

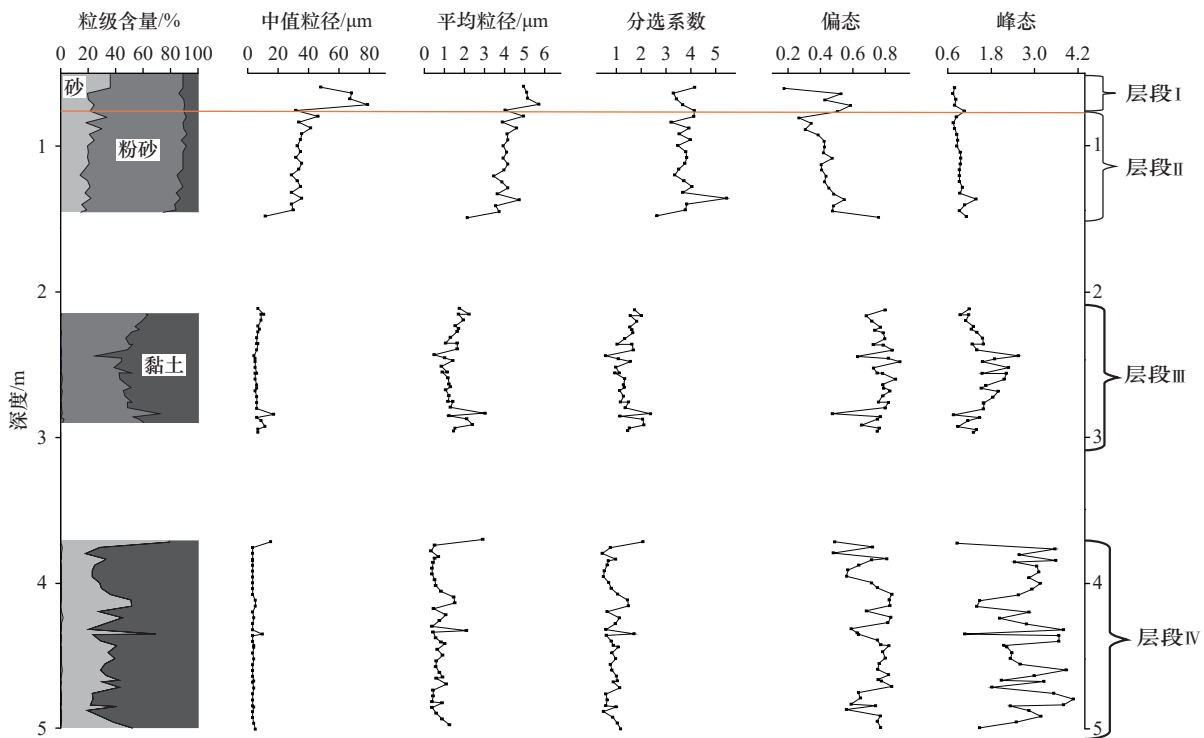


图 2 沉积物粒度参数剖面

Fig. 2 Profiles of grain-size parameters

浪、侵蚀、生物等因素影响,经常处在并不稳定的沉积环境中,从而导致沉积物剖面的分层现象^[9]。

柱状沉积物样品剖面分层特征如图 3 所示。表层 1.5 m 与深度 1.5 m 以下沉积物的组分差异明显,其中 0~1.08 m 深度样品为棕褐色砂层,无层理,近乎均质,其后的 1.08~1.5 m 深度样品开始出现不规则的黄褐色土层,无明显层状结构,砂层占比减小,黏土与粉砂组分含量明显增加。第二段沉积物在 2~2.45 m 深度样品有明显的层理结构,含大量厚度小于 2 cm 的密集砂层,在室内试验中发现该层含水率较上下相邻的均质层明显偏低,土质明显松散,且自 2.45 m 深度向下砂层鲜少出现,基本为均质的黏土层,仅在 2.9 m 处出现厚度约为 1.5 cm 的灰褐色砂层。第三段样品在 4 m 深度处出现一处厚度约 2.5 cm 的断裂层,整段样品分别在 3.52 m、4.05 m 及 4.9 m 深度处出现厚度不等的棕褐色土层,4.3~4.7 m 层段则为黄褐色黏土质粉砂与薄层灰褐色粉砂互层,水平层理明显。

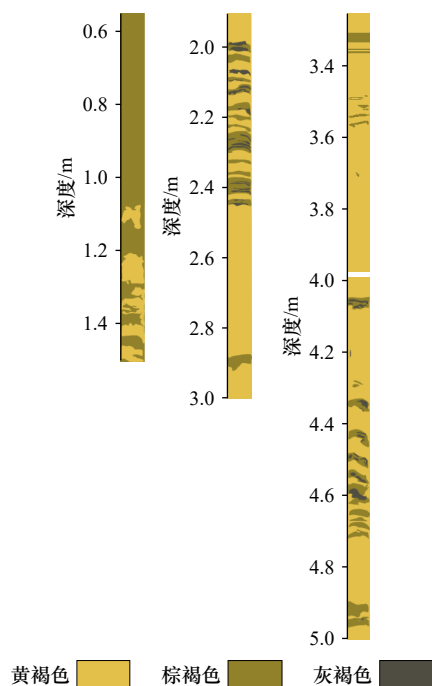


图 3 沉积物剖面分层特征
Fig. 3 Profiles of layered characteristics

3.3 放射性核素在垂向上的分布特征

样品的过剩铅 ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$) 和 ^{137}Cs 活度剖面如图 4 所示。上段样品 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度在 0.6~0.9 m 层段维持在较低水平,在 0.96 m 深度处活度上升至 10.4 Bq/kg 为该段峰值,随后的 0.96~1.5 m 层段 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度波动范围明显增大。中段样品 (2.1~2.88 m) 在 2.22 m 处存在整段样品的峰值活度为 25.8 Bq/kg,其余深度活度变化范围不大,波动并不明显,活度范围为 4.2~

13.3 Bq/kg。下段样品 (3.68~4.94 m) 为三段中混合最明显的层段,该段活度的最大值与最小值相差最大,达到了 15 Bq/kg。该柱状样的整体 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度剖面的分布模式为均一型^[7],且部分深度出现极高的异常峰值,表征该样品的自然沉积状态受到了较大的破坏。运用 CRS 模式^[10]进行沉积速率的计算,得到的结果分层明显,0~1.5 m 样品沉积速率较低,平均沉积速率为 0.47 cm/a,随后以 3.74 m 为分界线,1.5~3.74 m 样品沉积速率为 1.41 cm/a,3.74~5 m 样品沉积速率为 2.48 cm/a。

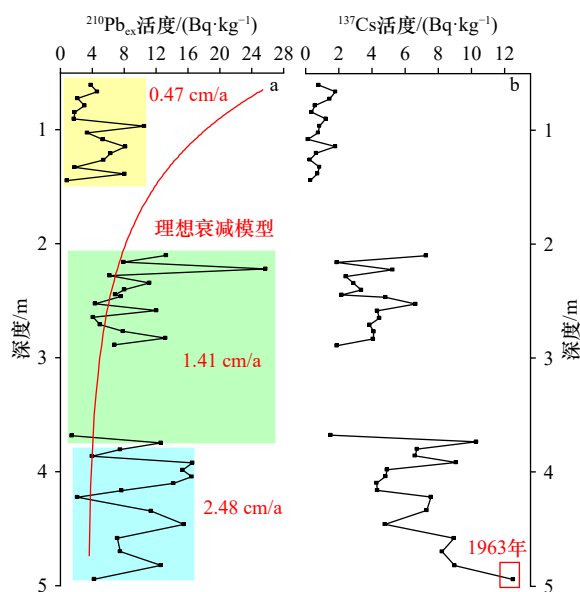


图 4 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{137}Cs 活度剖面
Fig. 4 Activity profile of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^{137}Cs

^{137}Cs 活度剖面整体呈倒置状态(图 4b),即活度随深度的增加逐渐增大,整体活度范围为 0.2~12.4 Bq/kg。表层样品 ^{137}Cs 活度维持在较低水平,中段略有升高,下段活度曲线变化趋势最明显。1986 年切尔诺贝利核泄漏事故因距黄河三角洲区域较远,时标作用并不明显,因此着重分析 1963 年时标对应深度,初步判定样品 4.94 m 深度处的 ^{137}Cs 活度最大值 (12.41 Bq/kg) 为 1963 年时标。

4 讨论

4.1 沉积记录的阶段性分析

由 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 计算得到的沉积速率以 1.5 m 和 3.74 m 为界分为 3 阶段(图 4),各阶段间存在一定差值,在这两个深度处沉积环境可能发生了很大变化。考虑到河口三角洲的沉积过程受到河流输沙量、潮汐、波浪、生物等多方面因素的影响,而在黄河三角洲的形成与演化过程中,河流进积作用占主导地位^[11]。黄河

沉积演化过程中曾多次改道,对河流进积作用产生较大影响^[12]。刁口叶瓣的发展受此类因素影响经历了稳定增长(1963–1967年)、快速增加(1968–1975年)、快速蚀退(1976–1986年)、缓慢蚀退(1987年至今)4个阶段^[13],不同阶段的物源输入及水动力条件发生较大变化,最终影响到黄河水下三角洲的沉积演化过程。

4.94 m 深度所在层段的平均沉积速率为整段样品最高的 2.48 cm/a, 而由 ¹³⁷Cs 得到的 1963 年时标深度为 4.94 m, 因此该层段沉积物形成时间应在 1963 年前后, 即黄河改道至刁口流路初期, 与快速增长阶段相对应。对利津站历年水沙量进行统计, 1960–1985 年利津站监测得到的径流量和输沙量仅次于 1950–1959 年(图 5), 总输沙量达到 9.45×10^8 t, 这一事实可很好地解释上述高沉积速率现象。除此之外, 在粒度特征中也可找到黄河三角洲沉积条件阶段性变化的证据, 样品表层 1.5 m 处砂粒含量急速下降且沉积物粒径变粗(图 2), 可能是向快速蚀退阶段转变的过程中水动力条件变化带来的影响。快速蚀退阶段的产生是由于 1976 年黄河由刁口流路改道至清水沟流路, 刁口叶瓣物质输送通量大幅减小^[14]。由形成时间推测样品上段 1.5 m 对应缓慢蚀退阶段, 平均沉积速率为 0.47 cm/a(图 4a), 远小于 1.5 m 深度以下沉积速率, 与研究区由快速蚀退到缓慢蚀退阶段转变的过程相矛盾。这可能是由于黄河 1976 年改道后, 主导黄河三角洲形成演化的因素由物源输入变为水动力对沉积物的侵蚀作用对沉积物进行了复杂的再改造, 破坏了其初始沉积状态, 因此上部样品的沉积速率与实际存在一定偏差, 不能与黄河演化阶段形成良好对应。

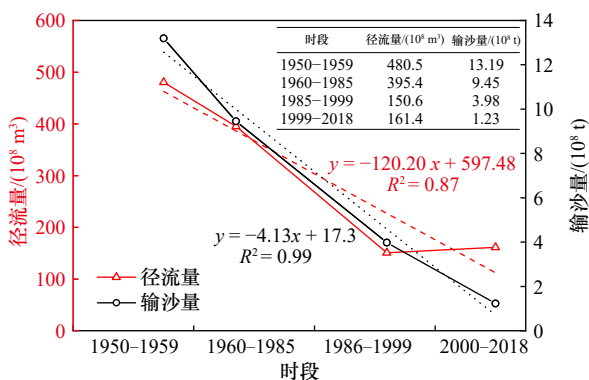


图 5 利津站历年水沙量(改自文献 [15])
Fig. 5 Annual runoff and sediment load at Lijin Station
(modified from reference [15])

在原位观测中可直观观察到在波浪、潮流等水动力条件作用下形成的泥沙再悬浮现象, 表现为上覆水

体浊度升高, 从而形成高浓度悬沙层^[16]。埭岛海域冬春两季潮位高, 存在高流速区, 细颗粒物在高速水流作用下更易悬浮在水中形成上述现象。在沉积过程中小浪可为河口颗粒物提供较好的沉积环境, 具有建设性, 大浪则具有破坏性, 带走水体中的悬浮泥沙, 破坏自然沉积界面的粒度组成^[17]。在缺少泥沙供给的前提下, 浅表层沉积物长期受波浪掀沙影响, 细颗粒物的流失导致其组成成分逐渐改变。因此, 在改道后研究区缺少物源输入的前提下, 海床表层长期遭受侵蚀再悬浮作用影响, 粉砂和黏土组分在波浪作用下大量损失, 进而在表层形成一定厚度砂层, 即表层砂层的形成原因为波浪后期改造作用。

4.2 密集砂层的形成原因探讨

在 2~2.45 m 深度处样品存在大量厚度为 1~2 cm 的密集砂层(图 3)。自然沉积状态下的沉积物会因河流输入泥沙性质变化及强烈波浪作用扰动而产生分层现象, 但各层间厚度较为稳定, 较少出现频繁分层现象。样品中密集砂层深度对应上节结论, 得到其形成时间应早于 1976 年, 这一时期黄河输沙量仍维持在较高水平, 尤其汛期输沙量基本达年输沙量的 90% 以上(图 6), 研究区在短时间内可获得大量泥沙供给并快速沉积, 但仅仅是这样不会形成密集砂层, 因此考虑液化作用的影响。研究区液化现象分布广泛, 在液化过程中往往伴随着孔隙水压力的累积, 相邻两点间的孔隙水压力差值造成的水力梯度产生渗流力, 渗流力引起水流动, 从而在海床内部形成向上的渗流力作用于泥沙颗粒上, 使泥沙发生启动向海床表层运移^[3]。土颗粒由此泵送^[18]到水体中被波浪带走, 造成细粒物质损失, 进而形成一定范围的粗颗粒层, 呈现表层粗化特征^[19]并形成砂层。

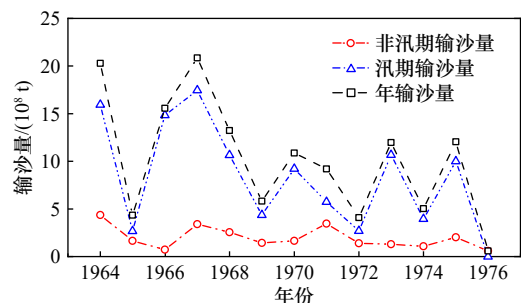


图 6 刁口河流路行水期间利津站输沙量统计
Fig. 6 Sediment discharge at Lijin Station during
Diakou River flow

值得注意的是, 海床液化大多发生在风暴潮期间, 其触发机制为波浪长期循环荷载, 在较小波浪的长期作用下会发生深度较小的表层液化^[20]。因此在

快速沉积阶段表层沉积物液化先形成厚度较小的砂层,砂层很快被新的沉积物覆盖,而新形成的海床表面在短期内再次液化,这一过程不断重复进而形成密集砂层(图7)。因此,密集砂层的存在也可成为对应沉积阶段沉积环境变化的佐证,用于分析重大沉积事件对应深度,为沉积速率的阶段划分提供相应依据。此外,在2.5~2.9 m、3.6~4.0 m等深度处未有明显密集砂层存在,应是因为这些深度对应阶段黄河输沙量不够高、未能达成快速沉积的条件或波浪等水动力条件较为稳定导致未能触发液化。

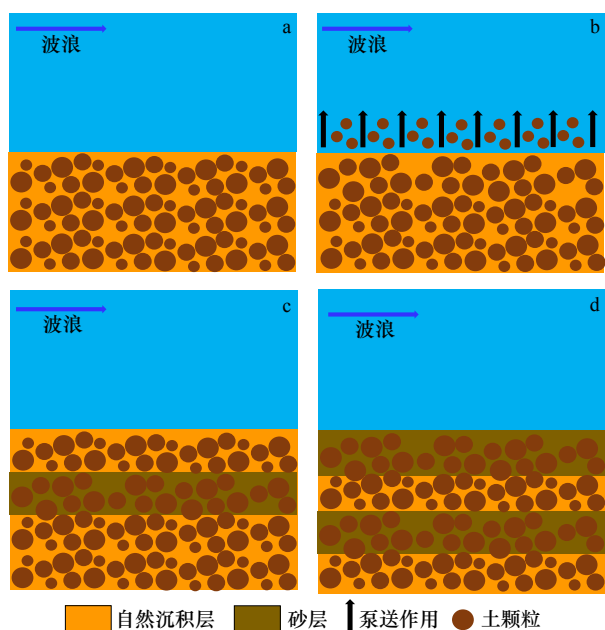


图7 密集砂层的形成过程
Fig. 7 Formation of dense sand layer

4.3 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 剖面提供的液化深度依据

样品在0.9 m深度处的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度由1.8 Bq/kg上升到11.4 Bq/kg(图4),同样深度处平均粒径由混乱状态过渡到平稳阶段,砂粒组分含量趋于稳定(图2)。在2.8 m、3.2 m、4.2 m深度处也有类似现象。土颗粒是沉积物中放射性核素的载体,比表面积大的细颗粒可以吸附更多核素。已有研究表明粒径与核素活度之间存在的关系,即细粒组分($< 32 \mu\text{m}$)与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 呈显著正相关^[21]。因此土颗粒在垂向上的迁移也可导致放射性核素 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 在土体内部的迁移,这一点已有学者找到相关证据证实了这一结论:Lu和Matsumoto^[22]发现三河湾取得的岩芯在10~55 cm处 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度呈现均一状态,无明显变化,对应算得的该深度时间为 $(2\ 000 \pm 3)$ 年,由此推断该现象是2000年日本东大海大洪水的证据;1984年在热带气旋多莫伊娜的作用下,南非姆库兹河漫滩地区遭受了大范围的

洪水,也因此在该地区取得的 ^{137}Cs 活度剖面1984年前后出现少量 ^{137}Cs 的迁移累积^[23]。

样品的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度剖面明显区别于理想衰减模型(图4a),呈现分段特征且各深度无明显衰减趋势,并在每一层段都对应了较高的 ^{137}Cs 活度(图4b)。类似分布模式在黄河三角洲其他样品中也有发现^[24],被称为核素的扩散效应,同时这种分布模式也可作为地层再沉积、再改造形成的沉积物混合层存在的证据^[25]。除 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度剖面外,在 ^{137}Cs 的1963年时标对应的3.74 m深度以下检测得到的活度也应为上述扩散效应的结果。结合上述结论推测是液化引起的土颗粒在垂向上的迁移导致了放射性核素 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 的扩散效应。样品总钻探深度为5 m,整段样品的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{137}Cs 活度剖面与理想衰减模型相去甚远,存在多处扰动及不规则的变化,因此该样品整段均发生过液化现象,历史深度至少5 m。

已有研究表明,在50年一遇的极端海况作用下黄河水下三角洲最大残余液化极限深度为4.2 m^[5]。此外,黄河水下三角洲上分布着大量的扰动地层,而风暴潮引起的土体液化是扰动土层的主要成因^[5],因此扰动地层的存在也可作为液化发生的证据。通过浅地层剖面调查获得的图像可以很好地看到扰动地层的范围及深度(图8),黄河水下三角洲扰动地层多分布于浅层5 m深度以内^[26],即前人通过数值模拟及物探等方式获得的研究区液化深度结果与上段得出的结论近乎一致,进一步证明了上述推断。继而得出结论以 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 活度剖面为工具对液化深度进行判定具有一定的可行性且能获得准确性较高的结果。

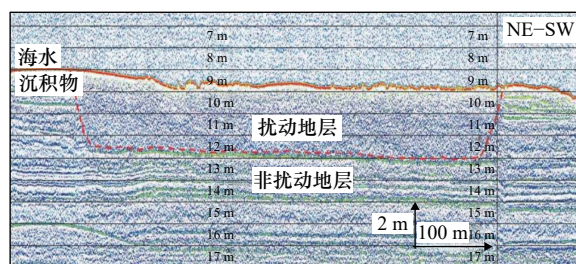


图8 浅地层剖面声学反射示意图(引自文献[26])
Fig. 8 The stratigraphic characteristics of disturbed strata
(according to exploration results of SES-2000)
(refer to reference [26])

5 结论

本文基于 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 、 ^{137}Cs 的活度剖面及粒度变化特征,结合样品剖面分层特征并与黄河改道事件进行联系,通过分析液化对沉积物内部的扰动机制探究了样

品历史液化深度。得出结论如下:

(1)由 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 计算获得的沉积速率以1.5 m和3.74 m为界分为3个阶段,分别反应了黄河三角洲稳定增长、快速蚀退、相对稳定3个阶段。样品1.5 m对应年龄为1976年改道清水沟事件,3.74 m同时也是 ^{137}Cs 的1963年时标所在深度,这一时期黄河改道至刁口河流向。初步说明了 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 、 ^{137}Cs 在黄河三角洲区域确定沉积环境的阶段性变化对应深度及年龄的可靠性。

(2)表层液化导致土体颗粒向上运移至水体中被波浪带走,造成细粒物质的损失进而形成砂层;在快

速沉积阶段液化现象频繁发生,砂层形成后很快被新的沉积物覆盖形成新的砂层,继而形成了厚度较小的密集砂层。

(3)海床液化导致土颗粒在垂向上的迁移引起了放射性核素 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 在沉积物内部的扩散效用,从而破坏了 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{137}Cs 活度剖面使之与理想衰减模型相去甚远。据此判定样品液化历史深度至少5 m,这一结论与前人研究结果存在较高相关性,说明以 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 活度剖面为工具对液化深度进行判定具有一定的可行性且能获得准确性较高的结果。

参考文献:

- [1] 师长兴. 1976年以来黄河口泥沙淤积与扩散分析[J]. 人民黄河, 2020, 42(9): 41-45, 111.
Shi Changxing. Sediment accumulation and dispersal in the Yellow River Mouth since 1976[J]. Yellow River, 2020, 42(9): 41-45, 111.
- [2] 赵冬冬, 成海燕, 林凡生, 等. 黄河三角洲海底滑坡诱发条件——以埤岛海区为例[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(7): 25-30.
Zhao Dongdong, Cheng Haiyan, Lin Fansheng, et al. Triggering factors of submarine landslide in the Yellow River Delta: take the Chengdao area as an example[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(7): 25-30.
- [3] 冷浩, 胡瑞庚, 刘红军, 等. 波浪作用下黄河三角洲硬壳层液化渗流形成机制研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(6): 1779-1787.
Leng Hao, Hu Ruigeng, Liu Hongjun, et al. Mechanism of liquefaction seepage of upper seabed layer in the Yellow River Delta under wave-current via numerical simulation[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(6): 1779-1787.
- [4] 刘志钦, 任宇鹏, 许国辉. 海底塌陷凹坑、扰动地层及再悬浮沉积物的波致土体液化成因探讨[J]. 海洋科学进展, 2021, 39(4): 548-556.
Liu Zhiqin, Ren Yupeng, Xu Guohui. Discussion on the origin of wave-induced liquefaction in collapse depression, disturbed stratum, re-suspended sediment[J]. Advances in Marine Science, 2021, 39(4): 548-556.
- [5] 孙永福, 董立峰, 宋玉鹏. 黄河水下三角洲粉质土扰动土层特征及成因探析[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1494-1499.
Sun Yongfu, Dong Lifeng, Song Yupeng. Analysis of characteristics and formation of disturbed soil on subaqueous delta of Yellow River[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1494-1499.
- [6] 常方强, 贾永刚. 波浪作用下埤岛海域粉质土海床的累积液化[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2013, 34(4): 434-438.
Chang Fangqiang, Jia Yonggang. Residual liquefaction of silt seabed induced by wave at the Chengdao sea area[J]. Journal of Huaqiao University (Nature Science), 2013, 34(4): 434-438.
- [7] 李凤业, 高抒, 贾建军, 等. 黄、渤海泥质沉积区现代沉积速率[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(4): 364-369.
Li Fengye, Gao Shu, Jia Jianjun, et al. Contemporary deposition rates of fine-grained sediment in the Bohai and Yellow seas[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(4): 364-369.
- [8] 宋莎莎, 孙永福, 宋玉鹏, 等. 黄河口水下三角洲刁口叶瓣的核素分布与沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2020, 40(3): 43-50.
Song Shasha, Sun Yongfu, Song Yupeng, et al. Nuclides distribution and sedimentary characteristics of the Diaokou course in Yellow River subaqueous delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2020, 40(3): 43-50.
- [9] 任寒寒. 黄河三角洲高分辨沉积记录及其对河道变迁和重大人类活动的响应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Ren Hanhan. High-resolution sedimentary records in the Yellow River Delta and their responses to the mouth migration and human activities[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [10] 王晓慧, 吴伊婧, 范代读. 福建兴化湾外近海 ^{210}Pb 法沉积速率及校正方法[J]. 古地理学报, 2019, 21(3): 527-536.
Wang Xiaohui, Wu Yijing, Fan Daidu. ^{210}Pb derived sedimentation rates in offshore area of the Xinghua Bay, Fujian Province, and proposed calibration method[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(3): 527-536.
- [11] 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.
- [12] 李燕妮, 李鹏, 吴晓, 等. 黄河口湿地时空变化过程及其主控因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(1): 68-80.
Li Yanni, Li Peng, Wu Xiao, et al. Tempo-spatial variation of wetlands at the Yellow River Mouth and its control factors[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(1): 68-80.
- [13] 吴晓, 范勇勇, 王厚杰, 等. 三角洲废弃河道演化过程及受控机制——以黄河刁口废弃河道为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(2): 22-29.
Wu Xiao, Fan Yongyong, Wang Houjie, et al. Evolution of abandoned deltaic river channel—A case from the Diaokou channel of the

- Yellow River[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(2): 22–29.
- [14] 王晓磊. 黄河三角洲北典型海域工程地质环境及粒度指示性分析 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Wang Xiaolei. The analysis of engineering geological environment and particle size indication in the northern Chengdao sea area of Yellow River Delta[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [15] 韩沙沙, 谈广鸣, 赵连军, 等. 黄河入海水沙情势变化分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2022(2): 1–5, 19.
Han Shasha, Tan Guangming, Zhao Lianjun, et al. An analysis of the latest variations of incoming water and sediment in the Yellow River Delta[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(2): 1–5, 19.
- [16] 林聪泳, 陈沈良, 李鹏, 等. 黄河三角洲北部近岸悬浮物季节性分布及驱动因素 [J]. *海洋学报*, 2021, 43(12): 152–160.
Lin Congyong, Chen Shenliang, Li Peng, et al. Seasonal distribution and driving forces of suspended particulate matter in the northern Yellow River Delta[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(12): 152–160.
- [17] Xie Weiming, Wang Xianye, Guo Leicheng, et al. Impacts of a storm on the erosion process of a tidal wetland in the Yellow River Delta[J]. *CATENA*, 2021, 205: 105461.
- [18] Zhang Shaotong, Jia Yonggang, Zhang Yaqi, et al. *In situ* observations of wave pumping of sediments in the Yellow River Delta with a newly developed benthic chamber[J]. *Marine Geophysical Research*, 2018, 39(4): 463–474.
- [19] 田动会, 滕珊, 冯秀丽, 等. 黄河三角洲北海域底质沉积物粒度特征及泥沙输运分析 [J]. *海洋学报*, 2017, 39(3): 106–114.
Tian Donghui, Teng Shan, Feng Xiuli, et al. Grain-size pattern of surface sediment and analysis of sediment transport in the Chengbei area of the Yellow River Delta[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(3): 106–114.
- [20] 房虹汝. 波浪作用下黄河口粉质土海床液化深度研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Fang Hongru. Study on the thickness of wave-induced liquefaction of submarion silty-bed in Yellow River Delta[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [21] Sun Xueshi, Fan Dejiang, Tian Yuan, et al. Normalization of excess ^{210}Pb with grain size in the sediment cores from the Yangtze River Estuary and adjacent areas: implications for sedimentary processes[J]. *The Holocene*, 2017, 28(4): 545–557.
- [22] Lu Xueqiang, Matsumoto E. Implications of excess ^{210}Pb and ^{137}Cs in sediment cores from Mikawa Bay, Japan[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(5): 707–712.
- [23] Humphries M S, Kindness A, Ellery W N, et al. ^{137}Cs and ^{210}Pb derived sediment accumulation rates and their role in the long-term development of the Mkuze River floodplain, South Africa[J]. *Geomorphology*, 2010, 119(1/2): 88–96.
- [24] Zhou Liangyong, Liu Jian, 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.
- [25] Song Shasha, Santos I R, Yu Huaming, et al. A global assessment of the mixed layer in coastal sediments and implications for carbon storage[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4903.
- [26] 文明征, 王振豪, 张博文, 等. 黄河水下三角洲浮泥层分布与扰动地层调查研究 [J]. *工程地质学报*, 2018, 26(S1): 677–683.
Wen Mingzheng, Wang Zhenhao, Zhang Bowen, et al. Survey on the distribution of fluid mud and disturbed strata on subaqueous Yellow River Delta[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(S1): 677–683.

Determination of sediment liquefaction depth based on ^{210}Pb , ^{137}Cs distribution and grain-size characteristic: Take the Chengdao sea area as an example

Sun Lu¹, Shan Hongxian^{1,2}, Zhang Hong^{1,3}, Liu Hanlu¹, Jia Yonggang^{1,2}

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China; 3. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The phenomenon of seabed liquefaction is widely distributed in the underwater delta of the Huanghe River, which poses a great threat to submarine engineering facilities. The determination of liquefaction depth can provide a reference for offshore engineering construction, which has great theoretical significance and application value. The columnar sediments were obtained by drilling in the liquefaction disturbance area of Chengdao sea area in the north of the Huanghe River Delta, and the profile image scanning, radionuclide and particle size composition testing were carried out to obtain the image stratification characteristics, ^{210}Pb , ^{137}Cs activity and particle size profile, and the deposition rate was calculated on this basis. The results show that the Chengdao sea area was significantly affected by the change of the Huanghe River from the Diaokou channel in 1976, and the sedimentation rate decreased significantly during this period and showed a phased character. During the rapid deposition period, the sand layer produced by frequent liquefaction of surface sediments accumulated continuously, thus forming the dense sand layer. By analyzing $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^{137}Cs activity profiles, the sedimentary records of liquefaction history in the study area were obtained, and the historical liquefaction depth was determined to be at least 5 m, which is similar to previous studies. It is feasible to use the activity of ^{210}Pb and ^{137}Cs as tools to judge the history and depth of sediment liquefaction, which has great development potential.

Key words: Huanghe River subaqueous delta; radionuclide; particle size characteristics; liquefaction depth