

文章编号: 1000-0550(2013)04-0639-07

# 福建罗源湾潮滩沉积过程对人类活动和台风事件的响应<sup>①</sup>

王爱军 叶翔

(国家海洋局第三海洋研究所 海岸与海洋地质环境开放实验室 福建厦门 361005)

**摘要** 潮滩地区是人类活动和台风事件影响最为显著的地区之一,利用潮滩沉积记录可以提取影响区域重大人类活动和台风事件的历史变化。罗源湾潮滩中上部盐沼和光滩柱状沉积物粒度分析结果显示,罗源湾潮滩沉积物以细颗粒为主,盐沼内部和潮滩中上部光滩柱状沉积物平均粒径分别为 5.41~45.00  $\mu\text{m}$  和 5.4~68.82  $\mu\text{m}$ ,但在不同深度出现多次沉积物变粗的现象;利用<sup>210</sup>Pb 测试计算得到的沉积速率分别为 1.96 cm/a 和 1.23 cm/a;近年来的围填海活动导致潮间带地区沉积速率显著增大,互花米草的引种也进一步导致潮间带上部沉积速率增大。台风的强烈影响使得潮间带沉积出现间断,在沉积间断界面出现沉积物粒度变粗的现象,由此推断了近 170 年来显著影响罗源湾地区的台风事件沉积层的位置,并由此计算了不同时间段的沉积速率。根据柱状沉积物粒度分析结果,不仅可以反演百年来的对罗源湾产生重要影响的台风事件,也可以反演 20 世纪 50 年代以来罗源湾经历的几次较大规模的人类活动。

**关键词** 潮滩 人类活动 台风事件 沉积记录 罗源湾

**第一作者简介** 王爱军 男 1977 年出生 博士 副研究员 海洋沉积动力学 E-mail: ajwang@163.com

**中图分类号** P736.21 **文献标志码** A

## 0 引言

潮滩作为陆海相互作用最为频繁、复杂的地区之一,也是台风由海上向陆地推进的转折点,台风登陆期间改变了潮滩的沉积动力过程、沉积结构和潮滩演化过程<sup>[1~5]</sup>。通过提取潮滩沉积记录可以反演台风信息<sup>[6]</sup>。此外,潮滩还是最早成为人类活动的重点区域之一<sup>[7~9]</sup>。随着人类活动强度逐渐增大,潮滩资源与环境遭到了严重的破坏,已经引起了相关国际组织和沿海国家政府与科学界的高度重视和普遍关注,海岸带陆海相互作用(LOICZ)明确提出将以地球系统科学的观点,重点探讨人类活动影响下的海岸带物质循环过程、系统演化过程以及对未来海岸带开发的意义<sup>[10]</sup>。

福建省是我国遭受台风最为严重的沿海省市之一,也是最早从事潮滩开发活动的地区之一,沿海港湾众多,湾内多发育淤泥质潮滩。罗源湾位于福建东北部沿海,属半封闭海湾,受周边地形地貌的影响,湾内潮滩沉积环境相对稳定,能够较好地记录沉积环境演化过程及相应的事件,因此是研究潮滩沉积环境演化对人类活动和台风事件响应的理想场所。本文通过对罗源湾潮间带中上部的盐沼和盐沼前缘光滩地

区柱状沉积物样品的分析,尝试提取潮滩沉积记录中有关人类活动和对该地区产生重大影响的台风事件信息,为潮滩演化及相关资源合理开发利用提供科学依据。

## 1 研究区概况

罗源湾位于福建省东北部沿海,整个海湾被罗源半岛和黄歧半岛环抱,湾口宽仅 2 km,是一个典型的半封闭海湾,属构造成因海湾。罗源湾岸线曲折多样,海湾总面积 230 km<sup>2</sup>,大潮低潮线以下的水域面积 105 km<sup>2</sup>,潮间带湿地面积占约 62%<sup>[11]</sup>。罗源湾海域潮汐形态数为 0.28,属正规半日潮,平均潮差为 5.14 m,最大潮差为 7.47 m,最小潮差为 2.27 m;每年 7~9 月为台风季节,对罗源湾地区造成了较大的影响,平均每年有 5.5 次台风影响到罗源湾地区<sup>[12]</sup>。

根据卫星遥感资料及现场调查,罗源湾内盐沼湿地主要发育在海湾西侧及西南侧,宽度约 2~5 km,滩面平缓,一般坡度小于 0.1%,潮水沟比较发育,多呈树枝状分布,沉积物主要由黏土质粉砂组成,潮间带地貌分带性不显著,微地貌形态单一;潮间带上部大多已围垦,在垦区外围形成了大片的互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel)盐沼。

<sup>①</sup>国家自然科学基金项目(批准号:41076035 和 40606012),国家海洋局青年海洋科学基金项目(2012337)资助  
收稿日期:2012-09-20;收修改稿日期:2012-11-19

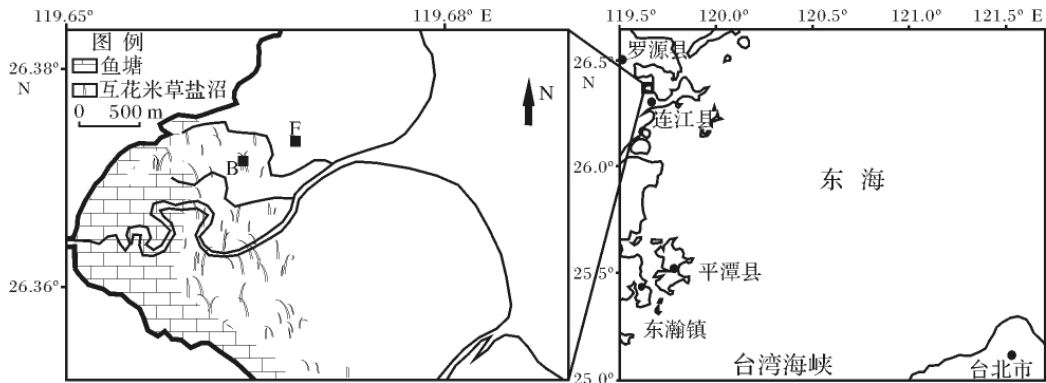


图1 罗源湾位置及采样站位示意图

Fig. 1 Location map and sampling sites

## 2 研究方法

2008年1月份在罗源湾马鼻镇附近海域选择了潮间带上部的盐沼内部(站位B)和光滩(站位F)的两个站位采集了柱状沉积物(具体采样站位见图1)。柱状样采集利用内径为70 mm、外径75 mm的PVC管用人工直接按入地下,为减少阻力和增加进样率,在底部没有安装花瓣,PVC管在按入过程中记录了管内外距离沉积物的高度,到一定深度后再用人工缓慢拔出,PVC管取出后再次测量管顶部距离沉积物的长度,没有发现有样品掉下。站位B和站位F在采样过程中PVC管插进沉积物的深度分别为310 cm和300 cm,实际取得沉积物长度分别为165 cm和149 cm。柱状样在运回室内后取出样品,在进行岩性、沉积构造描述后,以1 cm间隔进行分样。研究表明,柱状样采集过程中存在线性压缩现象,并且在采样管下也存在一定的压缩量<sup>[13]</sup>,在本次采样过程中也记录了采样管内外距离地面的高度,结果也表明是一种线性压缩过程。因此,本文根据此方法利用现场记录的柱状样压缩量恢复站位B和站位F的真实柱样长度均为280 cm。

将分割后的样品均匀混合后采集大约2 g子样,用浓度为5‰的六偏磷酸钠溶液浸泡24小时,并利用超声波震荡1 min,使样品充分混和、分散后,在Mastersizer 2000型激光粒度仪上进行粒度分析,获得1/4φ间隔的粒度组分。沉积物粒度参数采用矩法计算<sup>[14]</sup>,沉积物分类与命名采用Shepard的分类系统<sup>[15]</sup>。沉积物粒度分析在国家海洋局第三海洋研究所海洋与海岸地质环境开放实验室完成。

<sup>210</sup>Pb的半衰期是22.3 a,适于测定近百余年的

地质事件和年龄,此法为Goldberg所发展<sup>[16]</sup>。本文<sup>210</sup>Pb测年分析在国家海洋局大气化学重点实验室完成,以<sup>209</sup>Po为示踪剂。具体实验过程如下:准确称取沉积物干样4 g,加入已知量的<sup>209</sup>Po作为产额示踪剂,分别用浓硝酸和浓盐酸消化,蒸干,蒸干后的剩余物用稀盐酸浸取,离心分离出清液;向溶液中加入少量盐酸羟胺,用氨水调节pH为2,在恒控磁力搅拌器上加热搅拌,使<sup>210</sup>Po和<sup>209</sup>Po沉积在一个活性面为φ12 mm的银片上。反应完后取出银片,分别用纯净水和无水乙醇淋洗银片,在红外灯下烘干后置于α能谱仪上测量。

## 3 结果

### 3.1 柱状沉积物粒度组成及沉积结构

柱状样B位于互花米草盐沼内部,距离盐沼边缘约300 m,实际取样深度为165 cm,经过恢复校准后,真实样长为280 cm。在整个剖面上,沉积物类型主要以黏土质粉砂为主,在表层以下165~175 cm、230~240 cm之间为粉砂,沉积物黏土含量介于16.3%~34.5%之间,由底向表黏土含量总体表现为增加趋势,但中间出现多个变化阶段,其中在280~230 cm之间的沉积物黏土含量由下向上逐渐减小,由230 cm层位向上黏土含量迅速增大后又开始逐渐减小,到175 cm层位后向上沉积物黏土含量又表现为逐渐增大的趋势,到81 cm层位后向上又逐渐减小,自35 cm层位开始向上则表现为波动中逐渐增加的趋势(图2)。

柱状样F位于互花米草盐沼外侧大约200 m远的光滩上,实际取样深度为149 cm,经过恢复校准后,真实样长为280 cm。在整个剖面上,沉积物类型

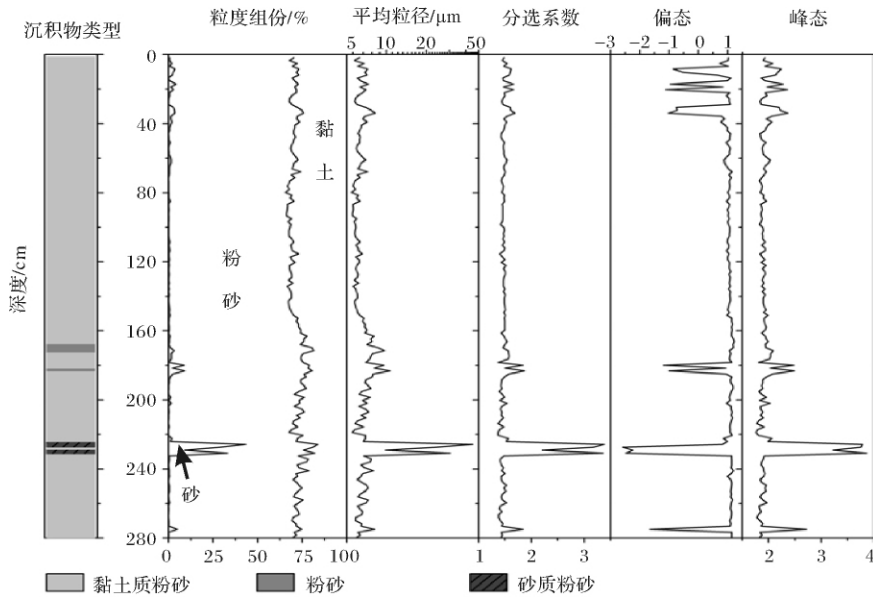


图 2 罗源湾互花米草盐沼内( 站位 B) 沉积物粒度特征

Fig.2 Depth-distribution of core sediment grain size in *Spartina alterniflora* marsh

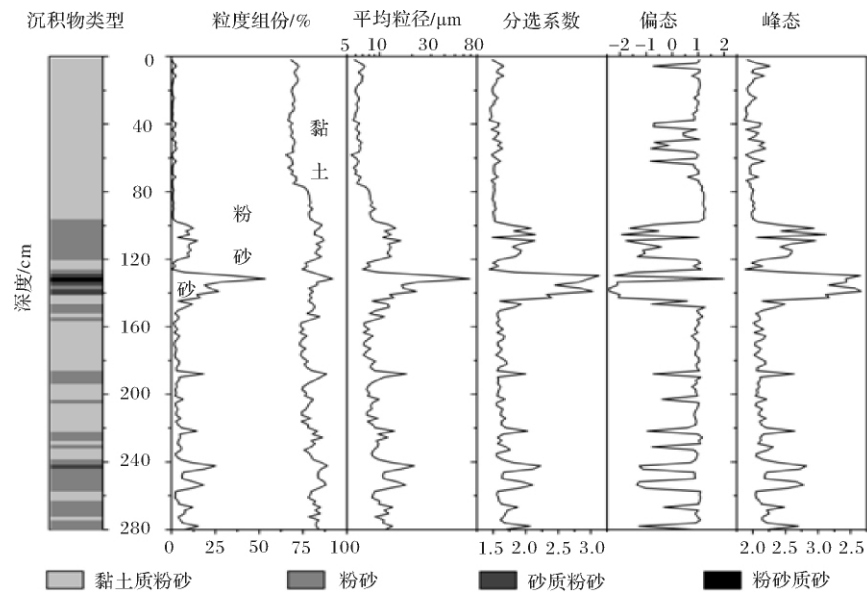


图 3 罗源湾潮间带光滩内( 站位 F) 沉积结构及沉积物粒度特征

Fig.3 Depth-distribution of core sediment grain size in bare flat

主要以黏土质粉砂为主,在表层以下 80 ~ 140 cm、152 ~ 158 cm、188 ~ 196 cm、226 ~ 280 cm 之间以粉砂为主,间有黏土质粉砂和砂质粉砂分布,沉积物黏土含量介于 8.2% ~ 34.8% 之间,由下向上沉积物黏土含量总体表现为增加趋势,但出现多个旋回,280 ~ 165 cm 之间的沉积物黏土含量逐渐增大,165 ~ 100 cm 之间的沉积物黏土含量逐渐减小,在 100 ~ 76 cm 之间的沉积物黏土含量又迅速增大,76 cm 以上的沉

积物黏土含量变化很小(图 3)。

### 3.2 沉积速率

根据<sup>210</sup>Pb 分析结果(图 4),柱状样 B 和 F 分别在 150 cm 和 75 cm 深度左右到达本底值,并且两个站位柱状沉积物中<sup>210</sup>Pb 比活度由表层向底层呈显著递减趋势。因此,根据回归关系式可以分别计算出两个站位的平均沉积速率。计算结果表明,互花米草盐沼(站位 B)和潮间带中上部光滩(站位 F)的平均沉

积速率为分别为 1.96 cm/a 和 1.23 cm/a。

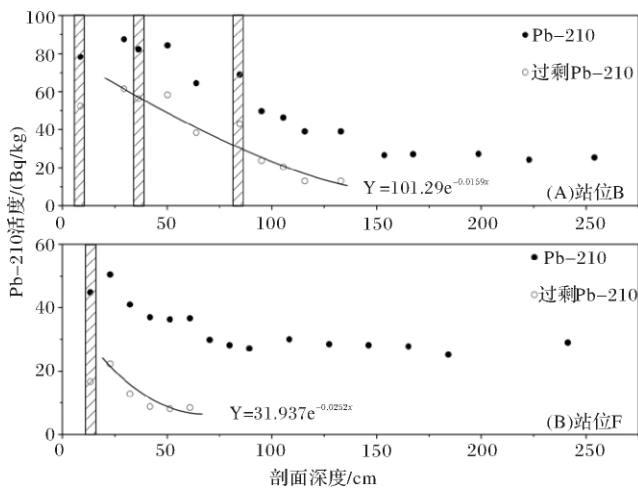


图4 罗源湾海岸湿地柱状沉积物 $^{210}\text{Pb}$ 测年结果

Fig. 4  $^{210}\text{Pb}$  dating results of sediment cores in coastal wetlands, Luoyuan Bay

### 3.3 柱状沉积物粒度参数

站位 B 柱状沉积物粒度分析结果显示(图 2) 整个剖面沉积物平均粒径为 5.41 ~ 45.00  $\mu\text{m}$ , 最大值出现在 230 ~ 235 cm 之间, 分样过程中发现在该层位出现了含贝壳碎屑的粗颗粒泥质砂; 在 175 cm 以下, 沉积物平均粒径由下向上总体表现为逐渐粗化的趋势, 在 175 ~ 80 cm 之间表现为向上逐渐细化的趋势, 80 cm 以上则又表现为向上粗化的趋势。除 230 ~ 235 cm 之间的沉积物分选很差外, 其余层位沉积物分选程度较为一致; 沉积物总体以正偏为主, 在 230 ~ 235 cm 之间出现极负偏, 峰态值也在相应的层位出现较大值。

站位 F 柱状沉积物平均粒径分析结果显示(图 3), 沉积物平均粒径为 5.46 ~ 68.82  $\mu\text{m}$ , 在 165 cm 以下表现为由下向上沉积物逐渐细化的总趋势, 在 165 ~ 100 cm 之间的沉积物平均粒径显著增大, 这主要是由于该层位出现了含较多的贝壳碎屑的粗颗粒物, 在 100 ~ 66 cm 之间的沉积物平均粒径向上表现为较为显著的细化趋势, 在 66 cm 以上则表现为不明显的粗化趋势; 100 ~ 150 cm 之间的沉积物分选程度很差, 150 cm 以下的沉积物分选程度由下向上总体表现为逐渐变好, 而在 100 cm 以上则表现为不明显的由下向上逐渐变差的趋势, 并且这两个沉积层段的沉积物分选程度相差很小; 沉积物分布以正偏为主, 在 100 ~ 150 cm 之间的沉积物为负偏, 其余部分层位的沉积物表现为负偏; 峰态值的分布与分选系数

一致, 在 100 ~ 150 cm 沉积层的沉积物峰态值较大, 该沉积层上部和下部沉积物的峰态相差较小。

## 4 讨论

### 4.1 人类活动对潮滩沉积过程的影响

罗源湾地区近现代以来随着社会经济的快速发展, 人类活动强度逐渐加强, 各种用海方式及用海规模给海湾带来了明显的压力。统计结果表明, 自 20 世纪 50 年代以来, 罗源湾经历了几次规模较大的围填海活动, 围填海面积达到了 71.96  $\text{km}^2$  [17]。强烈的围填海打破了潮滩水沙平衡状态, 改变了潮滩剖面形态, 引起潮滩局部淤积及沉积物粒度组分的变化 [9, 18, 19]。

罗源湾在 20 世纪 50 ~ 70 年代经历了岐后围垦、大获围垦、岐余围垦、巽北围垦、合丰围垦、尖墩围垦、廉澳塘围垦、官坂军垦、龙头围垦、南门围垦、北营燕窝围垦等十多个大中型围垦活动; 20 世纪 70 年代中期开展的松山和大官坂大型围垦活动到 80 年代初期完工; 此后又开展了一系列的围垦活动, 如 1987 年的泥田围垦、1998 年的白水围垦等。大量的围填海活动显著影响了海湾的纳潮量, 湾内潮流场、流向、流速等的变化进而会影响到泥沙运动过程, 导致部分海域淤积强度增大。数值模拟结果表明, 1998 年开展的白水围垦导致罗源湾内大、小潮纳潮量分别减少了 2.38% 和 3.26%, 30 天的水交换能力下降了 1.3%, 堤外泥沙淤积增强 [17]。通过对罗源湾光滩和盐沼沉积物粒度组分及平均粒径在剖面上的分布对比(图 5), 自 20 世纪 40 年代中后期以来, 潮滩沉积速率显著增强, 进一步说明了围填海活动加强了罗源湾潮滩的淤积强度。

### 4.2 台风活动对潮滩沉积过程的影响

潮滩是在潮汐作用下发育形成的细颗粒堆积体, 但其形成过程中并不止受潮汐作用, 还受到许多突发因素的影响。灾害性天气事件(如台风)在非潮汐因素中扮演了非常重要的角色。研究表明台风登陆期间, 潮滩滩面多发生侵蚀, 在台风登陆过后, 会出现快速的淤积, 并且侵蚀强度越大的地区, 台风过后的淤积强度也越大 [3, 20 ~ 24]。滩面侵蚀、淤积强度与台风自身强度、台风登陆时的潮汐状况以及潮汐位相有关 [23, 25]。这些要素直接影响到台风登陆引起的波浪作用强度。一般认为台风影响下, 盐沼地区会发生快速淤积 [4, 26 ~ 27]; 长江口盐沼的观测表明, 台风期间淤积主要发生在盐沼中上部, 盐沼下部发生侵蚀, 并且

盐沼边缘的侵蚀深度最大<sup>[3]</sup>。罗源湾观测结果显示,一次台风作用期间,互花米草盐沼内总体发生淤积,但部分地区也会出现侵蚀,并且侵蚀深度在互花米草盐沼中下部最大,可达到 4.5~5.5 cm,但在台风过后会出现快速淤积,并且盐沼中下部的淤积速率也最大;光滩地区则是下部侵蚀较上部强烈<sup>[24]</sup>。研究表明,根据地层内的沉积结构和沉积物粒度特征可以初步判断台风事件及其强度<sup>[2,23]</sup>。根据本文柱状样的粒度资料分析,沉积物黏土含量的垂向分布上出现多个突变界面,可能指示着台风信息。

通过查阅历史文献记录<sup>[12,28,29]</sup>,以及近年来国家海洋局每年发布的《中国海洋灾害公报》资料,近现代历史上对罗源湾有很大影响的台风分别发生在清道光十六年(公元 1836 年)(连江登陆,海潮泛滥,县治水高丈余,人畜多溺死)、清宣统元年(公元 1909 年)(七月在连江登陆,飓风大作,海潮汹涌,民舍崩塌,田禾淹没,沿海船户遭溺无算。)、1966 年(9 月 3 日在罗源登陆,罗源水文站实测风速为 52 m/s,5 h 内降雨量达 195 mm,导致海堤决口)、1996 年(8 月 1 日台风的三个中心在霞浦、连江和平潭登陆,最大曾水在 200 cm 以上),并且根据文献记录对比可知,发生在 1909 年的台风是影响强度最大,理论上应该对滩面沉积物的影响最为显著,发生于 1836 年的台风影响强度仅次于 1909 年。因此,可以根据沉积物的垂向分布特征初步划分出年代特征,划分台风事件引起的沉积界面(图 5)。需要说明的是,由于站位 B 滩面高程较站位 F 高,因此,在同一台风影响下,其侵蚀强度较站位 F 弱;1836 年台风发生时站位 B 的滩面高程较 1909 年台风时更低,因此,从站位 B 剖面上看,1836 年台风对站位 B 的影响强度较 1909 年略

强。根据推算,站位 B 和站位 F 自 1909 年以来的平均沉积速率分别为 1.85 cm/a 和 1.33 cm/a,与<sup>210</sup>Pb 测年结果一致;自 1836 年以来的平均沉积速率分别为 1.31 cm/a 和 1.09 cm/a,略小于<sup>210</sup>Pb 测年结果,这主要是由于沉积物被埋藏至地层后在自身重力作用下脱水而导致自压实<sup>[30]</sup>,其压缩时间较 1909 年更长、沉积物厚度也较 1909 年更大,由此造成的沉积物自压缩程度也较 1909 年以来的大,因此推算得到的沉积速率略小于同位素测年结果。

由此可推算站位 B 附近各时间段内的沉积速率分别为:1836~1909 年为 0.58 cm/a、1909~1946 年为 0.56 cm/a、1946~1966 年为 2.36 cm/a、1966~1987 为 1.70 cm/a、1987~1996 年为 5.10 cm/a、1996~2008 年为 2.83 cm/a,1836 年以来的平均沉积速率为 1.31 cm/a,小于<sup>210</sup>Pb 测年数据(1.96 cm/a);站位 F 附近各时间段内的沉积速率分别为:1836~1909 年为 0.77 cm/a、1909~1946 年为 0.85 cm/a、1946~1966 年为 2.46 cm/a、1966~1996 年为 1.25 cm/a、1996~2008 年为 1.10 cm/a,1836 年以来的平均沉积速率为 1.09 cm/a,小于<sup>210</sup>Pb 测年数据(1.23 cm/a)。研究表明,在潮间带地区随着滩面高程的增加,沉积速率逐渐减小<sup>[20,30]</sup>。站位 B 较站位 F 更靠近陆地,因此,在自然状况下,其沉积速率应小于后者,而在 1836~1946 年之间的沉积速率变化也证实了这一点;但是自 20 世纪 50 年代以来,罗源湾南部经历了较多的围填海工程,围填海活动可以使垦区附近潮间带沉积速率显著增加<sup>[9,31]</sup>;互花米草的引种,更大地促进了盐沼地区的淤积作用,导致该地区沉积速率显著增大;但随着互花米草盐沼的不断成熟,盐沼内的沉积速率逐渐减小,这与已有研究结果一致<sup>[20,32]</sup>。

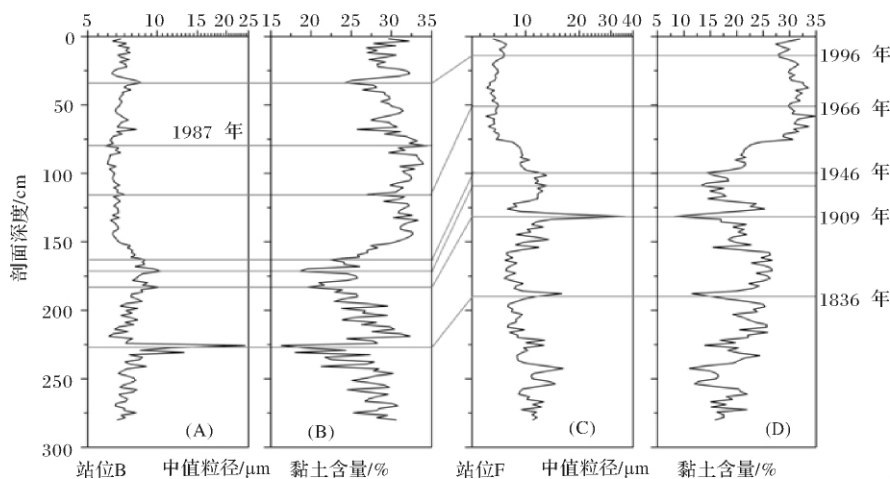


图 5 罗源湾潮滩柱状沉积物中台风信息记录

Fig. 5 Typhoon records in core sediments of Luoyuan Bay

## 5 结论

(1) 罗源湾潮间带中上部沉积物以细颗粒为主, 互花米草盐沼中下部柱状沉积物平均粒径为 5.41 ~ 45.00  $\mu\text{m}$ , 沉积物平均粒径及黏土含量在采样深度范围内出现了 4 次显著变化; 盐沼外部光滩地区柱状沉积物平均粒径为 5.46 ~ 68.82  $\mu\text{m}$ , 沉积物平均粒径及黏土含量在采样深度范围内出现了 3 次显著变化; 沉积物特征在地层内的显著变化主要是由台风活动和人类活动影响所致;

(2) 互花米草盐沼和潮间带中上部光滩站位的平均沉积速率为分别为 1.96 cm/a 和 1.23 cm/a; 围填海活动导致潮间带中上部平均沉积速率 0.56 cm/a 增加到 2.36 cm/a, 而互花米草的出现使得平均沉积速率显著增加, 随着互花米草盐沼的不断成熟, 盐沼内的沉积速率逐渐减小;

(3) 柱状沉积物粒度分析结果记录了近百年来对该罗源湾产生重要影响的台风事件, 也记录了 20 世纪 60 年代以来罗源湾经历的几次较大规模的人类活动。

致谢 国家海洋局第三海洋研究所的于力、刘静萍协助进行了粒度分析, 当地居民陈海深参与了野外观测工作, 谨致谢忱!

### 参考文献(References)

- 任美镔, 张忍顺, 杨巨海, 等. 风暴潮对淤泥质海岸的影响——以江苏省淤泥质海岸为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1983, 3(4): 1-24 [Ren Me' e, Zhang Renshun, Yang Juhai, *et al.* The influence of storm tide on mud plain coast: with special reference to Jiangsu Province [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1983, 3(4): 1-24]
- 许世远. 长江三角洲地区风暴沉积研究[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 150 [Xu Shiyuan. Storm Deposit in the Changjiang Delta [M]. Beijing: Science Press, 1997: 150]
- Yang S L, Friedrichs C T, Shi Z, *et al.* Morphological response of tidal marshes, flats and channels of the outer Yangtze River mouth to a major storm[J]. Estuaries, 2003, 26(6): 1416-1425
- Turner R E, Baustian J J, Swenson M, *et al.* Wetland sedimentation from hurricanes Katrina and Rita[J]. Science, 2006, 314: 449-452
- 王爱军, 高抒, 陈坚, 等. 福建泉州湾盐沼对台风“格美”的沉积动力响应[J]. 科学通报, 2008, 53(22): 2814-2823 [Wang Aijun, Gao Shu, Chen Jian, *et al.* Sediment dynamic responses of coastal salt marsh to typhoon “KAEMI” in Quanzhou Bay, Fujian Province, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(22): 2814-2823]
- 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(13): 1489-1502 [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(13): 1489-1502]
- 朱大奎. 中国海涂资源的开发利用问题[J]. 地理科学, 1986, 6(1): 34-40 [Zhu Dakui. The utilization of coastal mudflat of China [J]. Scientia Geographica Sinica, 1986, 6(1): 34-40]
- Ke X K, Yu G. Impacts of large rivers and human beings' activities on Jiangsu tidal flats[C]//Proceedings of the Fifth MICE Symposium for Asia and the Pacific: Ecosystem and Environment of Tidal Flat Coast Effected by Human Beings' Activities. Nanjing: Nanjing University Press, 1990: 36-49
- 吴小根, 王爱军. 人类活动对苏北潮滩发育的影响[J]. 地理科学, 2005, 25(5): 614-620 [Wu Xiaogen, Wang Aijun. Impacts of human beings activities on north Jiangsu tidal flat [J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(5): 614-620]
- Crossland C J, Kremer H H, Lindeboom H J, *et al.* Coastal Fluxes in the Anthropocene[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 231
- 蔡爱智, 蔡月娥. 罗源湾的现代沉积[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1989, 28(增刊): 9-27 [Cai Aizhi, Cai Yue'e. Recent sediment of the Luoyuan Bay [J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 1989, 28(Suppl.): 9-27]
- 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第七分册: 福建省北部海湾) [M]. 北京: 海洋出版社, 1994: 104-154 [State Oceanic Administration. China's Coastal Embayment (V. 7: Northern Fujian Coastline) [M]. Beijing: China Ocean Press, 1994: 104-154]
- 王爱军, 高抒, 贾建军. 江苏王港潮间带柱状样的压缩和校正[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 555-561 [Wang Aijun, Gao Shu, Jia Jianjun. Calibration for intertidal flat sediment core shortening: A case study from Wanggang, Jiangsu coast [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(4): 555-561]
- McManus J. Grain size determination and interpretation[C]//Techniques in Sedimentology. Oxford: Blackwell, 1988: 63-85
- Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1954, 24: 151-158
- Goldburg E D, Koide M. Rates of sediment accumulation in the Indian Ocean[C]//Geiss J, Goldburg E D, eds. Earth Science and Meteoritics[C]. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 1963: 90-102
- 鲍献文, 刘容子, 董树刚, 等. 福建省海湾数模与环境研究——罗源湾[M]. 北京: 海洋出版社, 2010: 343 [Bao Xianwen, Liu Rongzi, Dong Shugang, *et al.* Research on Environment and Numerical Modeling in Coastal Embayment, Fujian Province: A case study from Luoyuan Bay [M]. Beijing: Ocean Press, 2010: 343]
- 蒋国俊, 冯怀珍. 海塘对潮滩剖面发育的影响[C]//第四次中国海洋湖沼科学会议论文集. 北京: 科学出版社, 1991: 26-33 [Jiang Guojun, Feng Huaizhen. Effects of the Seawall on the Development of Tidal Flat Profile[C]//The Fourth Conference Proceedings on Chinese Oceanology and Limnology Sciences. Beijing: Science Press, 1991: 26-33]
- Wang A J. Impact of human activities on depositional process of tidal flat in Quanzhou Bay [J]. Chinese Geographical Science, 2007, 17(3): 127-134
- Pethick J S. Saltmarsh geomorphology [C]//Allen J R L, Pye K,

- eds. *Saltmarshes: Morphodynamics, Conservation and Engineering Significance*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 41-62
- 21 夏小明, 谢钦春, 李炎, 等. 港湾淤积质潮滩的周期变化[J]. 海洋学报, 1997, 19(4): 99-108 [Xia Xiaoming, Xie Qinchun, Li Yan, *et al.* Periodical variations of embayment mud flat [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1997, 19(4): 99-108]
- 22 范代读, 李从先. 长江三角洲泥质潮坪沉积的韵律性及保存率[J]. 海洋通报, 2000, 19(6): 34-41 [Fan Daidu, Li Congxian. Lamination and preservation rate of mudflat deposition on the Changjiang Delta [J]. *Marine Science Bulletin*, 2000, 19(6): 34-41]
- 23 Fan D D, Guo Y X, Wang P, *et al.* Cross-shore variations in morphodynamic processes of an open-coast mudflat in the Changjiang Delta China: with an emphasis on storm impacts [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26: 517-538
- 24 王爱军, 叶翔, 陈坚. 台风作用下的港湾型潮滩沉积过程——以2008年“凤凰”台风对福建罗源湾的影响为例[J]. 海洋学报, 2009, 31(6): 77-86 [Wang Aijun, Ye Xiang, Chen Jian. Effects of typhoon on sedimentary processes of embayment tidal flat: A case study from the “Fenghuang” typhoon in 2008 [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(6): 77-86]
- 25 Rankey E C, Enos P, Steffen K, *et al.* Lack of impact of hurricane Michelle on tidal flats, Andros Island, Bahamas: integrated remote sensing and field observations [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2004, 74(5): 654-661
- 26 Stumpf R P. The process of sedimentation on the surface of a salt marsh [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1983, 17: 495-508
- 27 French J R, Spencer T. Dynamics of sedimentation in a tide-dominated backbarrier salt marsh, Norfolk, UK [J]. *Marine Geology*, 1993, 100: 315-331
- 28 陆人骥. 中国历代灾害性海潮史料 [M]. 北京: 海洋出版社, 1984: 295 [Lu Renji. *Historical Records for Tide Disasters in China* [M]. Beijing: Ocean Press, 1984: 295]
- 29 水利部水文水利调度中心. 中国风暴潮概况及其预报 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992: 214 [Hydrology and Water Resources Dispatch Center of the Ministry of Water Resources. *Status and Forecast of tidal storm in China* [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1992: 214]
- 30 Allen J R L. Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 1155-1231
- 31 陈才俊. 围滩造田与淤积质潮滩的发育 [J]. 海洋通报, 1990, 9(3): 69-74 [Chen Caijun. Changes in mud flat after tideland being enclosed [J]. *Marine Science Bulletin*, 1990, 9(3): 69-74]
- 32 Craft C, Megonigal P, Broome P, *et al.* The pace of ecosystem development of constructed *Spartina alterniflora* marshes [J]. *Ecological Applications*, 13(5): 1417-1432

## Sedimentary Processes of Tidal Flat and the Responses to Typhoon Events and Anthropogenic Influences in the Luoyuan Bay of China

WANG Ai-jun YE Xiang

(Open Laboratory for Coast & Ocean Environmental Geology, Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen Fujian 361005)

**Abstract:** Situated at the junction of land and sea, tidal flat is very sensitive to typhoon event and anthropogenic influence. In order to reveal the histories of regional typhoon events and strong anthropogenic influences, two sediment cores were collected in inner *Spartina alterniflora* marsh and middle-upper intertidal flat in the Luoyuan Bay for sedimentary records extraction. The sediment cores were cut with 1 cm interval for grain size and radio isotope dating. The results of grain size analysis indicate that the sediment on tidal flat of Luoyuan Bay is mainly composed by fine fractions. The mean grain sizes of core sediments in inner *Spartina alterniflora* marsh and middle-upper intertidal flat are  $5.41 \mu\text{m} \sim 45.00 \mu\text{m}$  and  $5.4 \mu\text{m} \sim 68.82 \mu\text{m}$ , respectively; however, there are several interfaces where sediment characteristics vary obviously. The mean sedimentation rates in inner *Spartina alterniflora* marsh and middle-upper intertidal flat calculated from  $^{210}\text{Pb}$  are 1.96 cm/a and 1.23 cm/a, respectively. However, the mean sedimentation rates increased from 0.56 cm/a during 1909 ~ 1946 to 2.36 cm/a during 1946 ~ 1966 at upper intertidal flat due to strong reclamations, and the introduction of *Spartina alterniflora* led to the mean sedimentation rate increased to 5.10 cm/a during the early marsh formation, and with increasing of the marsh age, the mean sedimentation rate decreased to 2.83 cm/a. The sedimentary records of core sediments collected from inner *Spartina alterniflora* marsh and middle-upper intertidal flat not only recorded the typhoon events which brought the strong effects on the Luoyuan Bay in recent 170 years, and but also recorded the several large scale reclamation from 1950s.

**Key words:** tidal flat; anthropogenic influence; typhoon event; sedimentary records; Luoyuan Bay