

蔡瑞兮, 张宇凡, 张涛, 等. 东海内陆架泥质区台风沉积辨识的指标与方法研究[J]. 海洋学报, 2023, 45(9): 58–71, doi:10.12284/hyxb2023145

Cai Ruixi, Zhang Yufan, Zhang Tao, et al. Study of indicators and methods for identifying typhoon deposits in the muddy belt of inner shelf of the East China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(9): 58–71, doi:10.12284/hyxb2023145

东海内陆架泥质区台风沉积辨识的指标与方法研究

蔡瑞兮¹, 张宇凡¹, 张涛¹, 杨阳^{1,2*}

(1. 南京师范大学海洋科学与工程学院, 江苏南京 210023; 2. 自然资源部滨海盐沼湿地生态与资源重点实验室, 江苏南京 210007)

摘要: 台风是当今人类社会面临的全球性重大环境灾害问题之一, 但由于台风器测年限较短, 限制了对台风长期演化机制的研究。沉积记录成为拓展台风记录时间跨度的重要载体, 其中台风沉积的有效辨识是重要基础。尽管许多研究试图基于各种指标和方法来重建长时间尺度的台风活动, 但目前仍缺少对台风沉积辨识指标与方法有效性的评估。本文以高分辨率的东海内陆架泥质区 ZM02 孔为载体, 采用放射性同位素²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 定年法确定沉积物的年代序列。耦合器测记录和沉积记录, 分析器测时期台风强度和频率与台风沉积敏感指标(如砂含量和 D_{90})之间的对应关系, 以期探讨台风沉积辨识指标和方法的有效性。结果显示, ZM02 孔的平均沉积速率为 0.97 cm/a, 其上部 4.5~100 cm 的沉积年代为 1917–2011 年。砂含量和 D_{90} 均可作为东海内陆架泥质区台风沉积辨识的有效指标, 阈值法的识别效果最好且稳定性高。砂含量可能是反映浙江海岸台风强度变化的潜在指标, 而 D_{90} 则可能蕴含台风频率信息。这些认识有助于更准确地利用沉积记录去拓展台风记录的时间跨度, 也有助于提高从沉积记录解译环境信息的能力。

关键词: 台风频率; 台风强度; 沉积记录; 器测记录; 识别指标; 东海内陆架

中图分类号: P736.21[†]; P722.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)09-0058-14

1 引言

台风(本文泛指热带气旋)是全球发生频率最高、影响最严重的一种自然灾害, 是当今社会所面临的重大全球性问题之一^[1]。近年来, 随着人口和社会财富向沿海地区的快速聚集, 台风灾害的破坏加剧, 海岸带风险管理的压力日益增大^[2]。因此, 全球变暖背景下台风活动的未来变化受到了科学界的广泛关注^[3-4]。“我们是否能够更准确地预测台风等灾害性事件”更被列为了 2021 年上海交通大学与 *Science* 杂志联合发布的 125 个最具挑战的科学问题之一。

器测记录和模型结果显示, 气候变暖背景下全球

台风总频数减少, 但强台风频数和强度显著增加^[5-6]。这一研究结论引发了国际台风界对台风活动趋势及其归因的激烈争议: 一是全球范围内的台风活动是否发生了显著变化^[7-8], 二是近年来台风活动异常是全球气候变暖的必然结果^[3,9], 还是台风年代际周期性变化的反映^[10-11]。出现上述争论的主要原因是台风器测年限太短, 对台风生成、发展和演化的复杂机制认识不足, 很难获得未来台风活动变化的可靠论断。为了更好地掌握台风活动规律, 亟需延长台风记录的时间序列。沉积记录的解译正好在时间尺度上弥补了上述不足, 可成为拓展台风记录时间跨度的重要载体。

古风暴学在这一背景下应运而生, 始于 20 世纪

收稿日期: 2022-11-25; 修订日期: 2023-04-06。

基金项目: 自然资源部滨海盐沼湿地生态与资源重点实验室开放基金(KLCSMERMNR2021001); 国家自然科学基金(42276050); 南京师范大学交叉学科项目(164320H1847)。

作者简介: 蔡瑞兮(2002—), 女, 天津市人, 主要从事海洋沉积学研究。E-mail: 27200145@njnu.edu.cn

* 通信作者: 杨阳, 男, 副教授, 主要从事古风暴学和海洋沉积动力学研究。E-mail: yyang@njnu.edu.cn

90年代,通过研究历史文献和沉积记录,重建器测时代之前几百年至数千年的古台风活动规律^[12]。近几十年来,国内外学者对墨西哥湾沿岸、大西洋沿岸、澳大利亚海岸、长江三角洲和南海等地区进行了全新世古风暴学研究,得到了一些重要认识^[13-17]。利用沉积记录研究古台风变化规律,台风沉积的有效辨识是重要基础。国内外学者通常采用不同的方法对沉积记录中的台风沉积进行识别,如参数变率法^[17-18]、粒度参数峰值结合地化元素法^[19]和阈值法^[20]等。粒度参数是台风沉积识别中最常用的参数,且受台风频率和/或强度的共同影响^[17,21-22]。然而,上述研究缺乏对这3种识别方法的对比和有效性研究,通常也无法厘清粒度参数究竟代表的是台风活动的哪种信息(如台风频率或强度)。这限制了台风器测记录与沉积记录的直接量化对比,也就难以结合古台风记录评估当前变暖背景下台风活动的状态是否超出历史阈值。耦合分析百年尺度的器测和沉积记录,可为评估台风沉积辨识指标与方法的有效性提供极大助力,也可进一步提高台风沉积研究的准确性和水平。

我国是台风登陆最多的国家之一,全球变暖下台风活动变化给我国的海岸防护带来了新的挑战。然而,欲提高沿海地区的台风应对效率,必须进一步加强台风器测和沉积记录的耦合研究,从而科学地确定海岸防护标准。本文以受台风影响显著的东海内陆

架泥质区为研究区(图1),通过器测记录和沉积记录耦合的思路,综合分析了器测时期台风强度和频率与台风沉积敏感指标之间的对应关系,评估了台风沉积识别指标和方法的有效性。

2 研究区概况

研究区位于东海内陆架的浙闽沿岸泥质区,受大河影响显著,沉积物供应丰富^[23]。浙闽沿岸泥质区是长江三角洲的重要组成部分,分布在长江入海口以南、水深60 m以浅的浙闽沿岸一带^[24]。该泥质区沿东北-西南方向呈条带状分布,厚度为0~40 m,沉积速率较高,为0.2~1.8 cm/a,呈现自北向南逐步减小的趋势^[25]。东海大陆架坡度较缓,年均水温在20~24℃之间,常年遭受台风侵袭。所选研究地点为浙闽沿岸泥质区北部,其从邻近陆地接收大量河流沉积物,包括长江、台湾山地河流以及浙江-福建沿岸河流^[26]。研究区环流主要由台湾暖流和浙闽沿岸流所主导(图1),且浙闽沿岸流受季风影响显著,夏季影响范围小,冬季扩展范围最大^[27-28]。

3 材料和方法

3.1 样品采集和器测数据来源

2018年5月,在浙闽沿岸泥质区使用重力采样器采集1根643 cm的钻孔ZM02(27°18.06'N, 121°28.08'E,

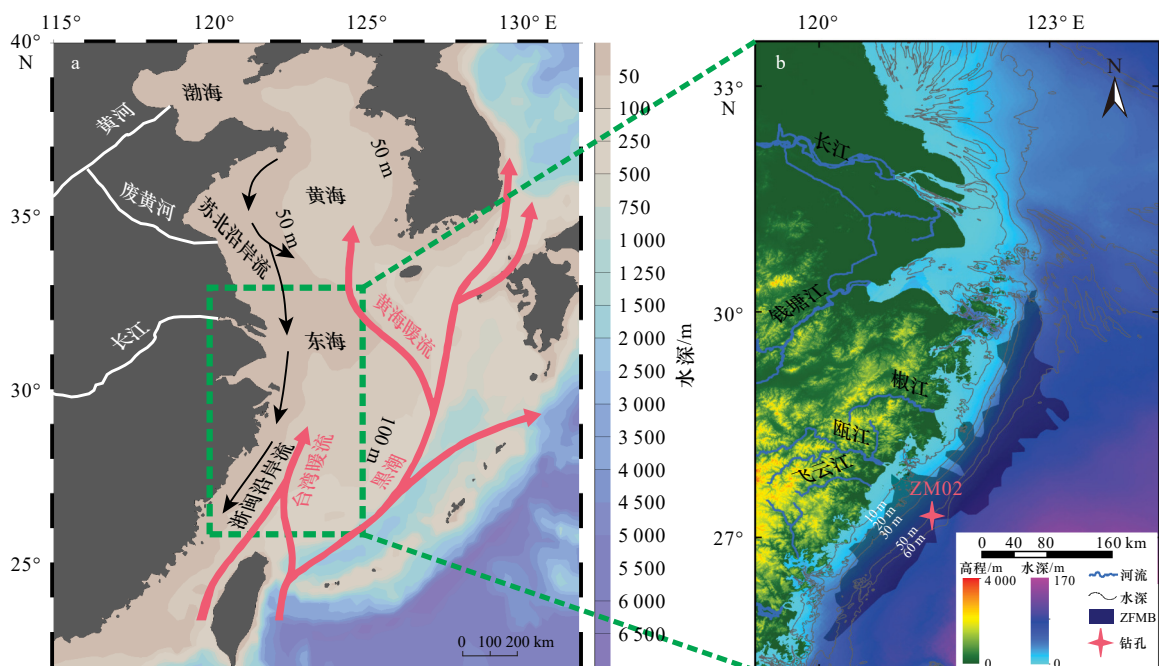


图1 研究区概况(a)及钻孔位置(b)

Fig. 1 Maps showing the study area (a) and the sampling location (b)

ZFMB: 浙闽沿岸泥质区

ZFMB: Zhejiang-Fujian mud belt

图 1), 取样地水深约 52 m。将样品冷藏保存, 带回实验室后使用岩芯切割机纵向剖开, 拍照, 并进行岩芯特征描述。本文所使用的器测热带气旋最佳路径数据集来自中国气象局热带气旋资料中心(tcdata.typhoon.org.cn), 包含 1949–2021 年西北太平洋海域热带气旋中心每 6 h 的位置和强度^[29–30]。基于该数据集, 采用 Xu 等^[31] 建立的中国东部海域热带气旋数据库, 计算了影响浙江 (27°~31°N, 120°~124°E) 和 ZM02 孔的风速大于 10.8 m/s 的台风频数。

3.2 地球化学元素扫描

X 射线荧光光谱仪 (X-Ray Fluorescence, XRF) 岩芯扫描分析方法是一种应用于沉积物元素分析的新兴研究方法, 其具体原理及适用性可参考文献 [32–33]。本研究使用 Avaatech 公司生产的 XRF 进行地球化学元素的扫描, 在厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室完成。仪器设置参数如下: 电压依次设定为 10 kV、30 kV、50 kV, 电流为 500 μ A, 时间为 10 s, 扫描步长为 5 mm。最终获得 Al、Zr、Fe、Ca、Sr 等多种元素的扫描数据。在进行扫描之前, 为了避免污染岩芯扫描仪的测量棱镜, 需要首先将岩芯的表面整平, 并包裹上一层 4 μ m 厚的 Ultralene 薄膜^[34]。为了确保分析过程中的信号稳定性, 需要在岩芯扫描前后分析 4 种标样以检测信号是否漂移。

3.3 粒度分析

岩芯以 1 cm 间隔进行分样, 在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室进行粒度分析。首先取适量代表性样品放入烧杯中, 加入 10~20 mL 浓度为 0.05 mol/L 的六偏磷酸钠 ($[\text{NaPO}_3]_6$) 溶液对样品进行分散。预处理后的样品放入 Malvern Mastersizer-2000 型激光粒度仪, 超声震荡 15 s 后进行粒度测试。该仪器的测量范围为 0.02~2 000 μ m, 误差小于 1%。对粒度分析结果按照 1/4 粒径间隔分组, 采用矩值法公式^[35] 计算粒度参数, 其中包括平均粒径、分选系数、偏态和峰态系数。

3.4 ^{210}Pb - ^{137}Cs 测年

在岩芯上部 110 cm 共取 21 个子样, 采用井型超低本底高纯锗 Gamma 能谱仪 (型号 GSW275L, 美国 Canberra 公司) 进行放射性活度检测。本项工作在华东师范大学河口海岸学国家重点实验室完成。 ^{210}Pb 是一种半衰期为 22.3 a 的天然放射性同位素。沉积物中的 ^{210}Pb 主要来源: 一是 ^{222}Rn 衰变中间产物 ^{222}Rn 的衰变子体进一步衰变的产物, 以大气沉降形式进入沉积物中, 这部分的 ^{210}Pb 称为过剩 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$); 二是沉积物中本身含有的 ^{226}Ra 原位衰变生成 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$)。

^{210}Pb 在理想情况下随着柱样深度具有指数单调递减规律。根据 Appleby 和 Oldfield^[36] 提出的恒定比活度 (Constant Initial Concentration) 模式, 计算了浙闽沿岸泥质区柱状样沉积物的平均沉积速率 (SR, 单位: cm/a) 和年龄, 表示为

$$t = \lambda^{-1} \ln(A_0 - A), \quad (1)$$

$$\text{SR} = Z/t, \quad (2)$$

式中, t 为某一深度 Z (单位: cm) 的年龄; λ 为 ^{210}Pb 的衰变常数 (取 0.03114 a^{-1}); A_0 是 ^{210}Pb 在初始深度处对应的过剩比活度; A 即 ^{210}Pb 在深度 Z 处对应的过剩比活度。

^{137}Cs 是一种人为产生的放射性核素。自 1954 年第一次核试验以来, 核爆炸产生的 ^{137}Cs 进入全球循环, 并通过大气扩散-沉降作用输入地表和海洋环境中, 即为 1954 年初始时标。全世界大气层核试验集中在 1961–1963 年, 因此 1963 年可作为沉积物 ^{137}Cs 峰值的一个计年时标。未参加核禁试条约国家的地上核试验使 1971–1974 年成为 ^{137}Cs 沉积的又一相对集中时期。1974 年散落沉降对应 1975 年沉积物层, 因而大部分陆架泥质区沉积物中均有 1975 年的 ^{137}Cs 沉积物计年标志^[37]。1986 年切尔诺贝利核事故则导致沉积物中 ^{137}Cs 的新一轮峰值出现, 同样可作为一个计年时标^[38–39]。

3.5 台风沉积识别方法

根据前人在浙闽泥质区的研究^[21, 40], 粒径大于 63 μ m 的粗颗粒含量 (即砂含量) 是台风沉积的敏感粒度指标。此外, D_{90} 为样品的累计粒度分布数达到 90% 时所对应的粒径, 可以直观地反映粗颗粒的变化, 也可有效指示岩芯中异常粗颗粒沉积事件^[41]。本文将采用下述 3 种不同的技术方案, 分别根据沉积记录中这两个敏感指标的特征构建识别方法, 采用 6 种方法进行台风事件识别。

3.5.1 ROC 法

参数变率 (Rate of Change, ROC) 法^[18, 41] 是对指标和时间序列的结合分析。首先提取并列年份以及与之相对应的砂含量和 D_{90} 这两个敏感指标, ROC 法即用相邻两个时间段的敏感指标之差除以时间之差。参考 Ercolani 等^[42] 使用的方法, 为避免出现常态沉积造成的噪声误差, 将超过 ROC 上四分位数的数据视为极端异常值, 并将这些异常值排除在 ROC 数据集外, 重新计算该数据集平均值和标准偏差, 并将其平均值定义为背景沉积。超过背景平均值一个标准偏差的 ROC 结果即认为是一个潜在的台风事件。

3.5.2 粒度参数峰值-地化法

杨照祥等^[19] 建立了浙闽泥质区台风沉积事件的

识别程序,即通过沉积物敏感粒度指标峰值结合地化元素的方法来识别台风沉积事件(简称粒度参数峰值-地化法)。本文中使用粗沉积颗粒的指示元素(Zr、Sr、Ca)与细沉积颗粒的指示元素(Fe、Al)及其比值(Zr/Fe、Sr/Al和Ca)来进行辅助识别。首先,根据砂含量和 D_{90} 这两个敏感指标与其平均值的对比,筛选出粗颗粒事件层。再对Zr/Fe进行判断,若Zr/Fe呈现较为异常的大值,则判断其为由锆石组成的台风沉积;若Zr/Fe未呈现异常大值,但Sr/Al呈现异常大值则判断其为由非锆石组成的台风沉积。参考Ercolani等^[42]使用的方法,通过计算元素比值背景,来确定其是否为异常大值。将超过元素比值上四分位数的数据视为极端异常值,并将这些异常值排除在数据集外,重新计算该数据集平均值和标准偏差,并将其平均值定义为背景沉积,认为超过背景平均值一个标准偏差的元素比值呈现出异常大值。

3.5.3 阈值法

根据Lane等^[20]和Wallace等^[43]的研究,根据台风沉积敏感指标的阈值,可有效将台风沉积层与背景沉积区分开,简称阈值法。首先,我们从砂含量和 D_{90} 这两个敏感指标的原始数据中去除5点滑动平均值来计算粗颗粒异常值。然后,将所有异常值按照大小排序,计算其累积分布函数,并将累积频率68%(即1倍标准偏差偏离)所对应的粗颗粒含量异常值作为阈值,大于此阈值者被认为是台风事件成因。

4 结果

4.1 年代模型

利用过剩 ^{210}Pb 比活度和深度进行线性拟合时,发现较高的过剩 ^{210}Pb 比活度发生在钻孔顶部的约4~5 cm处,推断可能是受水动力条件的影响发生混合所导致的。因此,除去0 cm与4.5 cm两个数据点后进行分析。在110 cm处,作为背景值的 ^{226}Ra 大于总 ^{210}Pb 比活度($^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$)。此外,大约在40.5 cm和70.5 cm处, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的斜率发生了明显的变化。为保证年代模型的准确性,依据 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的分布情况,分为3段(8.5~40.5 cm、40.5~70.5 cm、70.~109.5 cm)计算沉积速率,拟合曲线 R^2 分别为0.77、0.81和0.82。根据拟合结果,确定该岩芯3段的沉积速率分别为1.37 cm/a、0.47 cm/a和1.05 cm/a(图2),平均沉积速率为0.97 cm/a,与前人研究相吻合^[19,44]。此外,在110 cm处,作为背景值的 ^{226}Ra 比活度大于 $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ 比活度,用该定年方法得出的沉积速率将不再可靠。本文分析主要集中在ZM02孔上部4.5~100 cm之间,其对应的年代约为

1917~2011年。

由 ^{137}Cs 比活度的垂向分布可见,柱状样中的 ^{137}Cs 比活度在80.5 cm被初次检测到,但之后却降低到检测限以下,不能代表初始 ^{137}Cs 比活度之信号,即1954年时标。随后, ^{137}Cs 比活度在60.5 cm被第二次检测到,且之后呈现持续上升趋势,判断该层代表的是1954年初始 ^{137}Cs 比活度之信号。此外0~60.5 cm之间, ^{137}Cs 比活度波动起伏,峰值不明显,无法准确判断1963年等时标,仅20.5 cm处的峰值明显。前人研究表明,1963年时标对应的 ^{137}Cs 比活度峰值应该是最小的^[22],显然不符合这里20.5 cm处的峰值,因此在本文中不考虑其时标意义。由1954年这个计年时标计算得出的平均沉积速率为0.94 cm/a,与 ^{210}Pb 比活度计算得出的60.5 cm的年代(1953~1954年)较为吻合,进一步证明了我们所建立年代框架的可靠性。

4.2 沉积物粒度和地化元素特征

沉积物的黏土、粉砂和砂含量平均值为12.4%、86.1%和1.5%。平均粒径在5.9~8.4 μm 之间,平均值为7.0 μm 。分选系数在2.8~4.1之间,平均值为3.0,分选差。偏度在-0.6~0.8之间,平均值约为-0.3,属于负偏。峰态在2.7~4.5之间,平均值为2.9,属于很宽。如图3所示,有6个层位(27 cm、59 cm、65 cm、84 cm、92 cm、94 cm)的平均粒径、分选系数、偏度、峰态都出现较为明显的极大值,砂含量增加。

Zr通常以碎屑的形式富集于粗颗粒沉积物中^[45],而Fe元素更容易富集在细颗粒沉积物中^[46-47],较大的Zr/Fe可以有效指示沉积物柱样中的异常粗颗粒沉积事件。Sr作为海源性元素,通常在含有贝壳碎屑和钙质微生物等粗颗粒沉积物中含量较高^[47],Al元素更容易附着在细颗粒沉积物上^[48],Sr/Al也可以帮助识别沉积记录中的台风事件^[49]。考虑到Sr和Ca的亲缘性,较大的Sr丰度也可能指示原地生长的生物壳类碎屑,引入Ca可以辅助粒度和Zr/Fe指标,来进一步判断沉积序列中的风暴事件沉积^[49]。总体来说,由图4可以明显看出,Zr/Fe、Sr/Al和Ca丰度自下而上呈现波动上升的趋势,与平均粒径大小呈现正相关同步变化。

4.3 台风器测结果

直到20世纪80年代初,卫星观测才更广泛地用于台风监测,热带气旋频率和强度的趋势分析在20世纪80年代之前一直存在较大问题^[7]。因此,本文对器测记录的分析选择1980~2011年这个时间段,该时间段也在柱状样定年的可用范围之内。1980~2011年间,影响ZM02孔处的台风事件有85次,影响

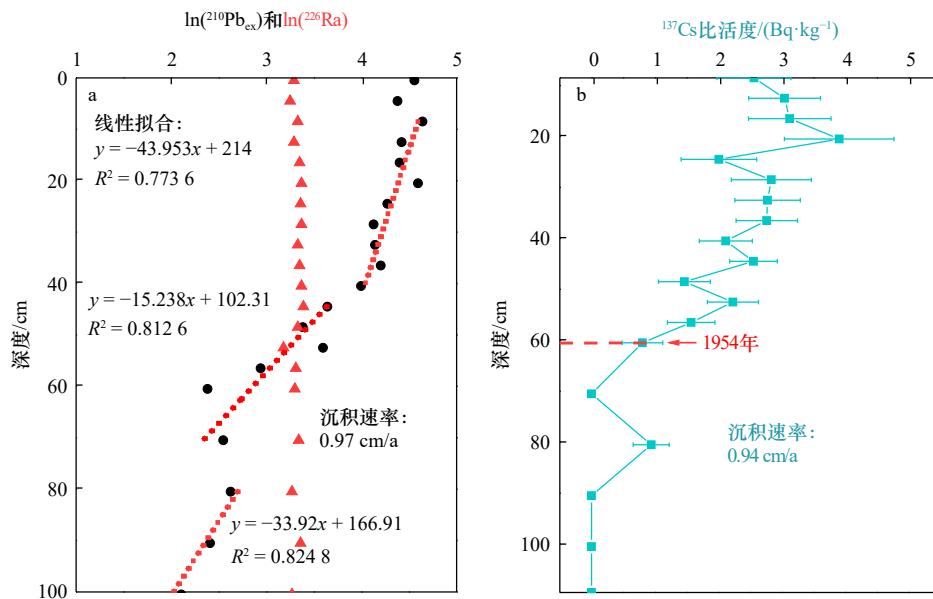


图 2 ZM02 孔过剩²¹⁰Pb 比活度对数、²²⁶Ra 比活度对数(a)和¹³⁷Cs 比活度(b)的垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of logarithm of ²¹⁰Pb_{ex} specific activity (a), ²²⁶Ra specific activity, and ¹³⁷Cs specific activity (b) of Core ZM02

比活度单位为 Bq/kg

The unit of specific activity is Ba/kg

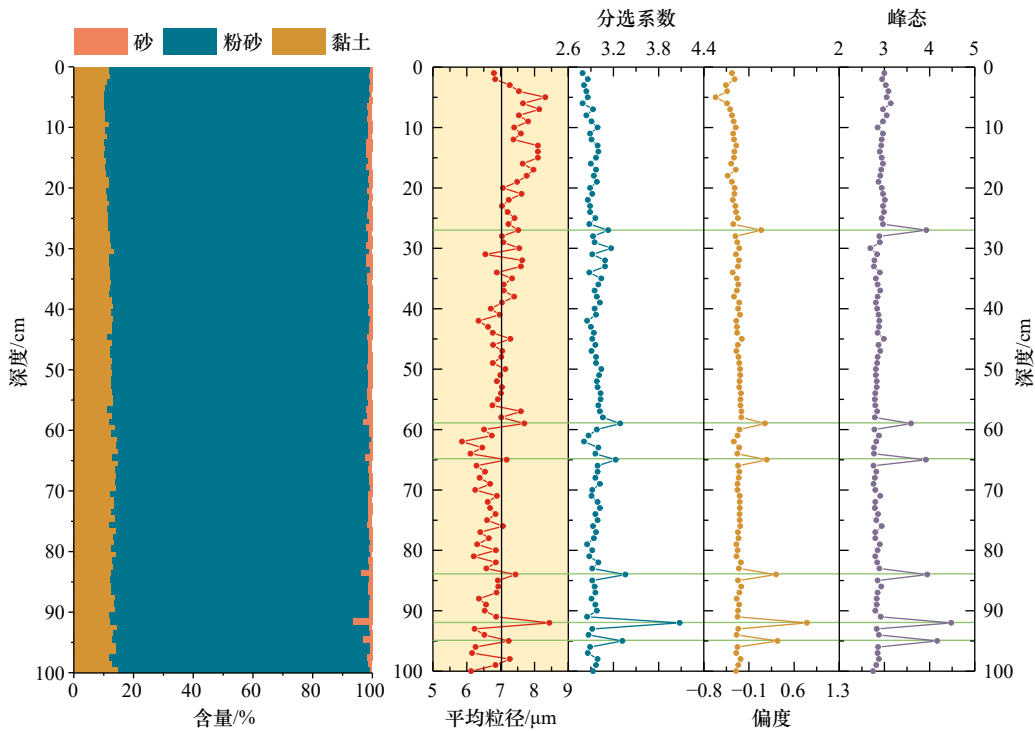


图 3 ZM02 孔沉积物粒度组分与粒度参数垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of grain size composition and grain size parameters of Core ZM02

浅绿色横向条带为异常层序

The horizontal light-green horizontal lines indicate abnormal layers

浙江沿海区域的台风事件有 140 次,影响西北太平洋的台风事件有 948 次。在西北太平洋产生的台风中仅有 15% 会到达浙江沿海区域,而在其中又有

61% 会影响 ZM02 孔。影响浙江沿海的台风主要属于西北太平洋西北-北向路径,其台风频率约占整个西北太平洋台风的 34%^[50]。影响浙江沿海的和西北

太平洋产生的台风频数与强度虽然没有显示出明显的相关性, 但当西北太平洋台风频数和强度较大时, 影响浙江沿海的台风频数和强度也会处于较高水平

4.4 6种识别方法的对比

在钻孔 ZM02 的 0~100 cm, 3种技术方案 6种方

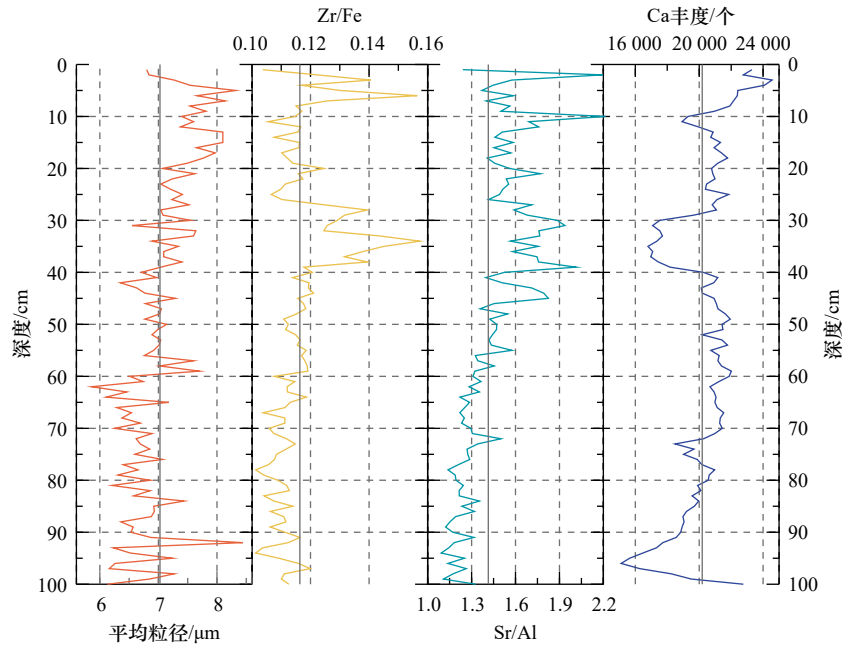


图 4 ZM02 孔平均粒径、Zr/Fe、Sr/Al 及 Ca 元素丰度垂直分布
Fig. 4 Vertical distributions of mean grain size, Zr/Fe, Sr/Al and Ca abundance from Core ZM02

灰色实线为各指标的平均值

The solid gray lines indicate the average value of each parameter

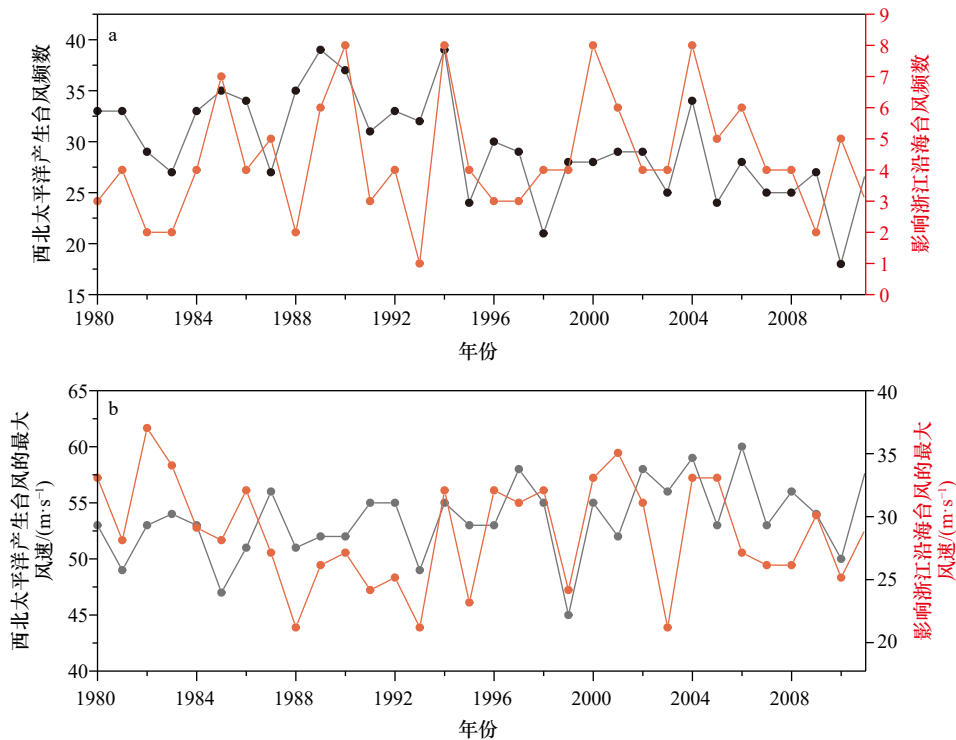


图 5 西北太平洋产生与影响浙江沿海的台风频数(a)、近中心最大风速(b)对比
Fig. 5 Comparison of typhoons frequency (a) and near-center maximum wind speed (b) between the northwestern Pacific and the Zhejiang coast

表 1 基于 6 种方法的台风沉积的识别结果

Table 1 Identification results of typhoon event layers based on six methods

技术方案	敏感指标	0~100 cm 识别台风事件层	1980-2011 年期间识别台风事件层	1980-2011 年期间识别效率/%
粒度参数峰值-地化法	D_{90}	23	8	26.7
	砂含量	18	5	16.7
ROC 法	D_{90}	34	7	23.3
	砂含量	20	2	6.7
阈值法	D_{90}	32	9	30.0
	砂含量	31	9	30.0

法的关系及所识别的台风沉积次数如表 1 所示。根据 D_{90} 的粒度参数峰值-地化法(图 6a), 识别出 5 cm、9 cm、12 cm 等 23 个具有异常粗颗粒的层位, 即沉积记录中识别出 23 次潜在的台风事件层。其中 5 cm、9 cm、12 cm 等 14 个层位中, Zr/Fe 均超过平均值, 可判断出该层位是由锆石组成的台风沉积; 17 cm、25 cm、45 cm 等 9 个层位中 Zr/Fe 未超过平均值, 但 Sr/Al、Ca 含量均超过平均值, 判断出这些层位是由非锆石组成的台风沉积。根据砂含量的粒度参数峰值-地化法(图 6b), 识别出 9 cm、17 cm、21 cm、25 cm 等 18 个异常粗颗粒的层位, 为 6 种方法中识别潜在台风事件次数最少的方法。其中, 9 cm、21 cm、27 cm 等 10 个层位被识别为由锆石组成的台风沉积; 17 cm、25 cm 等 8 个层位被识别为由非锆石组成的台风沉积。

根据砂含量和 D_{90} 的 ROC 法, 在 0~100 cm 分别识别出 34 和 20 个异常层位, 如图 7 所示, 两个敏感指标的 ROC 法识别结果相差较大。根据 D_{90} 阈值法, 识别出 5 cm、7 cm、10 cm、13 cm 等 32 个超过粗异常累积分布函数的 68% 阈值(即 0.54 μm)的异常层位。根据砂含量阈值法, 共识别出 4 cm、7 cm、9 cm、10 cm 等 31 个超过粗颗粒异常累积分布函数 68% 阈值(即 0.07%)的异常层位(图 7)。

在 6 种方法中, 共有 18 个层位被砂含量和 D_{90} 的粒度参数峰值-地化法共同识别到, 占 D_{90} 的粒度参数峰值-地化法的 78%, 占砂含量的粒度参数峰值-地化法的 100%; 共有 19 个层位被这两个指标的 ROC 法共同识别到, 占 D_{90} 的 ROC 法的 56%, 占砂含量的 ROC 法的 95%; 共有 27 个层位被这两个指标的阈值法共同识别到, 占 D_{90} 的阈值法的 84%, 占砂含量的阈值法的 87%(图 8)。通过 D_{90} 识别时, 共有 11 个层位被 3 种技术方案共同识别到, 有 24 个层位被 ROC 法和阈值法共同识别到; 通过砂含量识别时, 共有 8 个层

位被 3 种技术方案共同识别到, 有 15 个层位被 ROC 法和阈值法共同识别到。上述结果表明, 阈值法和 ROC 法对于台风沉积的识别具有较高的重叠性。此外, D_{90} 的识别结果都多于砂含量, 显示出其台风辨识的优势性。在 3 种技术方案中, 阈值法的识别效果最优且稳定性最好, ROC 法和粒度参数峰值-地化法识别效果次之。在 6 种方法中, D_{90} 的 ROC 法和阈值法识别效果最优, 分别识别出 34 次和 32 次潜在的台风事件层; 砂含量的阈值法和 D_{90} 的粒度参数峰值-地化法的识别效果次之, 分别识别出 31 次和 23 次潜在的台风事件层; 砂含量的粒度参数峰值-地化法和 ROC 法仅识别出 18 次和 20 次潜在的台风事件层, 其识别效果在 6 种方法中最差。

5 讨论

为了进一步探讨台风识别指标和方法的有效性, 我们将 1980-2011 年的台风器测数据与 6 种台风识别结果进行了对比分析。ZM02 孔的平均沉积速率为 0.97 cm/a, 1 cm 间隔的粒度数据对应的时间分辨率约为 1 年。我们所识别的 1 cm 的台风事件层代表的是 1 年中对 ZM02 孔有影响的台风所造成的瞬时沉积和常态沉积叠加的结果。因此, 我们从 1 cm 的台风事件层中难以解译出年台风频数的信息, 在将沉积记录与器测记录进行耦合分析时, 只能进行年分辨率的对比。在 1980-2011 年这 32 年中, 除了 1993 年和 1999 年, 每年均有台风影响 ZM02 钻孔, 理论上应该形成 30 个台风事件层。但是, 台风事件层的形成取决于研究区受台风频率高低、强度大小和路径远近等的综合影响^[21, 40, 43], 并非有台风影响就一定能形成台风事件层。1980-2011 年期间, 根据 D_{90} 和砂含量这两个敏感指标, 粒度参数峰值-地化法分别识别出 8 年和 5 年有台风影响的事件层, ROC 法分别识别出 7 年和 2 年, 阈值法均识别出 9 年。6 种方法都没有

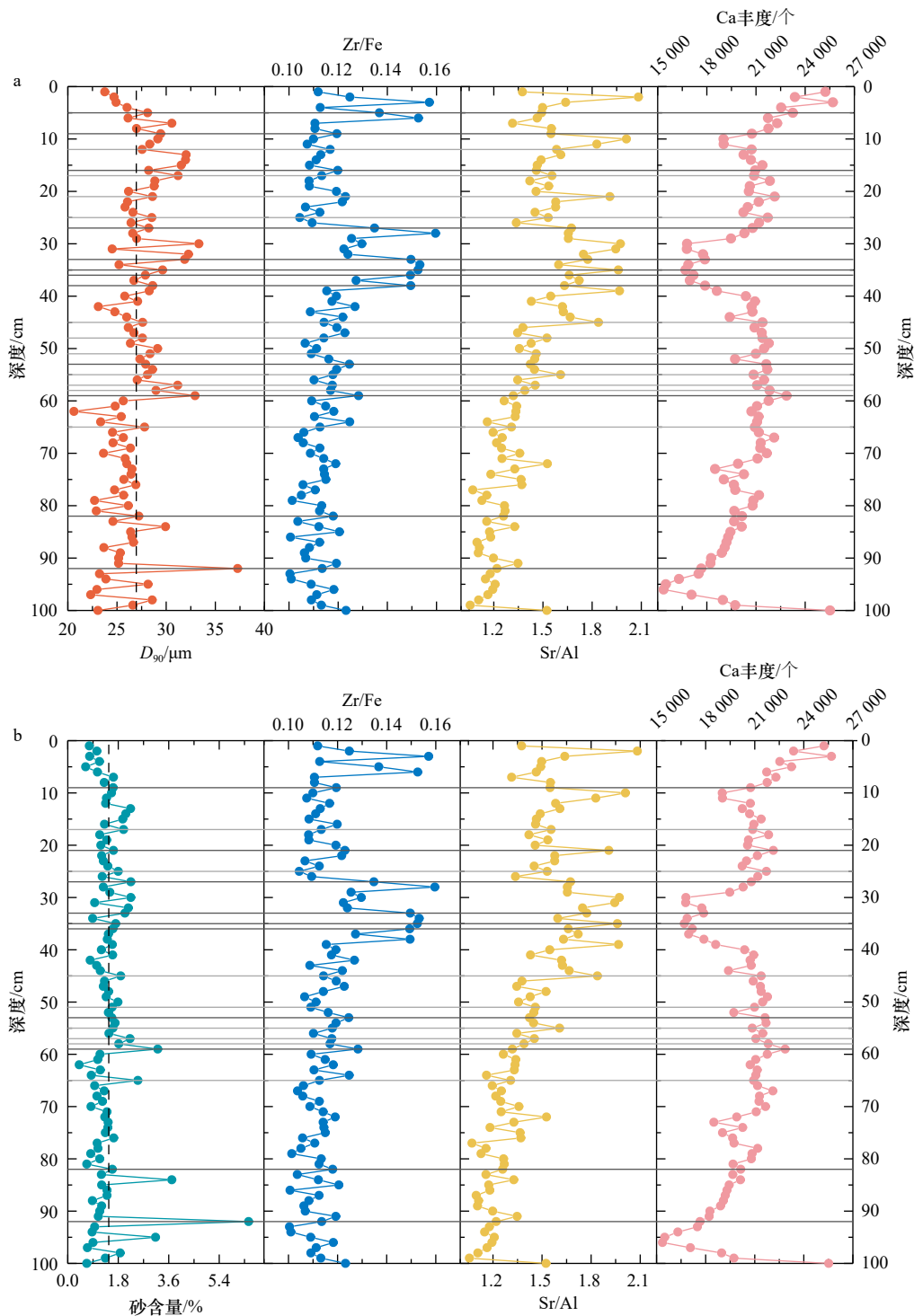


图6 通过粒度参数峰值-地化法 D_{90} (a)和砂含量(b)识别的台风层序

Fig. 6 Typhoon event layer identified by D_{90} (a) and sand content (b) using peaks of grain size parameters-geochemical method

深灰色横线代表由锆石组成的台风沉积, 浅灰色横线代表由非锆石组成的台风沉积

The dark gray horizontal lines represent typhoon deposits composed of zircons and the light gray horizontal lines represent typhoon deposits composed of non-zircons

识别到1993年和1999年存在台风事件层。因此,以30年作为基数,6种方法的识别效率分别为26.7%、16.7%、23.3%、6.7%、30.0%和30.0%(表1)。

耦合器测记录和沉积记录分析表明,砂含量和

D_{90} 这两种指标在3种技术方案中的平均识别结果分别为5.3年和8年, D_{90} 的识别效率基本优于砂含量。在3种技术方案中,阈值法的识别效果最好且稳定性最优,粒度参数峰值-地化法次之,ROC法最低,其平

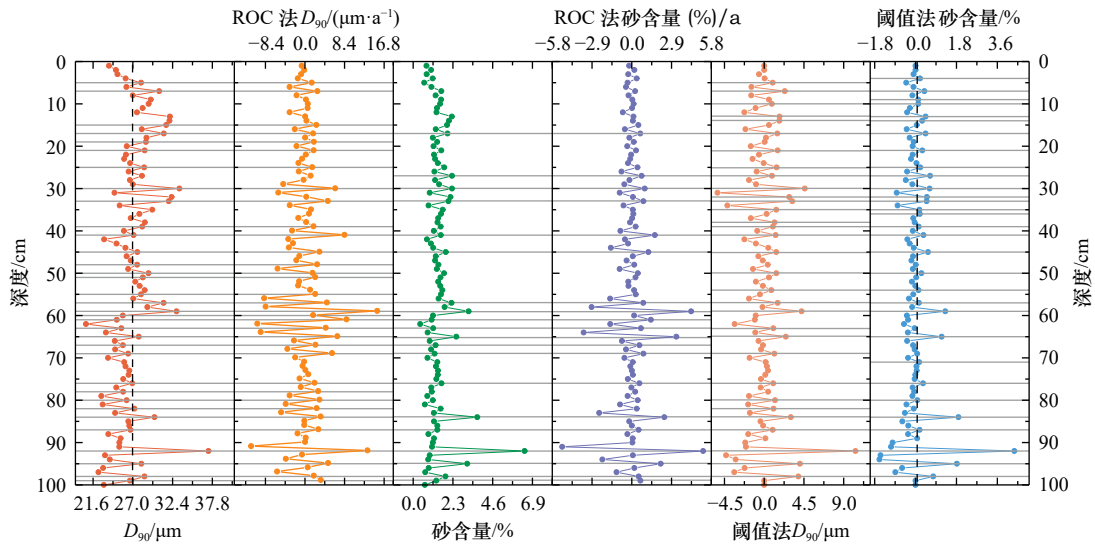


图7 使用ROC法与阈值法通过 D_{90} 和砂含量识别台风层序

Fig. 7 Typhoon event layer identified by D_{90} and sand content using ROC and threshold methods

ROC法测得的 D_{90} 和砂含量是 D_{90} 和砂含量相对于年份的变化率

The D_{90} and sand content measured by ROC method is the change rate of D_{90} and sand content relative to the year

均识别效果为9年、6.5年和4.5年,识别效率分别为30.0%、21.7%和15.0%。ROC法可有效识别出环境的快速变化,但对时间分辨率具有较高的要求^[18],可能对更高时间分辨率沉积记录的识别效果更好。在6种方法中,砂含量和 D_{90} 的阈值法识别效果最好,均识别出9年台风事件层; D_{90} 的粒度参数峰值-地化法和ROC法的识别效果次之,分别识别出了8年和7年台风事件层;砂含量的粒度参数峰值-地化法和ROC法仅识别出5年和2年的台风事件层,其识别效果在6种方法中最差。上述结果表明,阈值法通过砂含量和 D_{90} 的识别效果最好,砂含量和 D_{90} 均可作为浙闽沿岸泥质区台风沉积识别的有效指标。Zhou等^[21]和Yang等^[40]在浙闽沿岸泥质区的研究结果也证实了砂含量指标的台风识别效果。此外,Yang等^[17]研究结果发现, D_{90} 也是江苏潮滩台风沉积识别的有效指标。综上所述,粒度参数峰值-地化法、ROC法和阈值法各有优势,但阈值法识别效果最好且稳定性高,在实际应用中建议采用多指标阈值法识别并辅助一种以上的方法进行相互验证。

根据上述结论,我们选择多指标阈值法并辅以峰值-地化法对识别结果进行再次分析。两种指标阈值法识别出10个台风事件层,峰值-地化法在其结果上辅助识别了两个台风事件层,共计识别出12个台风事件层。台风事件层的形成与台风的频率、强度和路径等有密切关系^[21, 40, 43]。将6种方法的识别结果置于影响浙江沿海的台风频数和强度的柱状图上(图8)

可以看出,砂含量和 D_{90} 阈值法识别的台风事件期间的影响浙江沿海的台风频数平均值(5.3、5.3)与台风强度平均值(30.5 m/s、31.4 m/s)均大于1980–2011年期间影响浙江沿海的台风频数平均值(4.2)与台风强度平均值(29.0 m/s),说明台风的频数与强度确实对台风沉积层的形成有重要影响。在这12个事件层中:(1)有5个事件层(1994年、2000年、2001年、2004年、2005年)所对应年份台风频率与强度均高于浙江沿海的平均值,这两个因素都易使钻孔周围沉积物出现明显的粗化现象,有利于台风事件层的形成;(2)有2个事件层(1989年和2010年)所对应年份台风频率高于平均值、强度低于平均值,虽然这两年台风强度并不高但路径更靠浙江^[51],在高频率台风累积影响下,仍可在钻孔处形成台风事件层;(3)有4个事件层(1980年、1983年、1996年、1998年)所对应年份台风频率低于平均值、强度高于平均值,这表明影响钻孔的台风频率低但强度大,可对钻孔附近沉积物产生较大影响,也可形成台风事件层;(4)有1个事件层(2008年)所对应年份台风频率与强度均低于平均值,虽然这两个因素都不利于事件层的形成,但如果台风路径更靠近钻孔位置也可形成台风事件层;例如,2008年的0807号台风在福建沿岸登陆^[52]、0815号台风沿浙江海岸北上,都经过了钻孔所在的位置,所以即使2008年影响浙江沿海的频数和强度都较低,但路径近仍使钻孔周围的沉积物产生了粗化现象,并形成了台风事件层。此外,在其他年份中,虽有

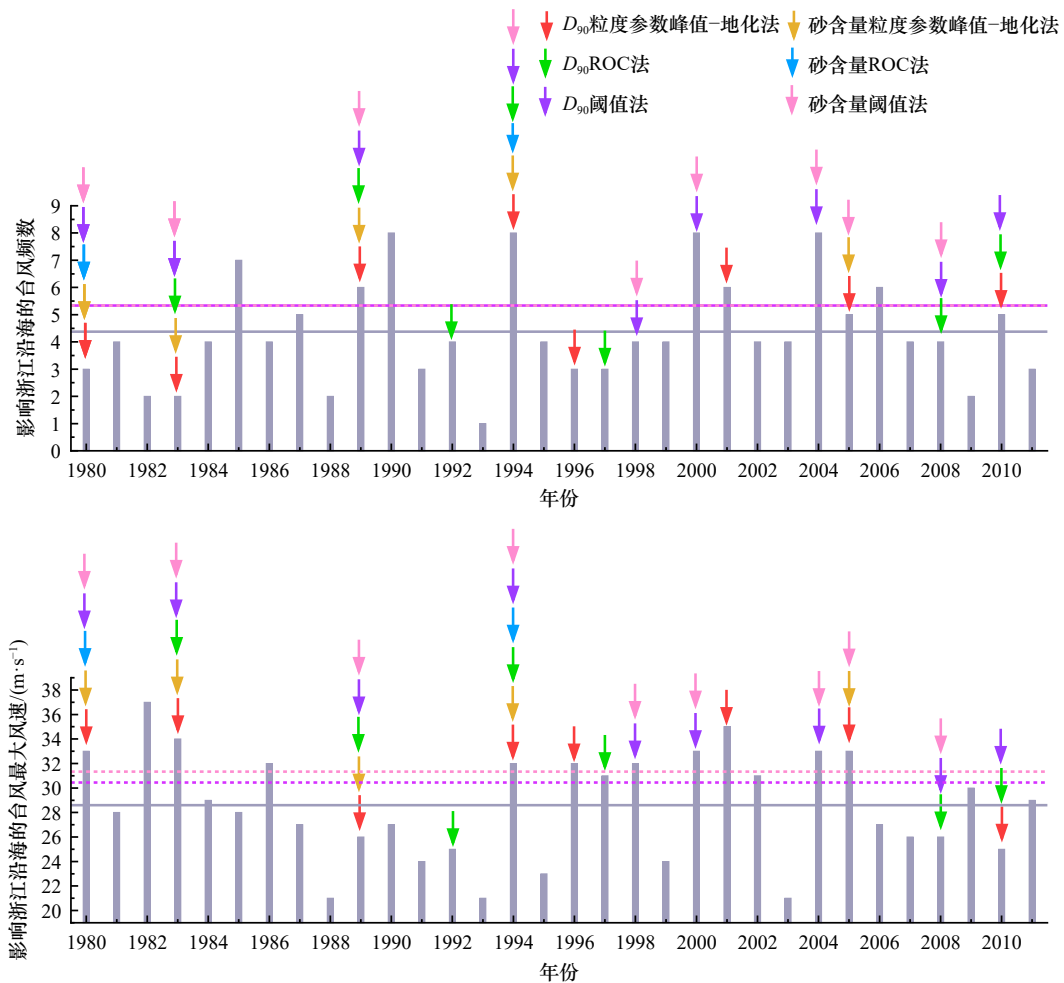


图8 1980–2011年影响浙江沿海的台风频数和强度与6种方法的识别结果对比

Fig. 8 Comparison of the frequency and intensity of typhoons affecting the Zhejiang coast with the identification results of the six methods from 1980 to 2011

灰色横线为1980–2011年影响浙江沿海的台风频数和最大风速的平均值;紫色和粉色虚线分别为 D_{90} 和砂含量阈值法识别的台风事件层期间影响浙江沿海的台风频数和最大风速的平均值

The gray horizontal lines represent the average values of typhoon frequency and maximum wind speed affecting the Zhejiang coast from 1980 to 2011; the purple and pink horizontal lines represent the average values of typhoon frequency and maximum wind speed for the typhoon event layer identified by the threshold method of D_{90} and sand content, respectively

台风的影响,但并没有形成台风事件层,主要原因可能是研究区在台风频率、强度和路径等的综合影响下不足以在钻孔附近形成事件层。例如,其中有7年对应的台风频率与强度均低于浙江沿海的平均值,且没有出现年份台风频率与强度均高于平均值而没有形成事件层的情况。

另外,根据器测台风频率和强度信息与台风沉积敏感指标(如 D_{90} 和砂含量)的对比,可有效判断台风沉积敏感指标究竟代表的是台风活动的哪种信息。影响浙江沿海的台风频数与 D_{90} 显著相关($R=0.43$, $p=0.02$)(图9b),但与砂含量的相关性较弱。Zhou等^[21]和Yang等^[40]通过研究浙闽沿岸泥质区北部钻孔(T08和ZM01)的台风记录表明,砂含量是该区台风

强度的有效指标,并经过了器测数据的验证。我们的结果也表明,影响浙江沿海的台风强度与砂含量显著相关($R=0.48$, $p=0.01$)(图9d),但与 D_{90} 的相关性较弱。综上分析,我们认为砂含量可能是反映浙江海岸台风强度变化的潜在指标,而 D_{90} 则可能蕴含台风频率信息,未来仍需要更多的钻孔和器测记录进行验证。

6 结论

本文以高分辨率的东海内陆架泥质区沉积为载体,通过耦合台风器测记录与沉积记录,探讨了台风沉积辨识指标和方法的有效性,得到以下结论:

(1) ZM02孔的平均沉积速率为0.97 cm/a,其上部4.5~100 cm的沉积年代为1917–2011年。

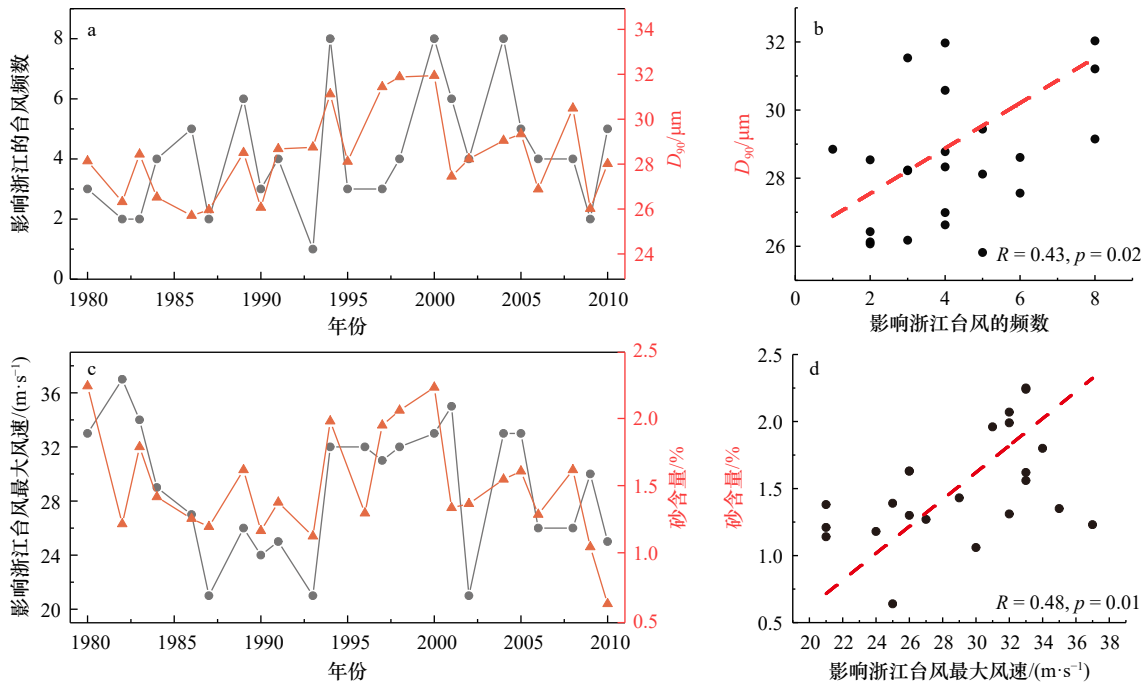


图9 影响浙江的台风频数与 D_{90} (a, b) 和影响浙江的台风最大风速与砂含量 (c, d) 对比

Fig. 9 Comparison of near-center maximum wind speed of the typhoon with D_{90} (a, b) and sand content (c, d) affecting the Zhejiang coast

(2) 砂含量和 D_{90} 均可作为东海内陆架泥质区台风沉积辨识的有效指标。在3种技术方案中, 阈值法的识别效果最好且稳定性高, 在实际应用中建议采用多指标阈值法识别并辅助一种以上的方法进行相互验证。

(3) 砂含量可能是反映浙江海岸台风强度变化的潜在指标, 而 D_{90} 则可能蕴含台风频率信息。未来应注重古台风沉积记录的器测对比和校准, 实现台风器

测记录和沉积记录的直接量化对比, 推进古今气候与环境的融合研究。

致谢: 徐超然帮助进行了台风器测数据的计算, 厦门大学田莉老师为岩芯扫描实验提供了帮助, 艾乔、杨照祥、赵培培、薛成凤、梅亚萍, 刘桢峤、刘胜景等人协助进行野外采样和实验, 在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Peduzzi P, Chatenoux B, Dao H, et al. Global trends in tropical cyclone risk[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(4): 289–294.
- [2] Brown S, Nicholls R J, Hanson S, et al. Shifting perspectives on coastal impacts and adaptation[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(9): 752–755.
- [3] Emanuel K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years[J]. *Nature*, 2005, 436(7051): 686–688.
- [4] Bhatia K T, Vecchi G A, Knutson T R, et al. Recent increases in tropical cyclone intensification rates[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 635.
- [5] Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al. Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment[J]. *Science*, 2005, 309(5742): 1844–1846.
- [6] Mei Wei, Xie Shangping, Primeau F, et al. Northwestern Pacific typhoon intensity controlled by changes in ocean temperatures[J]. *Science Advances*, 2015, 1(4): e1500014.
- [7] Landsea C W, Harper B A, Hoarau K, et al. Can we detect trends in extreme tropical cyclones?[J]. *Science*, 2006, 313(5786): 452–454.
- [8] Knutson T, Camargo S J, Chan J C L, et al. Tropical cyclones and climate change assessment: Part I: detection and attribution[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100(10): 1987–2007.
- [9] Sobel A H, Camargo S J, Hall T M, et al. Human influence on tropical cyclone intensity[J]. *Science*, 2016, 353(6296): 242–246.
- [10] Chan J C L. Comment on “Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment”[J]. *Science*, 2006, 311(5768): 1713.
- [11] Zhao Jiuwei, Zhan Ruifen, Wang Yuqing, et al. Untangling impacts of global warming and Interdecadal Pacific Oscillation on long-term variability of North Pacific tropical cyclone track density[J]. *Science Advances*, 2020, 6(41): eaba6813.
- [12] Liu K B. Paleotempestology: principle, methods, and examples from Gulf Coast lake sediments[M]//Murnane R J, Liu K. Hurricanes and Typhoons: Past, Present, and Future. New York: Columbia University Press, 2004: 13–57.

- [13] Donnelly J P, Woodruff J D. Intense hurricane activity over the past 5, 000 years controlled by El Niño and the West African monsoon[J]. *Nature*, 2007, 447(7143): 465–468.
- [14] 廖淦标, 范代读. 全球变暖是否导致台风增强: 古风暴学研究进展与启示[J]. *科学通报*, 2008, 53(19): 2907–2922.
Liao Ganbiao Fan Daidu. Perspectives on the linkage between typhoon activity and global warming from recent research advances in paleotempestology[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(19): 2907–2922.
- [15] 田翠翠, 余克服. 古风暴研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2011, 31(4): 171–177.
Tian Cuicui, Yu Kefu. Advances in the study of paleotempestology[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2011, 31(4): 171–177.
- [16] 高抒, 贾建军, 杨阳, 等. 陆架海岸台风沉积记录及信息提取[J]. *海洋学报*, 2019, 41(10): 141–160.
Gao Shu, Jia Jianjun, Yang Yang, et al. Obtaining typhoon information from sedimentary records in coastal-shelf waters[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(10): 141–160.
- [17] Yang Yang, Piper D J W, Normandeau A, et al. A late Holocene shift of typhoon activity recorded by coastal sedimentary archives in eastern China[J]. *Sedimentology*, 2022, 69(2): 954–969.
- [18] Støren E N, Dahl S O, Nesje A, et al. Identifying the sedimentary imprint of high-frequency Holocene river floods in lake sediments: development and application of a new method[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(23/24): 3021–3033.
- [19] 杨照祥, 薛成凤, 杨阳, 等. 百年尺度东海内陆架风暴事件重建: 器测记录与沉积记录耦合[J]. *海洋学报*, 2020, 42(7): 119–129.
Yang Zhaoxiang, Xue Chengfeng, Yang Yang, et al. A 100-year reconstruction of typhoon events on the inner shelf of the East China Sea: coupling of meteorological observations and sedimentary records[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(7): 119–129.
- [20] Lane P, Donnelly J P, Woodruff J D, et al. A decadal-resolved paleohurricane record archived in the late Holocene sediments of a Florida sinkhole[J]. *Marine Geology*, 2011, 287(1/4): 14–30.
- [21] Zhou Xin, Liu Zhonghui, Yan Qing, et al. Enhanced tropical cyclone intensity in the western North Pacific during warm periods over the last two millennia[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(15): 9145–9153.
- [22] Tian Yuan, Fan Dejiang, Zhang Xilin, et al. Event deposits of intense typhoons in the muddy wedge of the East China Sea over the past 150 years[J]. *Marine Geology*, 2019, 410: 109–121.
- [23] Gao Shu, Wang Dandan, Yang Yang, et al. Holocene sedimentary systems on a broad continental shelf with abundant river input: process-product relationships[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2016, 429(1): 223–259.
- [24] 汪亚平, 贾建军, 杨阳, 等. 长江三角洲蓝图重绘的基础科学问题: 进展与未来研究[J]. *海洋科学*, 2019, 10(10): 1–12.
Wang Yaping, Jia Jianjun, Yang Yang, et al. Fundamental scientific issues for the Changjiang River Delta associated with the new blueprint of future development: overview and prospect[J]. *Marine Sciences*, 2019, 10(10): 1–12.
- [25] Gao Jianhua, Shi Yong, Sheng Hui, et al. Rapid response of the Changjiang (Yangtze) River and East China Sea source-to-sink conveying system to human induced catchment perturbations[J]. *Marine Geology*, 2019, 414: 1–17.
- [26] Liu Xiting, Li Anchun, Dong Jiang, et al. Provenance discrimination of sediments in the Zhejiang-Fujian mud belt, East China Sea: implications for the development of the mud depo-center[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 151: 1–15.
- [27] 王翠, 郭晓峰, 方婧, 等. 闽浙沿岸流扩展范围的季节特征及其对典型海湾的影响[J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(1): 1–8.
Wang Cui, Guo Xiaofeng, Fang Jing, et al. Characteristics of seasonal spatial expansion of Fujian and Zhejiang Coastal Current and their bay effects[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, 37(1): 1–8.
- [28] Yang Yang, Xu Min, Jia Jianjun, et al. Human-induced asynchronous sedimentary records between the north and south of the Changjiang distal mud belt since 2005 CE[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, 262: 107578.
- [29] Ying Ming, Zhang Wei, Yu Hui, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287–301.
- [30] Lu Xiaoqin, Yu Hui, Ying Ming, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(4): 690–699.
- [31] Xu Chaoran, Yang Yang, Zhang Fan, et al. Spatial-temporal distribution of tropical cyclone activity on the eastern sea area of China since the late 1940s[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, 277: 108067.
- [32] 吴兰军, 黎刚. XRF岩心扫描估算海洋沉积物有机碳含量的适用性[J]. *热带海洋学报*, 2022, 41(2): 112–120.
Wu Lanjun, Li Gang. The estimation of organic contents in marine sediments based on bromine intensity by the XRF scanner[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(2): 112–120.
- [33] 成艾颖, 余俊清, 张丽莎, 等. XRF岩芯扫描分析方法及其在湖泊沉积研究中的应用[J]. *盐湖研究*, 2010, 18(2): 7–13.
Cheng Aiyang, Yu Junqing, Zhang Lisha, et al. XRF core scanning and applications on lake sediments[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2010, 18(2): 7–13.
- [34] Hennekam R, de Lange G. X-ray fluorescence core scanning of wet marine sediments: methods to improve quality and reproducibility of high-resolution paleoenvironmental records[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2012, 10(12): 991–1003.
- [35] McManus J. Grain size determination and interpretation[M]//Tucker M. *Techniques in Sedimentology*. Oxford: Blackwell, 1988: 63–85.
- [36] Appleby P G, Oldfield F. The assessment of ^{210}Pb data from sites with varying sediment accumulation rates[J]. *Hydrobiologia*, 1983, 103(1): 29–35.
- [37] 曾理, 吴丰昌, 万国江, 等. 中国地区湖泊沉积物中 ^{137}Cs 分布特征和环境意义[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(1): 1–9.

- Zeng Li, Wu Fengchang, Wan Guojiang, et al. The distribution characteristic and environmental significance of Cesium-137 deposit profile in Chinese lacustrine sediment[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(1): 1–9.
- [38] 万国江. 现代沉积年分辨的¹³⁷Cs计年——以云南洱海和贵州红枫湖为例[J]. *第四纪研究*, 1999(1): 73–80.
Wan Guojiang. ¹³⁷Cs dating by annual distinguish for recent sedimentation: samples from Erhai Lake and Hongfeng Lake[J]. *Quaternary Sciences*, 1999(1): 73–80.
- [39] 夏威岚, 薛滨. 吉林小龙湾沉积速率的²¹⁰Pb和¹³⁷Cs年代学方法测定[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(1): 124–125.
Xia Weilan, Xue Bin. The ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs chronological measurement on sedimentation rate of Xiaolongwan, Jiling[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(1): 124–125.
- [40] Yang Yang, Piper D J W, Xu Min, et al. Northwestern Pacific tropical cyclone activity enhanced by increased Asian dust emissions during the Little Ice Age[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 1712.
- [41] Yang Yang, Zhou Liang, Normandeau A, et al. Exploring records of typhoon variability in eastern China over the past 2 000 years[J]. *GSA Bulletin*, 2020, 132(11/12): 2243–2252.
- [42] Ercolani C, Muller J, Collins J, et al. Intense Southwest Florida hurricane landfalls over the past 1 000 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 126: 17–25.
- [43] Wallace E J, Donnelly J P, van Hengstum P J, et al. 1, 050 years of hurricane strikes on Long Island in the Bahamas[J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2021, 36(3): e2020PA004156.
- [44] 刘升发, 石学法, 刘焱光, 等. 东海内陆架泥质区沉积速率[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(6): 1–7.
Liu Shengfa, Shi Xuefa, Liu Yanguang, et al. Sedimentation rate of mud area in the East China Sea inner continental shelf[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(6): 1–7.
- [45] Scheffler K, Buehmann D, Schwark L. Analysis of late Palaeozoic glacial to postglacial sedimentary successions in South Africa by geochemical proxies—Response to climate evolution and sedimentary environment[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 240(1/2): 184–203.
- [46] 赵一阳, 喻德科. 黄海沉积物地球化学分析[J]. *海洋与湖沼*, 1983(5): 432–446.
Zhao Yiyang, Yu Deke. Geochemical analysis of the sediments of the Huanghai Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1983(5): 432–446.
- [47] 高文华. 南黄海内陆架沉积物扩散过程的示踪方法[D]. 南京: 南京大学, 2015.
Gao Wenhua. Sediment dispersal processes on the southern Yellow Sea continental shelf: tracer methods[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [48] 韩瑞. 浑善达克沙地全新世气候变化研究[D]. 太原: 山西大学, 2020.
Han Rui. Climate change in Otindag sandy land during the Holocene[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2020.
- [49] Karageorgis A P, Kaberi H, Price N B, et al. Chemical composition of short sediment cores from Thermaikos Gulf (Eastern Mediterranean): sediment accumulation rates, trawling and winnowing effects[J]. *Continental Shelf Research*, 2005, 25(19/20): 2456–2475.
- [50] Mei Wei, Xie Shangping. Intensification of landfalling typhoons over the Northwest Pacific since the late 1970s[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(10): 753–757.
- [51] 石蓉蓉, 雷媛, 王东法, 等. 1949–2007年影响浙江热带气旋灾情分析及评估研究[J]. *科技通报*, 2008, 24(5): 612–616.
Shi Rongrong, Lei Yuan, Wang Dongfa, et al. Analysis and assessment of TC disaster influencing Zhejiang Province from 1949 to 2007[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2008, 24(5): 612–616.
- [52] 朱业, 丁骏, 卢美, 等. 1949–2009年登陆和影响浙江的热带气旋分析[J]. *海洋预报*, 2012, 29(2): 8–13.
Zhu Ye, Ding Jun, Lu Mei, et al. Analysis of the tropical cyclones landing in Zhejiang Province during 1949–2009[J]. *Marine Forecasts*, 2012, 29(2): 8–13.

Study of indicators and methods for identifying typhoon deposits in the muddy belt of inner shelf of the East China Sea

Cai Ruixi¹, Zhang Yufan¹, Zhang Tao¹, Yang Yang^{1,2}

(1. School of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Key Laboratory of Coastal Salt Marsh Ecosystems and Resources, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210007, China)

Abstract: Typhoons are one of the major global environmental disasters, and their variability is of great concern to modern society. However, the variability of typhoon activity and its climate drivers on centennial-millennial scales are less clear due to the lack of atmospheric instrumental records before the mid-19th century. Coastal sedimentary archives provide a means to extend our knowledge of typhoon dynamics, of which the effective identification of typhoon event layers is an important foundation. Although many studies have attempted to reconstruct typhoon activity on long time scales using various indicators and methods, there is still a lack of evaluation of the effectiveness of these indicators and methods for the identification of typhoon event layer. In this study, a high-resolution sedimentary record (Core ZM02) from the muddy belt of inner shelf of the East China Sea was used, and its dating framework was determined using ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs dating methods. The instrumental and sedimentary records were then coupled to analyze the correspondence between typhoon intensity and frequency and sensitivity indicators of typhoon deposits (i.e., sand content and D_{90} in this study). The results show that the upper 4.5–100 cm of the core dates between 1917 and 2011 AD at a sedimentation rate of 0.97 cm/a. Among the three technical solutions, the threshold method was found to have the best identification and highest stability. Both sand content and D_{90} were found to be effective indicators for the identification of typhoon deposits in the study area. Sand content may be a potential indicator of typhoon intensity variation along the Zhejiang coast, and D_{90} contains information on typhoon frequency. The knowledge obtained here will not only contribute to the more accurate use of the sedimentary record to extend the time span of the typhoon record, but also to improve the ability to decipher information from the sedimentary record.

Key words: frequency of typhoons; intensity of typhoons; sedimentary records; instrumental records; indicators of identification; inner shelf of the East China Sea