

江苏王港盐沼的现代沉积速率

王爱军^{1,2}, 高 抒², 贾建军³, 潘少明²

(1. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005; 2. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210093;
3. 国家海洋局海底科学重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

摘要: 江苏海岸湿地总面积超过 5000 km², 但围垦活动的加剧使盐沼湿地面积迅速减少; 为了达到海岸防护、保滩促淤的目的, 先后引种了大米草和互花米草。通过采集江苏王港潮滩盐沼湿地 9 处柱状样和挖掘探槽剖面, 以及对沉积剖面样品进行 ²¹⁰Pb 和 ¹³⁷Cs 测年分析, 探讨了 ²¹⁰Pb 的本底及影响 ²¹⁰Pb 富集的因素, 估算了王港盐沼湿地的现代沉积速率。王港潮滩盐沼沉积物对 ²¹⁰Pb 的吸附作用较弱; 受风暴潮、生物扰动、物源变化及实验误差等因素的影响, 在 ²¹⁰Pb_{ex} 剖面上出现了数据异常点, 将这些数据点剔除后计算得到的沉积速率为 3.3 cm yr⁻¹。¹³⁷Cs 测年显示, 该地区 1963 年以来的平均沉积速率 3.1 cm yr⁻¹, 与 ²¹⁰Pb 法及前人研究结果相一致。根据一个典型剖面的 ¹³⁷Cs 测年数据分析, 王港潮滩盐沼的沉积过程根据地貌特征的不同可分 3 个阶段, 大米草覆盖阶段滩面高程迅速增加, 互花米草的生长提高了滩面淤积速率。
关键词: 盐沼湿地; 沉积速率; ²¹⁰Pb 和 ¹³⁷Cs 测年; 米草; 江苏海岸

1 引言

海岸带陆海相互作用研究是国际地圈生物圈计划 (IGBP) 的核心内容之一。今后十年是该项研究的第二期, 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。海岸湿地是海岸系统的重要组成部分, 它是受到人类活动显著影响的地带, 也是全球变化的敏感区域, 因此成为海岸带陆海相互作用研究的重点对象之一。江苏海岸湿地是全国面积最大的湿地, 从连云港到启东嘴, 仅淤泥质潮滩就有 880 km², 加上潮间带和近岸水域, 湿地总面积超过 5000 km^{2[1]}。江苏海岸湿地以潮差大、潮流强、沉积物供给条件多变为特征; 从连云港到启东嘴岸线冲淤状态不同, 总体上中部为淤积型海岸, 南北两部分为冲刷型海岸, 在淤积型海岸形成了宽阔的潮间带。在自然条件下, 江苏海岸潮间带自上而下可分为草滩、盐蒿滩、泥沙混合滩和粉砂细砂滩^[2]。但是, 自上个世纪 80 年代以来, 草滩、盐蒿滩的绝大部分已被围垦, 盐沼湿地面积急剧减小, 而为了达到海岸防护、保滩促淤的目的, 先后引种了大米草和互花米草。

大米草与互花米草为米草属的多年生植物。大米草 (*Spartina anglica* C. E. Hubb) 原产英国, 适生于泥质海岸带的中潮带上部至高潮带下部, 具有耐盐、耐淹等生理生态学特征; 互花米草 (*Spartina alterniflora*) 原产大西洋沿岸, 植株较大米草高大粗壮, 常为 1 m 以上, 根系发达。大米草和互花米草分别于 1963 年和 1982 年被人为引种到江苏潮间带^[3-4], 起到了保护岸滩、促淤造陆、改良土壤的作用。目前, 江苏淤泥质海岸潮间带中、上部地区已被互花米草广泛覆盖。在大米草和互花米草覆盖的潮间带地区, 出现了强烈

收稿日期: 2004-08-05; 修订日期: 2004-10-14
基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40231010); 国家自然科学基金项目 (40476041); 教育部博士点基金 (20020284007) 资助 [Foundation: The key project of National Natural Science Foundation of China, No. 40231010; National Natural Science Foundation of China, No.40476041; Grants from the Ministry of Education Foundation for Ph.D. Program, No.20020284007]

作者简介: 王爱军 (1977-), 男, 硕士, 从事自然地理学研究。E-mail: ajwang7708@sohu.com

的淤积, 改变了潮滩地貌发育和演变的过程。目前, 由于快速的围垦, 海堤已经开始延伸到了潮间带中部的互花米草区。

本文研究选择在江苏中部大丰市王港地区来探讨人工引种米草对海岸湿地沉积速率的影响, 为引种米草的湿地生态效应的科学评价提供基础资料。王港地区平均潮差 3.68 m, 以潮汐作用为主, 为正规半日潮, 潮间带宽约 10 km, 平均坡度 0.55‰, 是江苏沿海淤积质潮滩发育的典型地区之一^[5]。王港地区潮滩生物分布具有明显的分带性, 由老海堤向海依次有盐蒿 (*Suaeda salsa*)、大米草 (*Spartina angelica*)、互花米草 (*Spartina alterniflora*) 等, 植被覆盖宽度约在 1~3.5 km; 动物分布由老海堤向海依次有草兔 (*Rattus*)、大眼蟹 (如 *Macrophthalmus japonicus*)、笋螺 (*Terebra* sp)、沙蚕 (*Perinereis aibuhitensis* Grube)、弹涂鱼 (如 *Periophthalmus cantonenses*) 等。

2 材料与方法

2.1 样品采集与实验室分析

2003 年 6 月 25 日至 7 月 11 日在大丰港南侧、王港纳潮洞北侧潮滩设置的断面上, 在不同地貌单元 (包括盐蒿滩、大米草滩、互花米草滩以及过渡地带) 共采集了 9 个柱状样 (图 1)。9 个柱状样附近的地貌、沉积特征如下: N1 柱样位于盐蒿滩密集区, 具有泥沙互层层理, 底部泥层薄, 上部泥层厚; N2 位于盐蒿滩与大米草滩交接地区, 盐蒿相对较多, 下部水平层理明显, 上部不明显; N3 位于稀疏大米草滩, 上部水平层理明显, 下部不明显; N4 位于密集大米草滩, 上部水平层理明显, 下部不明显; N5 位于大米草滩向互花米草滩过渡的边缘, 层理不明显; N6 位于稀疏互花米草滩, 上部层理不明显, 下部有明显水平层理; N7 位于稀疏互花米草滩, 上部有水平层理, 下部层理间距较大; N8、N9 位于密集互花米草滩, 上部都具有一定的水平层理, 下部层理不明显。

柱状样采集利用内径为 70 mm、外径 75 mm 的 PVC 管直接打入地下; 采集的柱状样带回实验室, 取出样品并进行岩性、沉积构造描述后, 以 1 cm 间隔分样, 分开的样品用德国 Martin Christ 公司生产的 ALPHA-1-4 型冷冻干燥机低温冻干, 计算含水量、容重, 具体方法见文献[6]; 2003 年 10 月 13 日, 在 N4 柱状样位置 (盐蒿滩—大米草交界处) 上挖取了一个深度为 130 cm 的人工探槽剖面, 并进行现场描述、采样, 采样间隔在 62~130cm 部位为 1 cm, 62 cm 以上为 2 cm。利用英国 Mastersizer2000 型激光粒度仪对柱状沉积物样品进行粒度分析, 粒度参数计算采用矩法参数^[7]。将冻干的样品研磨至过 150 目筛, 利用 Po- α 法对探槽剖面的样品进行了 ^{210}Pb 分析, 利用 Ge (Li) 谱仪对探槽剖面、N6 和 N9 进行了 ^{137}Cs 分析。

2.2 沉积速率估算

^{210}Pb 的半衰期是 22.3 yr, 适于测定近百余年的地质事件和年龄, 此法为 Goldberg^[8]所

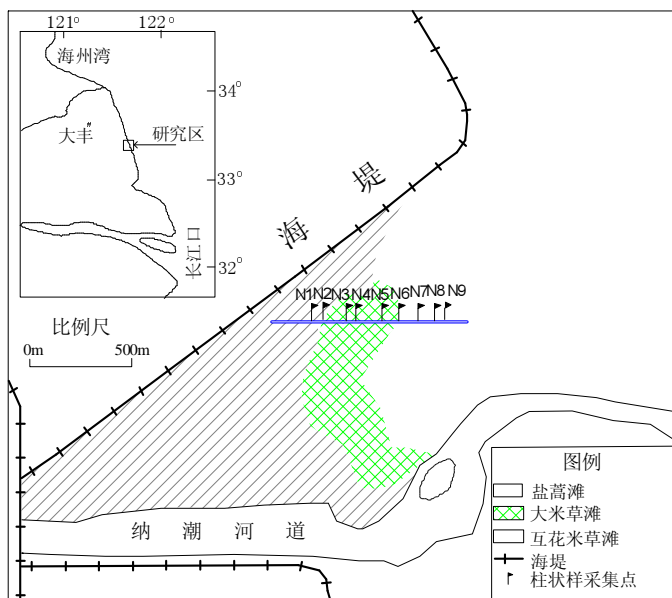


图 1 研究区位置及采样点站位

Fig. 1 Location of the study area and sampling sites

发展。沉积物中的 ^{210}Pb 有两个来源, 大气沉降和沉积物自身的 ^{226}Ra 衰变; 在沉积过程中, 由于 ^{226}Ra 的衰变和大气中 ^{210}Pb 的沉降, 地层中的 ^{210}Pb 含量不断积累; 同时, ^{210}Pb 的含量又因自身衰变而不断减少; 总体上, 随着沉积物的顺序堆积, ^{210}Pb 的强度将随着埋藏深度的增加而呈指数减少; 由于 ^{226}Ra 的半衰期较长, 为 1623 年, 它产生的补偿 ^{210}Pb 的放射性活度不随沉积物埋藏深度的增加而减少, 在 ^{210}Pb 测年中须将其作为本底值扣除; 通过测量岩芯中不同深度的 ^{210}Pb 放射性活度, 扣除本底值后得到 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, 根据 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 估算沉积物的沉积速率^[9]。根据 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的垂向变化过程, 利用下式计算出沉积速率: $R = \lambda/b$, 其中 R 为沉积速率 (cm yr^{-1}), λ 为 ^{210}Pb 衰变常数 (0.03114 yr^{-1}), b 为 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 取自然对数后与深度之间线性拟合直线的斜率。本文 ^{210}Pb 测年是在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室 ^{210}Pb 实验室做的, 以 ^{209}Po 作示踪剂。

^{137}Cs 是一种人工元素, 是核裂变的产物, 半衰期为 30.17 年。自 1945 年第一次核爆炸以来, 特别是 50 年代初期的美国和前苏联进行了大量的大气层核试验, ^{137}Cs 在大气中的浓度迅速上升。到 1961 年和 1962 年, 核爆炸达到高峰, 全球大气层核试验总裂变当量 80% 以上集中在 1961~1962 年期间^[10-11]。大气中的 ^{137}Cs 经过 10~12 各月的滞留期后沉降到地面, 进入水体的 ^{137}Cs 被细颗粒沉积物吸附后发生沉积并被埋藏。因此, 在 1963 年左右会出现一个 ^{137}Cs 的最大峰值, 后来尽管一些国家也进行了核试验, 但其裂变当量仅占全球的 10% 左右, 不会干扰该峰值; 1963 年后大规模的大气层核试验停止, 70 年代初又进行了几次大气层核试验^[10, 12], 因两者在时间上相隔 10 年左右, 在沉积物剖面上产生一个可辨别的 ^{137}Cs 沉降峰值; 由于 1986 年苏联切尔诺贝利核电站发生了严重的核泄漏事故^[10, 12], 对全球 ^{137}Cs 的分布产生较大影响, 在沉积物上也产生了一个沉降峰值。因此, 利用沉积物柱状样中 ^{137}Cs 垂直剖面三个峰值深度位置 (分别对应 1963 年、1974 年和 1986 年) 为时间标记, 可以估算 1963 年以来的各时期的平均沉积速率。

3 结果与讨论

3.1 ^{210}Pb 反映的沉积速率

^{210}Pb 测量结果显示, ^{210}Pb 含量少且变化不大, 在 130cm 的深度上相差仅 1 dpm g^{-1} 左右, 没有达到 ^{210}Pb 本底 (图 2c), 因此, 找寻 ^{210}Pb 本底值就变得异常重要。由于 ^{210}Pb 主要吸附于细颗粒物, 有机质含量越高、沉积物越细、含有的黏土组分越多, ^{210}Pb 的放射性及其本底值越高^[6, 13-14], 王港地区柱状样沉积物粒度特征显示, 该区沉积物平均粒径在 $5.0\sim 5.7\phi$ 之间 (图 2a), 黏土含量不超过 10% (图 2b), 主要物质为粉砂, 对 ^{210}Pb 的吸附作用较弱。根据东台条子泥地区的 ^{210}Pb 测年, 其本底值为 0.67 dpm g^{-1} ^[15], 但由于其沉积物颗粒较粗, 平均粒径在 $4.0\sim 5.0\phi$ 之间, 黏土含量低于 5%^[6], 比王港地区沉积物粗, 因此其 ^{210}Pb 本底值要比王港地区低; 在浙江沿岸的 ^{210}Pb 测年数据显示, 在沉积物黏土含量达到 30% 左右时, ^{210}Pb 本底值可达到 2.0 dpm g^{-1} 左右^[17]。因此, 本文确定 ^{210}Pb 本底值的方法是: 在 $0.6\sim 2.0 \text{ dpm g}^{-1}$ 范围内取不同的值, 然后用断面重复测量结果加以验证。

分析柱状样 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 沿剖面变化过程 (图 2), 发现剖面上出现 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 异常点, 其位置都位于不同的沉积过程转换的界面: 50 cm 深度处的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的高值对应的是黏土含量突然增加, 对 ^{210}Pb 的吸附作用加强, 造成该深度 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 含量相对较高; 在 79~80 cm 的深度位置, 上下部位的沉积物变化不连续, 说明在该部位存在着沉积间断界面; 底部 128 cm 以下只有两个样品, 更长序列的粒度变化趋势无从得知, 但根据 130cm~124cm 的变化趋势来看, 128 cm 也是位于沉积间断界面上, 上下层位的粒度变化趋势相反。引起沉积间断界面的原因有很多, 对王港地区来说, 主要有以下几个原因, 一是物质来源的差异, 二是由于风暴潮引起的沉积动力状况的异常, 三是生物活动的扰动。对于不同的物源, 其

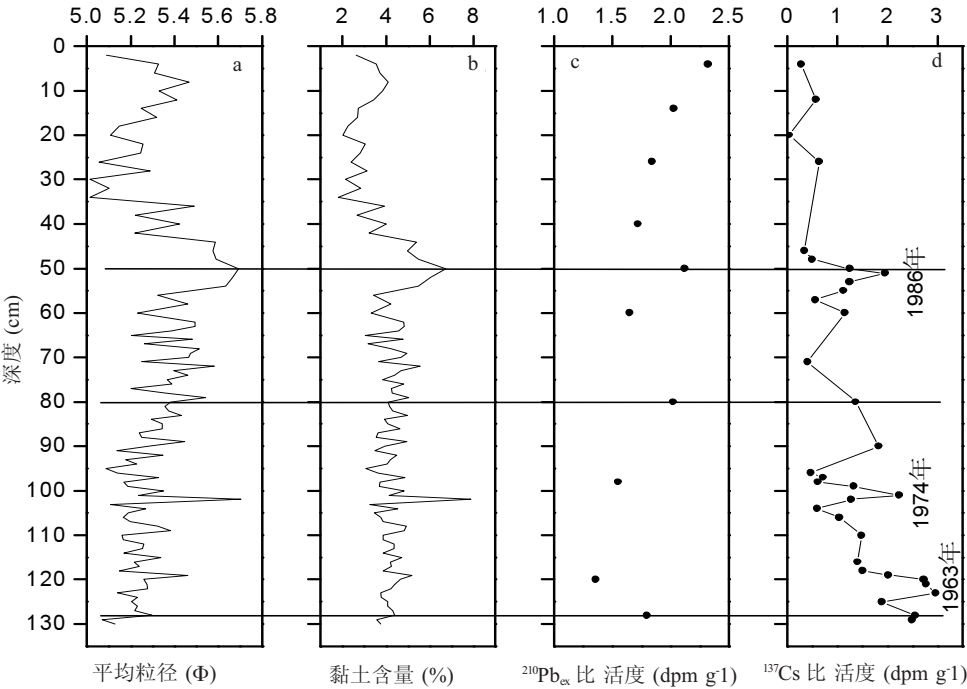


图 2 王港探槽剖面平均粒径、黏土含量及 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 、 ^{137}Cs 比活度变化过程

Fig. 2 Variations in sediment mean grain-size, clay content, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^{137}Cs activity in the sediment profile

矿物内部的 ^{210}Pb 含量不一样，在实验过程中采用氢氟酸进行化学处理，破坏了矿物晶格，使其内部的 ^{210}Pb 释放出来，改变了沉积物中的 ^{210}Pb 含量，而沉积间断界面的存在说明其沉积过程、沉积物来源等发生了变化；风暴潮作用对潮滩沉积过程产生重要影响，风暴潮的作用可使 ^{210}Pb 含量出现高异常^[15]；由于植被根系可以深入到很深的层位，动物洞穴可以延伸到很深的层位，扰动了柱状样沉积层序，引起上下层位的沉积物发生交换，在柱状样采集和探槽挖取过程中也发现了此类现象，柱状样和探槽底部都有草根和生物洞穴分布；此外，由于该地区 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 相差很小，实验误差大约在 10% 左右，这也会在一定程度上造成上下层位 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 差值减小或出现倒置现象。是否考虑这些异常数据点对计算沉积速率来说是非常重要的。假如在计算沉积速率过程中考虑这些异常数据点，不将其剔除，则根据其线性回归曲线的斜率 (图 3a) 计算整个剖面平均沉积速率为 5.3 cm yr^{-1} ，远高于断面重复测量资料 (表 1)；如果将这些异常点剔除，则根据其线性回归曲线斜率 (图 3b) 计算整个剖面平均沉积速率为 3.3 cm yr^{-1} ，与断面重复测量结果一致 (表 1)。在上述计算中，所采用的 ^{210}Pb 本底值为 1.0 dpm g^{-1} 。

3.2 ^{137}Cs 反映的沉积速率

^{210}Pb 和 ^{137}Cs 只有在沉积物样品没有受到扰动或者很少受到扰动的情况下才能真实反映出研究区的沉积速率，而苏北潮滩水动力作用强烈、植被对沉积结构的扰动强烈，沉积环境非常复杂。在该地区利用 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 进行沉积速率研究，其结果的可信度必然会受到怀疑，因此必须要有其他手段作为参照，以更精确地计算研究区的沉积速率。由于 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 的局限性，同一地区的沉积速率需要相互印证^[18]。

根据 ^{137}Cs 分析结果，计算出各样品的 ^{137}Cs 比活度 (图 2d、图 4c、图 5c)。探槽剖面采样深度为 130 cm， ^{137}Cs 测试结果显示有 3 个峰值 (图 2d)，但由于 ^{137}Cs 分布没有到达本底，所以不能轻易作出判断。现假设 123 cm 深度的峰值为 1963 年峰值，计算 1963 年

以来的平均沉积速率为 3.08 cm yr⁻¹，与 ²¹⁰Pb 测年数据及断面重复测量数据一致；假设 51 cm 深度的峰值为 1986 年峰值，分别计算出 1963~1986 年、1986~2003 年两个时段的平均沉积速率为 3.13 cm yr⁻¹ 和 3 cm yr⁻¹，与总平均沉积速率相一致；陈才俊^[19]根据王港地区断面重复测量数据计算在没有栽种大米草之前 (1954~1982 年) 光滩沉积速率为 1.4 cm yr⁻¹，栽种大米草后的 1982~1985 年之间的沉积速率为 4.2 cm yr⁻¹；如果假设本文探槽 101 cm 深度处的峰值为 1974 年峰值，分别计算 1963~1974 年、1974~1986 年的沉积速率为 2 cm yr⁻¹ 和 4.17 cm yr⁻¹，与陈才俊的断面实测数据基本一致。由此可以给出探槽剖面处不同时期的沉积速率 (表 1)。

N9 和 N6 柱状样 (位于互花米草滩) 深度都为 98 cm，测试数据表明都没有达到 ¹³⁷Cs 本底，且在剖面下部出现多个峰值 (图 4c、图 5c)，很难对各个峰值作出假设和判断。出现这种多峰值现象，可能是由于生物扰动作用强烈造成上下层位的沉积物被扰动、混合；分样记录表明 N9 柱状样 50 cm 以下层理不明显，且新鲜的草根较多，整个柱状样上均有洞穴分布；N6 柱状样 67 cm 一下有明显水平层理，以上没有明显层理，且生物洞穴和新鲜草根很多；沉积物粒度分析结果表明 (图 4a、b，图 5a、b)，N9 柱状样在 50~90 cm 之间的沉积物平均粒径波动变化且较粗，黏土含量也是波动变化且比较小，说明上下部沉积物出现过一定的混合和交换过程；N6 柱状样在 67~15cm 以上的沉积物平均粒径和黏土含量变化基本上在波动变化中保持一致，说明沉积物上下交换强烈，沉积物处于高度混合

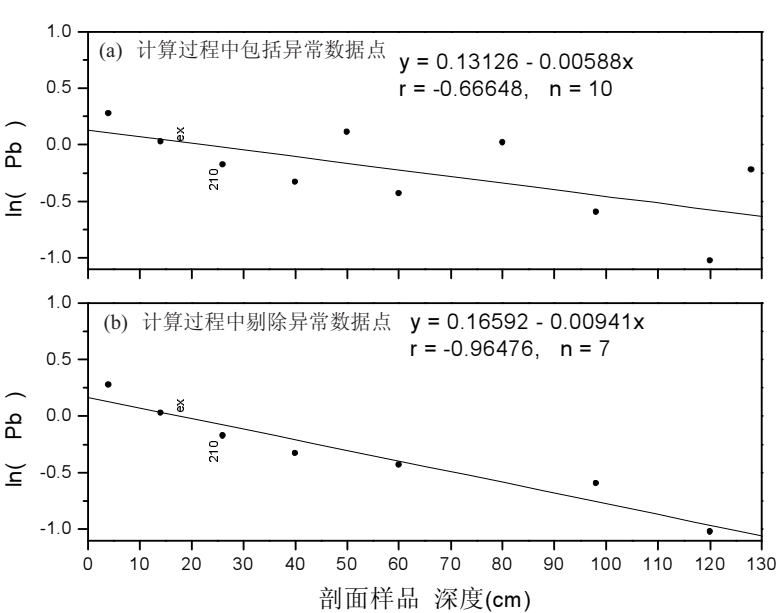


图 3 王港探槽剖面 ²¹⁰Pb_{ex} 测年结果
Fig. 3 Result of ²¹⁰Pb dating data for the sediment profile

表 1 王港盐沼湿地不同时代的沉积速率

Tab. 1 Sedimentation rates in different stages on salt marshes, Wanggang

时间段	沉积速率 (cm yr ⁻¹)	滩面状态	文献 资料来源	测量方法
1980-1981	8.0	引种大米草初期	文献 1)	断面重复测量
1980-1984	4.5	整个断面平均沉积速率	文献[28]	断面重复测量
1954-1982	1.4	光滩	文献[19]	断面重复测量
1982-1985	4.2	引种大米草初期	文献[19]	断面重复测量
1985-1988	2.9	引种大米草中期	文献[19]	断面重复测量
1988-1990	2.3	引种大米草中期	文献[19]	断面重复测量
1963-1974	2.0	光滩	本文	¹³⁷ Cs 分析
1963-1986	3.13*	光滩+大米草滩	本文	¹³⁷ Cs 分析
1974-1986	4.17*	光滩+大米草滩	本文	¹³⁷ Cs 分析
1974-2003	3.48*	光滩+大米草滩	本文	¹³⁷ Cs 分析
1986-2003	3.0	大米草滩	本文	¹³⁷ Cs 分析
1963-2003	3.08*	光滩+大米草滩	本文	¹³⁷ Cs 分析
1963-2003	3.3**	光滩+大米草滩	本文	²¹⁰ Pb 分析

注：*：开始为光滩，70 年代末期引种大米草后被大米草所覆盖；
**：该沉积速率为 120cm 深度以来的沉积速率，开始为光滩，70 年代末期被大米草覆盖。
1) 杨巨海. 江苏省大丰县王港附近淤泥质海滩的沉积规律. 南京大学研究生毕业论文, 1982, 87pp.

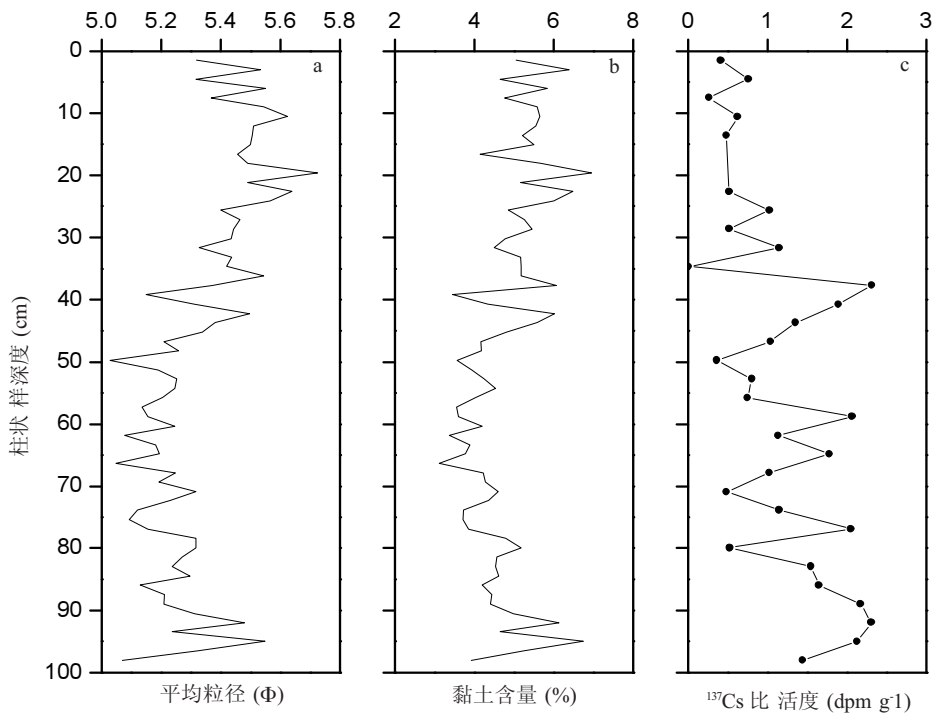


图 4 N9 柱状样平均粒径、黏土含量及 ¹³⁷Cs 比活度

Fig. 4 Variations in sediment mean grain-size, clay content and ¹³⁷Cs activity in Core N9

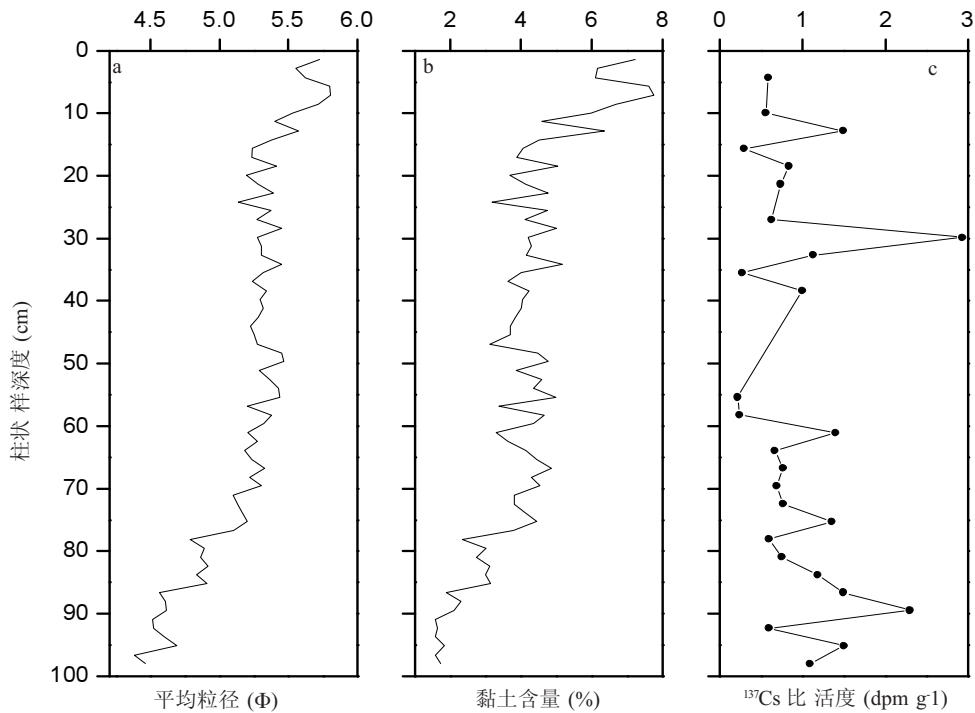


图 5 N6 柱状样平均粒径、黏土含量及 ¹³⁷Cs 比活度

Fig. 5 Variations in sediment mean grain-size, clay content and ¹³⁷Cs activity in Core N6

状态,从而使 ^{137}Cs 的含量发生变化,无法判断出真实的峰值。

3.3 米草对盐沼沉积速率的影响

潮滩的沉积速率与滩面水动力状况、沉积物供应等有关,随着滩面高程的增加,滩面淹没水深减小,潮水带来的沉积物量有所减少,沉积速率逐渐降低。但如果滩面出现盐沼植被,减小了水流速度,沉积速率迅速增加^[20]。对江苏王港地区潮间带来说,根据 1954~1982 年之间的断面测量计算该地区的平均沉积速率为 1.4 cm yr^{-1} ,但在 1982 年在滩面上栽种了大米草后的几年时间里,其沉积速率增加了 3 倍,达到 4.2 cm yr^{-1} ^[9]。

本文测年数据显示,在大米草引种之前,潮滩沉积速率平均为 2 cm yr^{-1} ,但在 70 年代末、80 年代初引种大米草后,潮滩平均沉积速率迅速增加到 4.17 cm yr^{-1} 以上,这主要是由于滩面状况发生变化后引起水流、悬沙结构发生变化,截留了大量沉积物在此发生堆积^[21-25];但随着滩面高程的增加,滩面淹没水深减小,潮水带来的沉积物供应量减少,大米草的促淤作用必然会减弱^[9]。互花米草的出现,不仅对水流具有强烈的扰动作用,对潮滩沉积层序也具有非常强烈的扰动。由于互花米草根系可以伸到地面以下 100 cm 左右的地方,根系的伸展过程造成各沉积层序之间发生扰动,上下层物质发生交换,整个柱状样层理不明显,从而影响了 ^{137}Cs 在剖面上的分布,在剖面上出现多个峰值,不能判断哪个是典型 ^{137}Cs 峰值,直接影响到沉积速率的分析计算(如 N9 柱状样)。

本文通过查阅文献资料和野外综合调查来讨论互花米草的影响。研究区在 1997 年左右才出现互花米草,在这之前为大米草所覆盖,根据滩面高程—沉积速率的负反馈关系可知,随着滩面高程的增加,沉积速率以线性关系递减^[19, 26-27];因此,1986 年以后的沉积速率从小于 4.2 cm yr^{-1} 开始线性递减,按照陈才俊^[19]的观测结果推算,该地区在 1997 年以后滩面沉积速率将小于 1 cm yr^{-1} ,即在 1986~1997 年之间的平均沉积速率为 2.6 cm yr^{-1} ,但 ^{137}Cs 测年分析结果显示该地区在 1986~2003 年之间的平均沉积速率为 3 cm yr^{-1} ,说明在 1997~2003 年间的沉积速率明显加快,根据不同时期平均沉积速率推算,该地区大米草滩在 1997~2003 年间的平均沉积速率可达到 3.7 cm yr^{-1} 。这可能是由于涨潮水流穿过大片互花米草到达大米草滩,水流能量明显减弱,水体中的大量悬浮物开始发生沉积,但落潮初期的水流速度小,无法使滩面沉积物发生再悬浮,由此加快了大米草滩的沉积速率。前人研究结果表明^[28, 29],潮滩盐沼剖面向海方向逐渐降低;但现场潮滩水准测量结果显示,在互花米草滩边缘地区的滩面高程要比其上部的大米草滩略高(约 3.5 cm),说明互花米草滩的沉积速率比大米草滩的沉积速率高,由此推算互花米草滩的平均沉积速率可达到 4.3 cm yr^{-1} 。

盐蒿滩采集的柱状样并没有进行测年分析,但可以根据柱状样沉积物的平均粒径分布特征提取盐蒿滩的相对沉积速率。选取 N2 和 N4 柱状样进行对比分析(图 6)可以看出, N2 柱状样 81~25 cm 与 N4 的 92~36 cm 之间的沉积特征相一致,两者的沉积速率也一致;这可能是由于在当时 N2 位置也被大米草所覆盖,随着滩面高程的增加,逐渐被盐蒿滩所替代。由此可以计算出大米草滩的沉积速率是盐蒿滩的 1.4 倍。

3.4 王港盐沼沉积地貌演化

根据 ^{137}Cs 年代数据,以海堤脚下的防护堤顶面为零点,可以给出不同时期的滩面相对高程(图 7)。由图可以看出,王港潮滩盐沼的演化具有 3 个阶段。第 I 阶段对应的时间段为 1963~1974 年,滩面高程增加缓慢阶段;研究地点处于光滩状态,水沙交换活动和再悬浮过程强烈,测年数据显示该点年平均沉积速率只有 2 cm yr^{-1} 。第 II 阶段对应的时间段为 1974~1986 年,是滩面高程迅速增加的阶段;在 70 年代末、80 年代初引种大米草后,采样点由光滩转变为大米草滩,滩面原有的水流、悬沙之间的动态平衡关系遭到破坏,流速减小,大量物质发生堆积^[21-25],其沉积速率可以达到光滩状态的 3 倍以上^[9],测年数据显示该点年平均沉积速率为 4.17 cm yr^{-1} 。第 III 阶段对应的时间段为 1986~2003

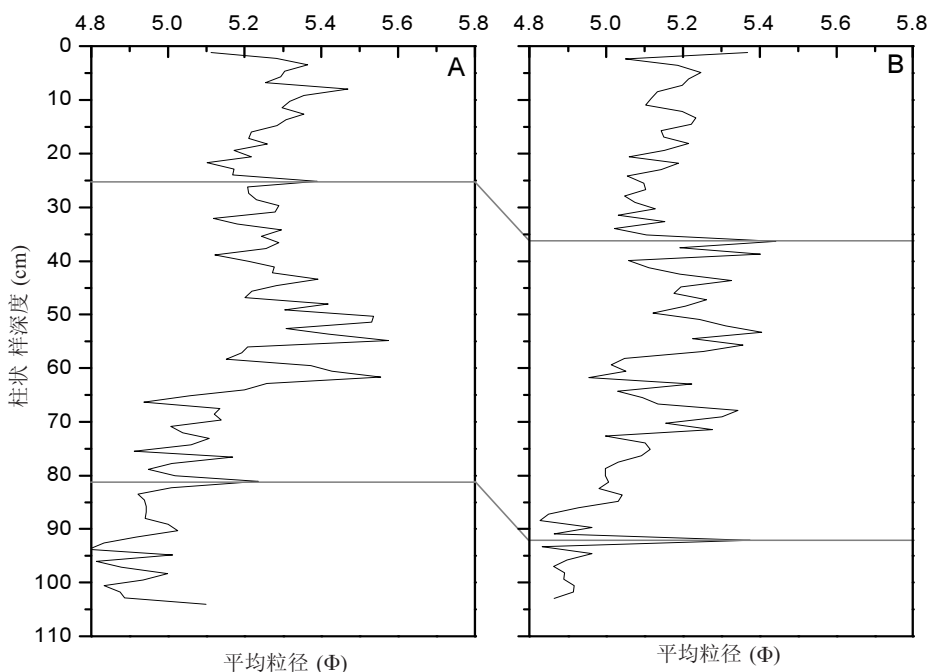


图 6. N2(a)与 N4(b)柱状样沉积物平均粒径对比

Fig. 6 Comparison of mean grain-size between cores N2 (a) and N4 (b)

年, 滩面高程仍然迅速增加阶段; 虽然该点仍为大米草所覆盖, 但随着新的水沙平衡关系的逐渐建立和滩面高程的增加, 陈才俊^[20]的研究结果证实了在大米草盐沼地区也存在滩面高程—沉积速率之间的线性关系, 因此沉积速率开始降低; 但采样点附近自 1997 年后出现了大片互花米草, 涨潮水流穿过大片互花米草到达大米草滩时, 水流能量明显减弱, 水体中的大量悬浮物开始发生沉积, 但落潮初期的水流速度小, 无法使滩面沉积物发生再悬浮, 由此加快了大米草滩的沉积速率, 测年数据显示该点年平均沉积速率为 3 cm yr⁻¹。

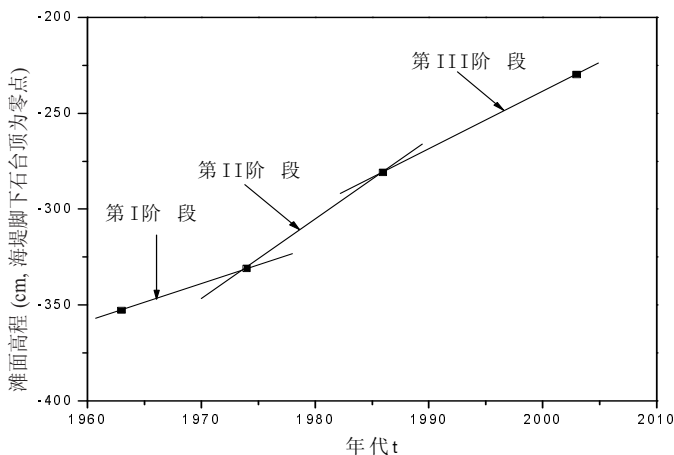


图 7 ¹³⁷Cs 测年揭示的王港潮滩盐沼沉积地貌演化阶段

Fig. 7 Stages of geomorphological evolution as identified by ¹³⁷Cs dating

4 结语

王港地区潮滩盐沼物质较粗, ²¹⁰Pb 和 ¹³⁷Cs 的含量都比较低; ²¹⁰Pb 和 ¹³⁷Cs 在 130 cm 深度的剖面上均未测到本底, 但根据文献资料验证, 估计了 ²¹⁰Pb 的本底值, 推算了 ¹³⁷Cs 峰值的年代, 从而计算出大米草滩 1963~1974 年、1974~1986 年、1986~2003 年时间段内的沉积速率分别为 2、4.2 和 3 cm yr⁻¹。这些结果说明, 米草引种后滩面的沉积过程相对

于引种前的自然过程而言有显著的改变。

根据 ^{137}Cs 测年数据分析, 王港潮滩盐沼的地貌演化过程可划分为 3 个阶段, 分别对应着 3 种不同地貌单元的转换, 第 I 阶段的光滩状态的滩面高程增加速率相对较小; 第 II 阶段生长的大米草具有强烈的促淤作用, 滩面高程迅速增加; 第 III 阶段因附近生长了互花米草, 改变了大米草滩水流悬沙特征, 提高了大米草滩的沉积速率。

致谢: 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室汪亚平、李占海、杨旸、左浩、李婧、陈一宁、陈平等参加了野外采样工作, 吴梓柏协助进行柱状样分样工作, 金平华协助进行 ^{137}Cs 测年, 施晓东进行了 ^{210}Pb 测年工作, 谨致谢忱!

参考文献 (References)

- [1] Ren M E. Comprehensive Investigation of the Coastal Zone and Tidal Land Resources of Jiangsu Province. Beijing: China Ocean Press, 1986, 517. [任美镔. 江苏省海岸带与海涂资源综合调查报告. 北京: 海洋出版社, 1986. 517.]
- [2] Zhu D K. The coast development and exploitation of middle Jiangsu. J. of Nanjing University (Natural Sciences Edition), 1982, (3): 799-818. [朱大奎. 江苏中部海岸发育和开发利用问题. 南京大学学报(自然科学版), 1982, (3): 799-818.]
- [3] Zhong C X, Zhuo R Z. Twenty two years of *Spartina anglica* hubbard in China. Journal of Nanjing University (Research Advances in *Spartina*: Achievements of Past 22 Years), 1985. 31-35. [仲崇信, 卓荣宗. 大米草在我国的 22 年. 南京大学学报(米草研究进展——22 年来的研究成果论文集), 1985. 31-35.]
- [4] Xu G W, Zhuo R Z. Preliminary studies of introduced *Spartina alterniflora* Loisel in China (I). Journal of Nanjing University (Research Advances in *Spartina*: Achievements of Past 22 Years), 1985. 212-225. [徐国万, 卓荣宗. 我国引种互花米草的初步研究(I). 南京大学学报(米草研究进展——22 年来的研究成果论文集), 1985. 212-225.]
- [5] Ren M E. Sedimentation on tidal mud flat of Wanggang Area, Jiangsu. Collected Oceanic Works, 1983, 6(2): 84-108.
- [6] Jia J J, Gao S, Xue Y C. Sediment dynamic processes of the Yuehu inlet system, Shandong Peninsula, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 57: 783-801.
- [7] McManus J. Grain size determination and interpretation. In: Techniques in Sedimentology. Oxford: Blackwell, 1988, 63-85.
- [8] Goldberg E D, Koide M. Rates of sediment accumulation in the Indian Ocean. In: Geiss J, Goldberg E D (eds.), Earth Science and Meteoritics. Amsterdam: North-Holland publishing Company, 1963. 90-102.
- [9] Cao Q Y, Shen D X. Chronology and Experimental Technology of the Quaternary. Nanjing: Nanjing University Press, 1988. 228-252. [曹琼英, 沈德勋. 第四纪年代学及实验技术. 南京: 南京大学出版社, 1988. 228-252.]
- [10] Appleby P G. Radiometric dating of the United Kingdom SWAP sites. Philosophy Royal Society of London, 1990, 327: 233-238.
- [11] Pan S M. Cs-137 profile in sediments in estuaries and its application in sedimentology. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(4): 67-71. [潘少明. 河口港湾沉积物中的 ^{137}Cs 剖面及其沉积学意义. 沉积学报, 1997, 15(4): 67-71.]
- [12] Wan G J. The ^{137}Cs dating of annual layers of recent sediments: examples from Hongfeng Lake and Erhai Lake. Quaternary Sciences, 1999, (1): 73-80.
- [13] Armentano T V, Woodwell G M. Sedimentation rates in a Long Island marsh determined by ^{210}Pb dating. Limnology and Oceanography, 1975, 20(3): 452-456.
- [14] Orson R A, Warren R S, Niering W A. Interpreting sea level rise and rates of vertical marsh accretion in a southern New England tidal salt marsh. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, 47: 419-429.
- [15] Zhang R S, Chen C J. Evolution of Jiangsu Offshore Banks (Radial Offshore Tide Sands) and Probability of Tiaozi Sands Merged into Mainland. Beijing: China Ocean Press, 1992, 124.
- [16] Chen J. Sedimentary characteristics of the Erfenshui tidal ridge of the Tiaozi sandbank off Jiangsu province. Marine Science Bulletin, 2003, 22(3): 23-30. [陈君. 江苏岸外条子泥二分水滩脊的沉积特征. 海洋通报, 2003, 22(3): 23-30.]
- [17] Xia X M, Xie Q C, Li Y et al. ^{137}Cs and ^{210}Pb profiles of the seabed cores along the East China Sea coast and their implications to sedimentary environment. Donghai Marine Science, 1999, 17(1): 20-27. [夏小明, 谢钦春, 李炎 等. 东海沿岸海地沉积物中的 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 分布及其沉积环境解释. 东海海洋, 1999, 17(1): 20-27.]
- [18] Chih-an Hub, Chih-Chieh Su. Sedimentation dynamics in the East China Sea elucidated from ^{210}Pb , ^{137}Cs and $^{239-240}\text{Pu}$. Marine Geology, 1999, 160: 183-193.
- [19] Chen C J. Effect of increasing deposition and defending seashore by planting *Spartina Anglica* on beach in Jiangsu province. Marine Science Bulletin, 1994, 13(2): 55-61. [陈才俊. 江苏滩涂大米草促淤护岸效果. 海洋通报, 1994, 13(2): 55-61.]

- [20] Kestner F J T. The Loose-boundary regime of the Wash. *The Geographical Journal*, 1975, 141: 388-414.
- [21] Stumpf R P. The process of sedimentation on the surface of a salt marsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1983, 17: 495-508.
- [22] Zhuang W Y, Shebel J. Influence of seagrass on tidal flat sedimentation. *Acta Oceanologica Sinica*, 1991, 13 (2): 230-239. [庄武艺, 谢佩尔. 海草对潮滩沉积作用的影响. *海洋学报*, 1991, 13(2): 230-239.]
- [23] Yang S L, Chen J Y. The role of vegetation in mud coast processes. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1994, 25(6): 631-634. [杨世伦, 陈吉余. 试论植物在潮滩发育演变中的作用. *海洋与湖沼*, 1994, 25(6): 631-634.]
- [24] Yang S L. Influence of tidal marsh vegetations on hydrodynamics and sedimentation in the Changjiang Estuary. *Acta Ocean. Sinica*, 2001, 23(4): 75-80. [杨世伦. 长江口潮沼植物对沉积动力过程的影响. *海洋学报*, 2001, 23(4): 75-80.]
- [25] Zhu J. Cross-shore difference in short-term evolution of muddy intertidal flat using a quantificational method. *Geographical Research*, 2001, 20(4): 423-430. [朱骏. 潮间带短期冲淤过程的横向差异及其定量表达. *地理研究*, 2001, 20(4): 423-430.]
- [26] Pethick J S. Long-term accretion rates on tidal salt marshes. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1981, 51: 571-577.
- [27] Gao S, Collins M B. Formation of salt-marsh cliffs in an accretional environment, Christchurch Harbour, southern England. In: Wang P X, Bergran W (eds.), *Proceedings of the 30th International Geological Congress (Vol. 13: Marine Geology and Palaeoceanography)*. Amsterdam: VSP Press, 1997. 95-110.
- [28] Gao S, Zhu D K. The profile of Jiangsu's mud coast. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences Edition)*, 1988, 24 (1): 75-84. [高抒, 朱大奎. 江苏淤泥质海岸剖面的初步研究. *南京大学学报 (自然科学版)*, 1988, 24(1): 75-84.]
- [29] Chen C J. Development of depositional tidal flat in Jiangsu province. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1991, 22(4): 360-368. [陈才俊. 江苏淤长型淤泥质潮滩的剖面发育. *海洋与湖沼*, 1991, 22(4): 360-368.]

Contemporary Sedimentation Rates on Salt Marshes at Wanggang, Jiangsu, China

WANG Aijun^{1,2}, GAO Shu², JIA Jianjun³, PAN Shaoming²

(1. *Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen 361005, China;*

2. *Ministry of Education Key Laboratory for Coast and Islands Development, Nanjing University, Nanjing 210093, China;*

3. *Key Laboratory of Geo-Marine Sciences, Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China)*

Abstract: The total area of coastal wetlands exceeds 5000 km² in Jiangsu Province, China, but it has been decreasing rapidly as a result of intense reclamation activities. Two types of plants, *Spartina angelica* and *Spartina alterniflora*, were introduced successively into the Jiangsu coast, in order to protect the coastline from erosion and to increase the accumulation rate. ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs analyses were carried out for sediment samples from the salt marshes of Wangang, to derive the sedimentation rate, on the basis of an evaluation of the background values and factors affecting the enrichment of ²¹⁰Pb. Analysis of a typical sediment column of the tidal flat shows that the absorption of ²¹⁰Pb in the silt-dominated sediment is weak. Influences of storm events, bioturbation, material sources and analytical error also have an effect. As a result, some abnormal data points are present. These data were removed before the calculation of the sedimentation rate. The sedimentation rate was 3.3 cm a⁻¹ on average. Based upon analysis of the ¹³⁷Cs dating, the rate since 1963 was 3.1 cm a⁻¹ on average, similar to the data by ²¹⁰Pb dating and from previous studies.

Key words: salt marshes; sedimentation rates; ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs dating; *Spartina*; Jiangsu coast