

互花米草对江苏潮滩沉积和地貌演化的影响

王爱军¹, 高 抒², 贾建军^{3,4}

(1 海洋与海岸地质环境开放实验室, 国家海洋局 第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2 南京大学 海岸与海岛教育部重点实验室, 江苏 南京 210093; 3 国家海洋局海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 4 国家海洋局 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要: 江苏潮滩面积大, 岸滩冲淤动态变化复杂. 人工引种互花米草对江苏海岸潮滩沉积地貌演化有较大影响, 主要体现在影响潮滩沉积速率、物质分布及潮水沟地貌系统的发育等方面. 根据定点站位不同年代的高程数据, 分析 Pethick-Allen 模型在江苏潮滩盐沼的适用性; 在现场采集柱状样并在室内进行¹³⁷Cs 分析, 根据分析结果及前人研究结果, 利用 P-A 模型分析计算江苏潮滩不同时期的沉积速率, 结果表明互花米草的引种加快了潮滩沉积速率, 它使潮滩沉积地貌演化脱离了原来的渐进函数关系. 在选择的典型断面上采集表层底质样, 在激光粒度仪上进行粒度分析, 结果表明, 互花米草易使细颗粒沉积物沉积, 大米草滩和盐蒿滩表层沉积物主要来自潮水沟输送. 根据野外调查并结合遥感分析, 互花米草滩内潮水沟宽深比小, 密度大, 水道稳定, 有别于光滩或大米草滩的潮水沟形态.

关键词: 互花米草; 潮滩; 沉积; 地貌演化; 江苏

中图分类号: P736.21, P737.1

文献标识码: A

文章编号: 0253-4193(2006)01-0092-08

1 引言

潮滩是在潮汐作用显著、细颗粒沉积物供应丰富条件下形成的一种地貌类型, 是海岸系统的重要组成部分, 受人类活动的影响显著, 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. 从 20 世纪 30 年代起, 许多研究者注意到潮滩物质从高潮位到低潮位的带状分布, 并将此现象与水动力条件相联系, 此后各国研究者对潮滩沉积的分带性进行了系统的描述和研究, 并提出了潮滩物质自陆向海的分布规律^[1-5]. 不少研究者发现潮滩滩面高程与潮滩年龄有关. Kestner^[6] 在英国沃什湾的研究表明, 潮滩淤积速率与滩面高程之间存在着负反馈. 随着潮滩的淤高, 潮水淹没时

间逐渐缩短, 滩面开始生长盐蒿等耐盐植被, 形成盐沼湿地. 盐沼湿地上层因沉积物淤积引起高程增大, 从而导致在潮水淹没的时间内水深减小, 带到盐沼上的悬浮物的量减少, 潮水淹没时间缩短, 又引起盐沼沉积速率降低. 这一关系被 Pethick^[7] 发展为 Pethick 模型, 并应用于英国诺福克潮滩. 在考虑了海面速率的变化^[8]、沉积物自压实过程^[9]、区域地壳运动^[10] 等因素的影响后, Allen^[11] 对滩面加积模型进行了综合性的总结. Pethick-Allen 模型被广泛应用于潮滩沉积层序形成的模拟. Temmerman 等^[12] 的工作进一步证实了滩面高程与盐沼年龄之间存在的关系, 并利用修改后的零维时间-步长模型模拟了盐沼的演化过程.

当潮滩表面生长了植被形成盐沼后, 潮滩的沉

收稿日期: 2005-04-14; 修订日期: 2005-06-06.

基金项目: 自然科学基金委员会重点基金资助项目(40231010); 国家自然科学基金资助项目(40476041).

作者简介: 王爱军(1977-), 男, 宁夏回族自治区平罗县人, 助理工程师, 硕士, 从事自然地理学和海洋沉积研究. E-mail: ajwang_7708@shou.com

积过程受到植被的影响^[13],其影响程度因不同植被状况对水流结构、边界层参数及悬沙沉降和再悬浮通量等的影响不同而产生差异^[11,14-17].互花米草粗壮高大,植株密度大,根系可伸入地下1 m以下,对滩面水流产生强烈扰动,显著地改变了潮滩表层沉积物的分布特征^[18],并对潮水沟的发育和演化过程产生重要影响^[19],从而成为近年来的研究重点.江苏海岸动态变化幅度大,北部和中部地区侵蚀和淤积强度大,潮滩盐沼年龄短.随着人类围滩造田活动的加剧,潮滩可供围垦的地区越来越少,为了保护海岸和增加滩面淤积速率,从国外引入了大米草和互花米草,它们对江苏现代潮滩盐沼的沉积和地貌演化过程的影响非常显著.本文通过提取不同年代的滩面高程数据,应用 Pethick-Allen 模型探讨互花米草引种对江苏潮滩盐沼沉积速率的影响,通过现代表层底质样品、悬沙水样的采集和分析、遥感资料分析以及野外地貌调查,研究互花米草引种对江苏潮滩盐沼物质分布及潮水沟地貌系统发育的影响.

2 研究区概况

江苏沿海淤泥质潮滩岸线总长度约为 880 km,目前潮间带中上部大部分地区已经被米草植被覆盖.江苏潮滩地区的大米草植被有两种类型,即英国大米草(*Spartina angelica*)和美国互花米草(*Spartina alterniflora*).大米草于 1963 年被引入我国,并于 1964 年开始在江苏潮滩栽种^[20],它适于生长在温带泥质海岸潮间带中、上部,植株的地上部分一般高度为 20~30 cm,是一种开发海滩的先锋植被;互花米草于 1979 年引入我国^[21],并于 1982 年在江苏潮滩地区栽种,是一种耐盐、耐淹的禾本科米草属多年生草本植物,植株高大、粗壮,地上部分高 1 m 以上,根系发达,地下茎和须根主要密布于 30 cm 以内土层内.互花米草在江苏海岸蔓延速度非常快,根据不同时期的航片和卫片资料分析显示,江苏王港潮间带互花米草在 1995~1997 年向海延伸速率达到了 1 km/a.在大米草和互花米草覆盖的潮间带地区,都表现出了强烈的淤积过程,它们改变了潮滩地貌发育和演变的过程.

本文研究地点为王港潮滩,它位于江苏沿海中部地区,是江苏海岸为数不多的较为完整的潮滩体系之一,由陆向海分别是盐蒿滩、大米草滩、互花米草滩、泥砂混合滩及粉砂细沙滩(图 1),在岸外辐射

沙脊群之间为向北开敞的西洋海域^[22],潮间带宽 10 km,平均坡度为 0.55×10^{-3} ,属典型淤泥质海岸;区内潮汐为典型半日潮,平均潮差为 3.68 m.该区多年平均气温为 14.4 °C,年平均相对湿度为 81%,多年平均降水量为 1 087.8 mm.受海洋性季风影响,夏季盛行风向为南东,并受热带气旋影响;冬季盛行风向为北西^[23].

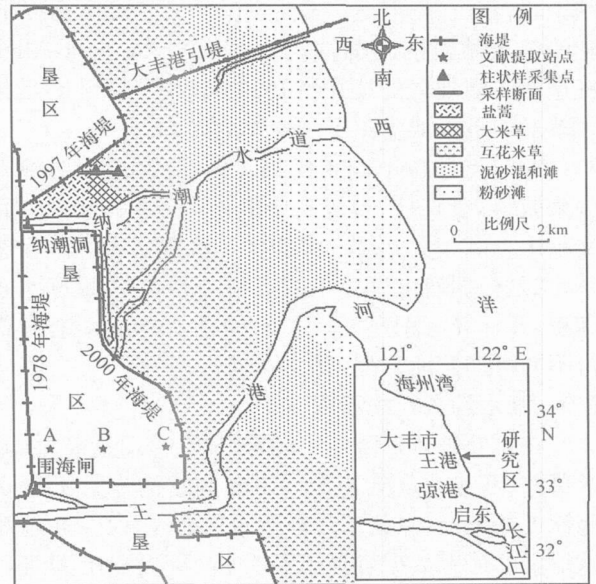


图 1 研究区位置及采样分布

3 研究方法

3.1 样品的采集和分析

2003 年 7 月在大丰港南侧海堤(建于 1997 年)附近选择一条由盐蒿滩逐步向海过渡到大米草滩、互花米草滩的剖面,按一定间距采集了表层底质样品,采样深度不超过 1 cm;在密集大米草的滩内挖取探槽一个并进行垂向剖面采样,在密集互花米草的滩内采集柱状样 1 个(位置见图 1),并在室内以 1 cm 间隔进行分割.取子样约 2 g 放入小烧杯,加入 0.5% 的六偏磷酸钠($[\text{NaPO}_3]_6$)浸泡 24 h,用英国马尔文公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行粒度分析,获得 $\Phi 4$ 间隔的粒度分布数据;对于沉积物分类和命名采用 Shepard 的分类系统^[24],中值粒径从粒度分析结果直接读出,其他粒度参数(平均粒径、分选系数、偏态、峰态)采用矩值法^[25]计算得出.将分割后的柱状样和探槽剖面样品研磨至 100 μm 以下,利用 α 谱仪进行 ^{137}Cs 分析.

3.2 滩面高程与淤积速率关系的确定

Pethick^[7]对诺福克潮滩的盐沼年龄-滩面高程之间的关系进行了详细的研究,发现两者之间的关系可以用渐进函数模型表达: $h = a - be^{-ct}$, 其中 h 为盐沼表面高程; t 为盐沼年龄; a , b 和 c 为常数. 该结果被后来的研究者进一步证实^[8-10,12], 并进一步被发展为 Pethick-Allen 模型^[11]; 根据该模型的结论, 盐沼沉积速率呈线性递减^[26]. 本文根据提取到的定点站位的滩面高程数据分析 Pethick-Allen 模型在王港地区的适用性, 并根据该模型讨论互花米草对王港潮滩盐沼沉积速率的影响.

对定点站位不同年代的滩面高程, 使用两种方法来获得: (1) 从已有资料中提取, 一是从过去文献中查阅相关站位的滩面实测高程及实测沉积速率, 二是根据研究区多年的实测地形资料, 量算滩面高程, 并计算沉积速率; (2) 根据柱状样测年结果获得不同时期滩面高程, 并计算沉积速率.

3.3 潮水沟资料的获取

在野外进行潮滩地貌调查过程中, 对盐蒿滩、大米草滩、互花米草滩和光滩内的潮水沟进行了宽度和深度的测量, 以此来计算潮水沟的宽深比. 通过对该地区的遥感数据资料进行分析, 可提取出潮滩不同地貌单元的面积及其内部潮水沟的面积, 以此来计算潮水沟密度.

4 结果和讨论

4.1 互花米草对潮滩沉积速率的影响

根据研究区内设置的断面重复测量^[27]及从该区 1993 年 1:10 000 地形图、1999 年 1:10 000 地形图上读取该断面不同部位的高程数据. 根据断面数据, 分别得到了盐蒿、大米草和互花米草所覆盖的 A, B, C 三个站位 (见图 1) 不同时期滩面高程 (表 1).

表 1 王港潮滩盐沼年龄-高程

年龄/a	滩面高程/m		
	A	B	C
1	2.15	1.65	1.40
3	2.28	1.86	1.45
4	2.49	1.94	1.47
16	2.60	2.00	1.55
22	2.64	2.22	1.90

根据野外调查、查阅资料和民间访问等方法, 可以确定 A 处自 1978 年以来一直为盐蒿所覆盖, B 处为大米草, 引种年代为 1978 年, 而 C 处的互花米草则是在 1993 年左右才蔓延过来的, 因此可以将 1977 年的潮滩表面高程作为 0 a 高程. 滩面最后一次观测年代为 1999 年, 因此将 1999 年作为研究时段的上限. A 处直到 1999 年围垦都为盐蒿所覆盖, B 处在 1993 年之前为大米草所覆盖, 1993 年以后开始被互花米草所替代, 而 C 处在 1993 年以前一直为光滩, 从 1993 年开始为互花米草所覆盖.

分别将 A, B, C 三个站位的滩面高程-潮滩 (盐沼) 年龄数据作图分析, 发现在未受大米草和互花米草影响的 A 站位, 盐沼表面高程与盐沼年龄对应数据的拟合曲线非常好地符合 P-A 模型 (见图 2a, b), 但是淤长速度明显高于后者; B, C 两个站位 1993 年以前的数据表明 P-A 模型在该区域也适用 (见图 2c, d), 但互花米草的生长极大地改变了原有演化模式, 快速的促淤效果使大米草滩和光滩的滩面高程迅速增加, 由此可知互花米草引种后的 B, C 两站位的沉积速率分别为 3.7 和 5.8 cm/a.

¹³⁷Cs 分析结果显示, 由于互花米草的强烈扰动作用, 在密集的互花米草滩内柱状样沉积物的 ¹³⁷Cs 含量被强烈扰动, ¹³⁷Cs 含量在剖面上出现多个峰值, 无法分析沉积速率; 在密集的大米草滩内探槽剖面出现了三个峰值, 根据峰值对不同时段的沉积速率进行了估算, 并与实际断面重复观测结果进行了对比, 对三个峰值进行了判断, 确定了其具体年代, 并由此计算了不同年代的沉积速率, 结果显示, 1963~1974, 1974~1986, 1986~2003 年的平均沉积速率分别为 2.00 和 4.17 和 3.00 cm/a^[28], 与陈才俊^[29]根据断面实测数据计算的沉积速率一致. 测年分析虽然没有直接得出互花米草滩的沉积速率, 但可以根据前文得到的数据资料及已有研究结果^[28], 利用 P-A 模型来讨论互花米草滩的沉积速率. 探槽剖面附近区域在 1997 年左右才出现互花米草, 在这之前为大米草所覆盖; 根据前文的研究结果, 王港地区大米草滩的演化符合 P-A 模型. 利用陈才俊^[29]在王港地区的断面观测数据进行推算, 该地区大米草滩的沉积速率在 1997 年下降到 1 cm/a, 由此可计算出 1986~1997 年的平均沉积速率为 2.6 cm/a, 而 ¹³⁷Cs 测年结果显示该地区 1986~2003

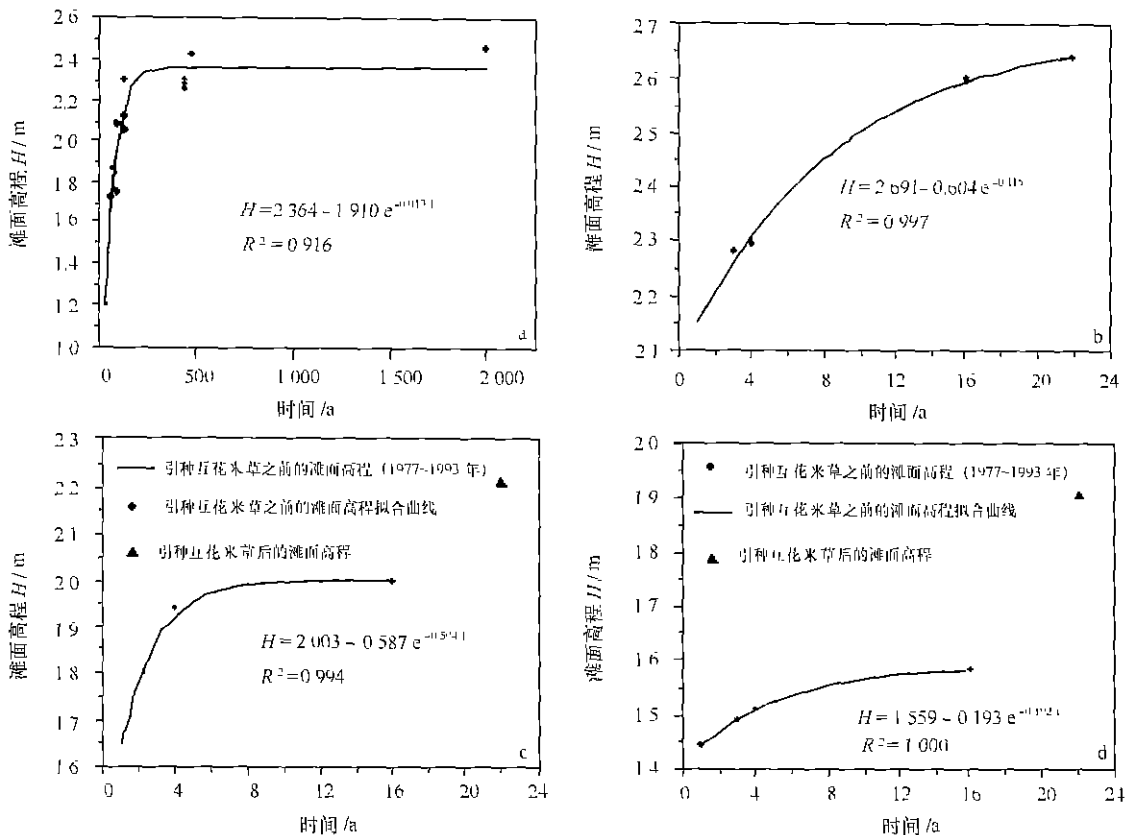


图2 潮滩(盐沼)沉积模式

a 诺福克盐沼研究结果^[7], b 王港潮滩 A 站位, c 王港潮滩 B 站位, d 王港潮滩 C 站位

年的平均沉积速率为 3.0 cm/a, 说明在 1997~2003 年的平均沉积速率大于 3.0 cm/a, 根据 P-A 模型及上述几个时间段的平均沉积速率可以推算, 王港大米草滩在 1997~2003 年的平均沉积速率为 3.7 cm/a. 这可能是由于一部分涨潮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, 同时通过潮水沟输送到大米草滩的沉积物也因水动力减弱而发生堆积; 由于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^[30,31], 王港潮滩盐沼剖面向海方向逐渐降低; 现场潮滩水准测量结果显示, 在互花米草滩向上部大米草滩过渡的边缘地区, 其滩面高程要比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, 并由此可推算出互花米草滩 1997~2003 年的平均沉积速率约为 4.3 cm/a.

4.2 互花米草对沉积物分布的影响

对王港潮间带表层样粒度分析结果表明, 互花

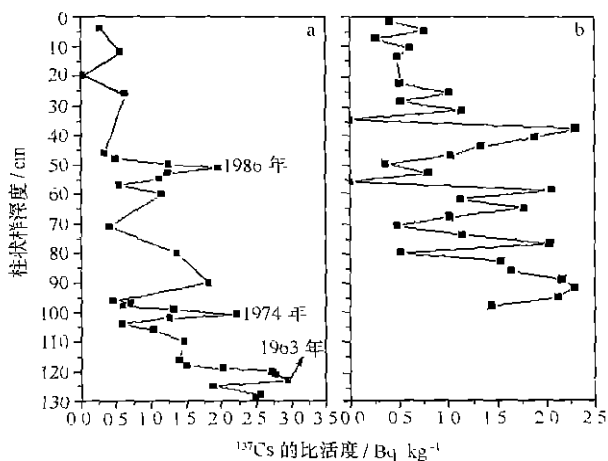


图3 大米草滩和互花米草滩柱状样的¹³⁷Cs分析

a 为大米草滩探槽剖面沉积物的¹³⁷Cs比活度, b 为互花米草滩柱状样沉积物的¹³⁷Cs比活度

米草滩内沉积物平均粒径为 5.50 Φ~ 6.13 Φ, 平均为 5.81 Φ, 是潮滩剖面上沉积物最细的地貌单元; 分选系数为 1.30~1.63, 分选程度较差; 沙含量为

3.74%~10.62%, 平均含量仅为 8.07%; 黏土含量为 5.40%~9.44%, 相对较高. 沉积物频率分布曲

线显示(图 4), 互花米草滩内的沉积物粒径呈近对称分布, 峰值较宽.

表 2 王港潮间带表层沉积物粒度参数

地貌位置	中值粒径 Φ	平均粒径 Φ	分选系数	偏态	峰态	沙含量 (%)	粉砂含量 (%)	黏土含量 (%)
盐蒿滩	5.374	5.565	1.332	1.026	1.713	10.16	83.52	6.31
大米草滩	5.317	5.503	1.341	0.679	1.804	9.72	84.73	5.55
互花米草滩	5.693	5.808	1.402	0.316	1.808	8.07	84.48	7.45
泥沙混合滩	4.680	5.121	1.695	1.853	2.489	28.56	62.42	9.02
粉砂滩	3.795	4.029	1.187	1.418	1.974	64.01	32.73	3.26

在自然状态下潮滩表层沉积物平均粒径由陆向海递增, 分选变好^[2, 23, 32, 33], 这一变化趋势在王港潮间带因生长互花米草而发生了变化. 现场测量结果显示, 夏季互花米草的平均株高约为 112 cm, 密度可达 73 株/m². 互花米草分布密集, 其茎和叶对水流具有强烈的缓冲作用, 可以显著减缓流速, 降低潮流搬运能力, 起到捕捉悬浮泥沙的作用, 从而增加了沉积速率^[34]; 对澳大利亚库纳湾潮间带^[14]和长江口潮滩^[17]的研究结果都表明, 植被的存在可以显著地影响潮滩水流流速和悬沙浓度的分布.

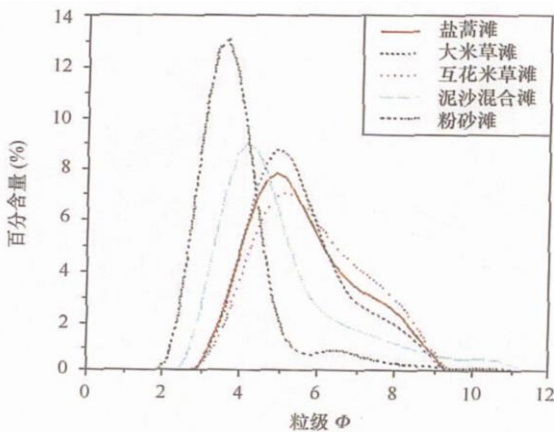


图 4 王港潮间带表层沉积物频率分布

本文虽没有进行互花米草滩内的水动力观测, 但可以根据表层沉积物和悬沙水样的粒度特征来分析互花米草对潮滩物质分布的影响. 在潮间带下部的粉砂滩, 潮流作用强烈, 并伴有较强的波浪作用^[35], 滩面微地貌发育, 只有粗颗粒物能在滩面维持稳定, 细颗粒物发生再悬浮被向岸和向海输运, 沉积物分选好(平均分选系数为 1.19). 随着向

岸的推进, 在到达互花米草滩前缘的泥沙混合滩附近, 涨潮过程中的潮流动力和波浪作用因底部摩擦作用而逐渐减弱, 较粗颗粒发生沉积; 涨潮流受前方互花米草的阻挡而使流速有所减缓, 水流携沙能力减弱, 部分细颗粒物也沉积在此(平均粒径为 4.40 Φ ~6.09 Φ), 因此表层沉积物颗粒粗细组分都比较高, 分选很差(平均分选系数为 1.70). 当水流进入互花米草滩后, 由于互花米草密集的茎和叶的缓冲作用, 流速急剧减小, 少量的粗颗粒物质和大量的细颗粒泥沙都沉积在互花米草滩内, 因此其表层沉积物的物质粗细变化很大(平均粒径为 5.50 Φ ~6.13 Φ), 分选程度很差(平均分选系数为 1.40). 当水流到达潮间带上部的大米草滩和盐蒿滩后, 水体中的悬沙颗粒很细, 实测悬沙平均粒径为 6.42 Φ ~6.75 Φ , 平均为 6.64 Φ . 研究表明, 潮间带上部盐沼的水沙大多是通过潮水沟系统输送过来的^[34]; 王港潮滩潮水沟系统非常发育, 在外海与潮间带上部盐沼进行水沙交换过程中起着重要的连接作用, 因此沉积到大米草滩和盐蒿滩表面的物质主要来源于潮水沟输送, 这一结论得到了现场观测的证实: 大米草滩和盐蒿滩潮水沟的净输沙方向为向海输运^[36], 但根据测年分析, 大米草滩和盐蒿滩依然表现为淤积, 这说明涨潮过程中通过滩面水流输送的部分悬沙在落潮过程中通过潮水沟被输送到外海, 而通过潮水沟输送上来的部分粗颗粒物质在滩面上发生了沉降. 对进入盐蒿滩和大米草滩潮水沟一个潮周期内悬沙水样的粒度分析结果显示(见图 5), 涨潮悬沙平均粒径为 5.63 Φ ~6.07 Φ , 平均为 5.87 Φ , 且在涨潮过程中变化较小; 落潮悬沙平均粒径为 5.51 Φ ~6.31 Φ , 平均为 5.91 Φ , 但粗颗粒悬沙主要出现在落

潮后期,这主要是由于落潮后期潮沟内流速变大、潮水沟底部物质发生再悬浮造成的^[37],因而大米草滩和盐蒿滩的表层沉积物比互花米草滩的粗。

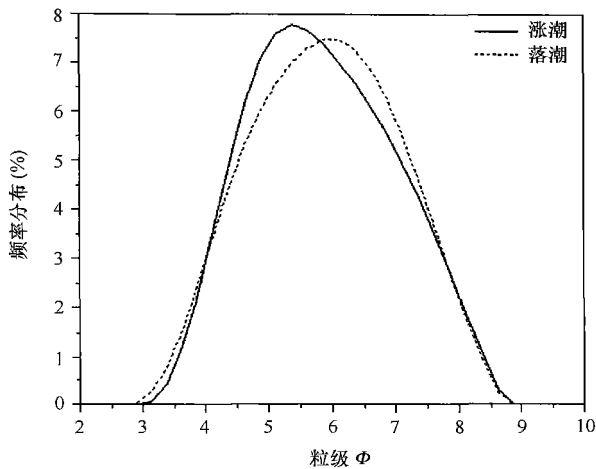


图5 潮水沟涨潮和落潮悬沙平均频率分布曲线

4.3 互花米草对潮水沟地貌系统演化的影响

关于江苏潮间带潮水沟的密度及形状已有研究者根据现场调查结合遥感图片资料做了相关研究^[19,38]。互花米草根系发达,可以固结滩面沉积物而使之不容易被水流带走,从而使细颗粒沉积物在此沉积。因此,互花米草滩沉积物颗粒较细的性质决定了潮水沟发育过程中的塌陷现象很少,潮水沟宽度小、深度大,而光滩和盐蒿滩内则因沉积物颗粒较粗而在潮沟在发育过程中经常出现塌陷现象,使潮水沟宽度大、深度浅。在江苏王港潮滩进行的现场测量结果显示,互花米草滩内潮水沟宽深比小(约为5.0),盐蒿滩和光滩潮水沟的宽深比都比较大,大米草滩潮水沟的宽深比介于两者之间(表3)。随着互花米草滩的扩展和淤高,滩内潮水沟系统通过形成新的潮水沟并增加潮水沟密度进行自身调节以适应盐沼的扩展^[39];由于互花米草滩内植被覆盖密度较大,因此潮水沟发育规模受到限制,滩面上发育了很多小的潮水沟,其密度(即单位面积内潮水沟的面积)可达到 $0.112\text{km}^2/\text{km}^2$;盐蒿滩和光滩潮水沟密

度很小,大米草滩潮水沟密度介于两者之间(表3)。

潮间带光滩地带的潮水沟变化速度快,摆动幅度大。对2003年夏季在王港潮滩的现场观测表明,到落潮后期滩面薄层水流主要通过潮水沟向外海输

表3 王港潮间带潮水沟特征

	光滩	盐蒿滩	大米草滩	互花米草滩
宽深比	16 667	8 667	8 444	4 902
密度/ $\text{km}^2 \cdot \text{km}^{-2}$	0 039	0 044	0 098	0 112

出,在没有互花米草生长的滩面,目测滩面归槽水在潮沟内的流速约为 1.5m/s ;由于滩面物质松散,潮水沟溯源侵蚀很快,目测其速度最高可以达到 1m/min ;潮水沟在一个潮周期内的摆动幅度可以达到几十米甚至上百米,但在互花米草滩,潮水沟稳定,滩面归槽水悬沙浓度低,潮水沟内的水流不断冲刷沟底及两侧,使潮水沟不断刷深、扩大。

5 结论

(1) 根据不同途径得到的不同年代滩面高程数据计算了沉积速率,结果表明,大米草滩和盐蒿滩的地貌演化很好地符合 Pethick-Allen 模型;互花米草由于明显的促淤作用,加速了潮滩的沉积速率,从而使潮滩地貌演化脱离了原来的发育模式。

(2) 王港地区断面表层底质样的粒度参数显示,互花米草易使细颗粒物质沉降堆积,改变潮滩表层物质的分布;大米草滩和盐蒿滩表层沉积物主要来自潮水沟输送,因此沉积物比互花米草滩的粗。

(3) 遥感分析和野外调查发现,相对于盐蒿滩和光滩,互花米草滩内潮水沟宽深比小,密度大,水道稳定。

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、陈一宁、陈平平、李婧、左浩等参加了采样工作,吴祥柏参加了室内样品分析工作,谨致谢忱。

参考文献:

- [1] 王颖. 渤海湾西部贝壳堤与古海岸线问题[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1964, 8(3): 424-442
- [2] EVANS G. Intertidal flat sediments and their environments of deposition in the Wash[J]. Quarterly Journal of Geological Society of London, 1965, 121: 209-245.
- [3] EVANS G, COLLINS M B. The transportation and deposition of suspended sediment over the intertidal flats of the Wash[A]. HAILS J, CARR A. Nearshore Sediment Dynamics and Sedimentation[C]. Chichester: John Wiley and Sons, 1975. 273-306.
- [4] 朱大奎, 许廷官. 江苏中部海岸发育和开发利用问题[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1982, (3): 799-805.

- [5] WANG Y. The mudflat system of China[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1983, 40(Sup. 1): 160—171.
- [6] KESTNER F J T. The loose boundary regime of the Wash[J]. The Geographical Journal, 1975, 141(3): 388—414.
- [7] PETHICK J S. Long-term accretion rates on tidal salt marshes[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1981, 51(2): 571—577.
- [8] KRONE R B. A method of simulating historic marsh elevations[A]. KRAUS N E. Coastal Sediments' 87[C]. New York: American Society of Civil Engineers, 1987. 316—323.
- [9] ALLEN J R L. Salt-marsh growth and stratification: a numerical model with special reference to the Severn Estuary, southwest Britain[J]. Marine Geology, 1990, 95: 77—96.
- [10] FRENCH J R. Numerical simulation of vertical marsh growth and adjustment to accelerated sea-level rise, north Norfolk, U K [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 1993, 18: 63—81.
- [11] 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: 1 155—1 231.
- [12] TEMMERMAN S, GOVERS G, MEIRE P, et al. Modeling long-term tidal marsh growth under changing tidal conditions and suspended sediment concentrations, Scheldt estuary, Belgium[J]. Marine Geology, 2003, 193: 151—169.
- [13] 杨世伦, 陈吉余. 试论植物在潮滩发育演变中的作用[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(6): 631—634.
- [14] 庄武艺, 谢佩尔 J. 海草对潮滩沉积作用的影响[J]. 海洋学报, 1991, 13(2): 230—239.
- [15] 时 钟. 海岸盐沼植物单向恒定水流流速剖面[J]. 泥沙研究, 1997, 3(1): 82—88.
- [16] YANG Shi-lun. The role of Scirpus marsh in attenuation of hydrodynamics and retention of fine sediment in the Yangtze estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, 47: 227—233.
- [17] 杨世伦, 时 钟, 赵庆英. 长江口潮沼植物对沉积动力过程的影响[J]. 海洋学报, 2001, 23(4): 75—80.
- [18] NETTO S A, LANA P C. Influence of *Spartina alterniflora* on superficial sediment characteristics of tidal flats in Paranaguá Bay (southeastern Brazil)[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1997, 44: 641—648.
- [19] 沈永明, 张忍顺, 王艳红. 互花米草盐沼潮沟地貌特征[J]. 地理研究, 2003, 22(4): 520—527.
- [20] 仲崇信, 卓荣宗. 大米草在我国的二十二年[A]. 米草研究进展: 22年来的研究成果论文集[C], 南京: 南京大学出版社, 1985. 31—35.
- [21] 徐国万, 卓荣宗. 我国引种互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel)的初步研究: I[A]. 米草研究进展: 22年来的研究成果论文集[C], 南京: 南京大学出版社, 1985. 212—225.
- [22] REN Meie, ZHANG Ren-shun, YANG Ju-hai. Sedimentation on tidal mud flat of Wanggang Area, Jiangsu Province, China[J]. Collected Oceanic Works, 1983, 6(2): 84—108.
- [23] 任美镔. 江苏省海岸带与海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1986. 36—180.
- [24] SHEPARD F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1954, 24: 151—158.
- [25] MCMANUS J. Grain size determination and interpretation[A]. Techniques in Sedimentology[C]. Oxford: Blackwell, 1988. 63—85.
- [26] GAO S, COLLINS M B. Formation of salt-marsh cliffs in an accretional environment, Christchurch Harbour, southern England[A]. WANG P X, BERGRAN W. Proceedings of the 30th International Geological Congress: Vol. 13. Marine Geology and Palaeoceanography[C]. Amsterdam: VSP Press, 1997. 95—110.
- [27] 杨巨海. 江苏大丰县王港附近淤积质海滩的沉积规律[D]. 南京: 南京大学, 1982.
- [28] 王爱军, 高 抒, 贾建军, 等. 江苏王港盐沼的现代沉积速率[J]. 地理学报, 2005, 60(1): 61—70.
- [29] 陈才俊. 江苏滩涂大米草促淤护岸效果[J]. 海洋通报, 1994, 13(2): 55—61.
- [30] 高 抒, 朱大奎. 江苏淤积质海岸剖面的初步研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1988, 24(1): 75—84.
- [31] 陈才俊. 江苏淤积型淤积质潮滩的剖面发育[J]. 海洋与湖沼, 1991, 22(4): 360—368.
- [32] REINECK H-E, SINGH I B. Depositional Sedimentary Environments, 2nd ed. [M]. Berlin: Springer, 1980. 430—456.
- [33] ALEXANDER C R, NITTROUER C A, DEMASTER DJ, et al. Macrotidal mudflats of the southwestern Korean coast: a model for interpretation of intertidal deposits[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1991, 61: 805—524.
- [34] FREY R W, BASAN P B. Coastal Saltmarshes[A]. DAVIES R A. Coastal Sedimentary Environments[M]. New York: Springer-Verlag, 1985. 225—301.
- [35] KE X K, EVANS G, COLLINS M B. Hydrodynamics and sediment dynamics of the Wash embayment, eastern England[J]. Sedimentology, 1996, 43: 157—174.
- [36] 杨 抒, 汪亚平, 高 抒. 江苏王港盐沼潮沟的水动力和悬沙输运过程[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(4): 23—28.
- [37] 李占海. 江苏大丰地区潮滩沉积动力过程[D]. 南京: 南京大学, 2003.
- [38] 陈才俊. 江苏中部海堤大规模外迁后的潮水沟发育[J]. 海洋通报, 2001, 20(6): 71—79.
- [39] 汪亚平, 张忍顺, 高 抒. 论盐沼-潮沟系统的地貌动力响应[J]. 科学通报, 1998, 43(21): 2 315—2 319.

Impact of *Spartina alterniflora* on sedimentary and morphological evolution of tidal salt marshes of Jiangsu, China

WANG Aijun¹, GAO Shu², JIA Jianjun^{3,4}

(1 Open Laboratory of Coast & Ocean Environmental Geology, Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China; 2 Ministry of Education Key Laboratory for Coast and Island Development, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3 Key Laboratory of Submarine Geosciences of State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 4 Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The area of tidal flat in Jiangsu Province is the biggest in China, and the dynamic change of tidal flat erosion and accumulation is complicated. *Spartina alterniflora* is introduced artificially to the Jiangsu coast, which has significantly influenced the regional tidal flat evolution in terms of the deposition rate, sediment distribution patterns and tidal creek geometry. According to surface elevations of stations and calculated sedimentation rates in different stages, the applicability of Pethick-Allen model is analysed in Jiangsu tidal salt marshes. ¹³⁷Cs analysis is carried out for sediment samples from the salt marshes of Wanggang to determine the sedimentation rate. According to the ¹³⁷Cs analysis and the data from relative literature, using P-A model for calculating the sedimentation rates in different stages of Jiangsu tidal flat, the results show that the original patterns of tidal flat accretion has been modified since the introduction of *Spartina alterniflora*, this “intruding organism” has caused rapid accretion. Surficial sediment samples were collected on typical section, and analyzed for grain size by a laser particle analyzer (Mastersizer 2000, produced by Malvern Instruments in the UK), the result shows that fine-grained sediment has been trapped by the plant, and the sediments deposited on *Suaeda salsa* and *Spartina angelica* flats enter the upside marsh mostly through drainage creeks rather than from gently sloping tidal flats. Analysis results of remote sensing and in situ observations indicate that the creeks developed on the *Spartina alterniflora* flat have a relatively small ratio of width to depth, a relatively high density, and are more stable than other tidal flat creek systems in the region.

Key words: *Spartina alterniflora*; tidal flat; sedimentation; morphological evolution; Jiangsu, China