

赵一飞, 徐敏, 刘晴, 等. 苏北辐射沙洲岸滩沉积物元素地球化学记录的百年尺度环境变化[J]. 海洋学报, 2021, 43(8): 66–80, doi:10.12284/hyxb2021098

Zhao Yifei, Xu Min, Liu Qing, et al. Centennial scale environmental changes in the elemental geochemistry of tidal flat sediments in the northern Jiangsu radial sand ridges[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(8): 66–80, doi:10.12284/hyxb2021098

苏北辐射沙洲岸滩沉积物元素地球化学记录的百年尺度环境变化

赵一飞¹, 徐敏^{1*}, 刘晴¹, 舒强¹, 王平²

(1. 南京师范大学海洋科学与工程学院, 江苏南京 210023; 2. 南京师范大学地理科学学院, 江苏南京 210023)

摘要: 苏北辐射沙洲是分布于江苏岸外的典型沉积堆积体, 受长江、黄河泥沙供给和近岸潮流动力的共同影响, 发育了典型的粉砂淤泥质潮滩, 沉积物元素可以记录潮滩环境变化的重要信息。在辐射沙洲岸滩采集了 3 个短柱沉积物岩芯, 建立可靠的年代框架, 采用高分辨率 XRF 元素扫描仪进行地球化学元素测试, 选用 XRF 信号强度高的 14 种元素进行聚类和相关性方法提取环境信息, 研究过去百年尺度人类活动和海岸环境变化下的苏北辐射沙洲岸滩沉积环境变化。结果表明, 该区典型潮滩剖面岩芯沉积物中 Si、Ca、As 和 Fe 元素相对含量较高, 且自北向南其含量不断增加, Mn、Ba、Cu 和 Zn 元素含量较低, 在所有剖面含量变化不大。在垂向上, Si、Ca 和 Fe 元素变化趋势一致, 而 Ni、Zn 和 S 元素在不同柱状岩芯中呈现与 Si、Ca 和 Fe 相反的变化趋势。相关关系和聚类分析显示, Si、Ca 和 Fe 元素之间具有较高的相关性, 即具有近似的地球化学行为和一致的物质来源; 与元素 Ni、Cu 和 Zn 呈负相关, 暗示了这几种元素与前者具有不同的地球化学行为。苏北辐射沙洲潮滩沉积物沉积环境发生了明显变化且在不同区域呈现不同的变化规律, 物质来源、水动力环境、人类活动等因素是导致沉积环境变化的主要原因。

关键词: 潮滩; 沉积物; 元素地球化学; XRF; 苏北辐射沙洲

中图分类号: P736

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)08-0066-15

1 引言

海岸带是陆地与海洋交互作用的重要界面, 也是响应全球变化和陆海各种动力作用最为迅速、最敏感的地带^[1]。潮滩作为海岸带的重要组成部分, 广泛发育于世界许多海岸带, 在保护海岸线、生物多样性、抵御风暴潮等自然灾害等方面发挥着不可替代的作用^[2-5]。受河流来沙、潮汐、波浪和沿岸流等动力的综合作用, 海岸潮滩区的物质来源、沉积物组成和

地球化学特征复杂。

苏北辐射沙洲是分布于我国江苏岸外一种特殊的、典型的沉积体, 其物质来源和地貌基础是晚更新世低海面时古长江、古黄河在该处入海形成的古三角洲沉积物或砂体^[6]。这些沉积体包含了丰富的陆地沉积物供应^[7-9]、海岸地貌演化^[10-11]和古环境变化的信息^[12], 因此, 获得了较多的关注。历史上, 受长江、黄河两条大河巨量泥沙供给, 在江苏近岸辐聚辐散潮流动力的作用下, 近岸潮滩典型发育, 形成我国最

收稿日期: 2020-06-02; 修订日期: 2020-08-18。

基金项目: 国家自然科学基金(41801005, 41671195); 江苏省海洋科技创新专项(JSZRHYKJ202002); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(19KJA180004)。

作者简介: 赵一飞(1988—), 男, 甘肃省庆阳市人, 博士, 主要从事海岸带陆海相互作用研究。E-mail: yfzhao@njnu.edu.cn

* 通信作者: 徐敏(1971—), 女, 江苏省江阴市人, 教授, 博士, 主要从事海岸带资源与环境研究。E-mail: xumin0895@vip.sina.com

大、最典型的淤泥质海岸潮滩,为众多迁徙鸟类和底栖生物提供良好的栖息地。然而,在过去百余年时间里,由于受到海岸各种营力的综合影响(如黄河北徙、滩涂围垦和海平面上升),辐射沙洲近岸潮滩沉积动力环境发生显著改变。目前,从对苏北辐射沙洲近岸潮滩的研究来看,20世纪60年代初开始关注,80年代开展调查并快速发展,经历了从地面调查到遥感分析、从定性描述到定量分析的过程。这一阶段研究主要集中在粉砂淤泥质潮滩类型划分^[13]、潮滩剖面塑造^[14]、潮滩形成发育演变机理^[15]、潮水沟系统形成与演化^[16]、潮滩沉积过程野外观测^[17]、潮滩沉积过程定量研究、潮滩动力地貌、波浪、风暴潮和互花米草对潮滩演变的影响、潮滩形成原因与风暴潮潮滩沉积记录、潮滩冲淤循环模式(长期、短期)、泥沙输移模式等方面^[18-20]。尽管从区域尺度对潮滩沉积环境的研究取得了诸多成果,但研究区域较为分散、研究内容不具体、研究方法不一致,同时对近百年来,物源减少、人类围垦活动加剧的影响下苏北辐射沙洲潮滩沉积环境等方面缺乏系统的研究和深入了解。

元素作为研究沉积物物质组成的重要指标之一,在地表过程中的地球化学行为与其粒度特征、矿物

组成和沉积时的动力条件密切相关,记录了海岸沉积环境变化的重要信息^[21-23]。X射线荧光分析(X-Ray Fluorescence, XRF)是一种应用于沉积物元素分析的新兴研究方法,具有分析速度快、无损样品、连续性好、分辨率高以及样品制备要求低等优势^[24-25]。近年来,XRF岩芯扫描分析方法已广泛用于沉积物环境研究中,如沉积物物源分析^[26-27]、古气候与古环境重建和古洪水事件,取得了丰硕的成果^[28-30]。因此,本文通过研究在苏北辐射沙洲岸滩获取的短柱沉积物岩芯,建立可靠的年代框架,基于元素地球化学记录和沉积物粒度参数,开展潮滩沉积环境演变研究,以期正确认识潮滩沉积特征及其演化历史,为该区域潮滩综合规划和开发提供科学依据,这对保护潮滩及其周边生态系统、合理开发利用潮滩资源和促进地区经济社会可持续发展具有重要的意义。

2 数据来源及研究方法

2.1 研究区概况

苏北辐射沙洲(图1)是分布于我国江苏岸外一种特殊的、典型的沉积体系,由70多条陆架潮流沙脊与潮流通道相间的海底地貌组成,以新川港为主轴,呈

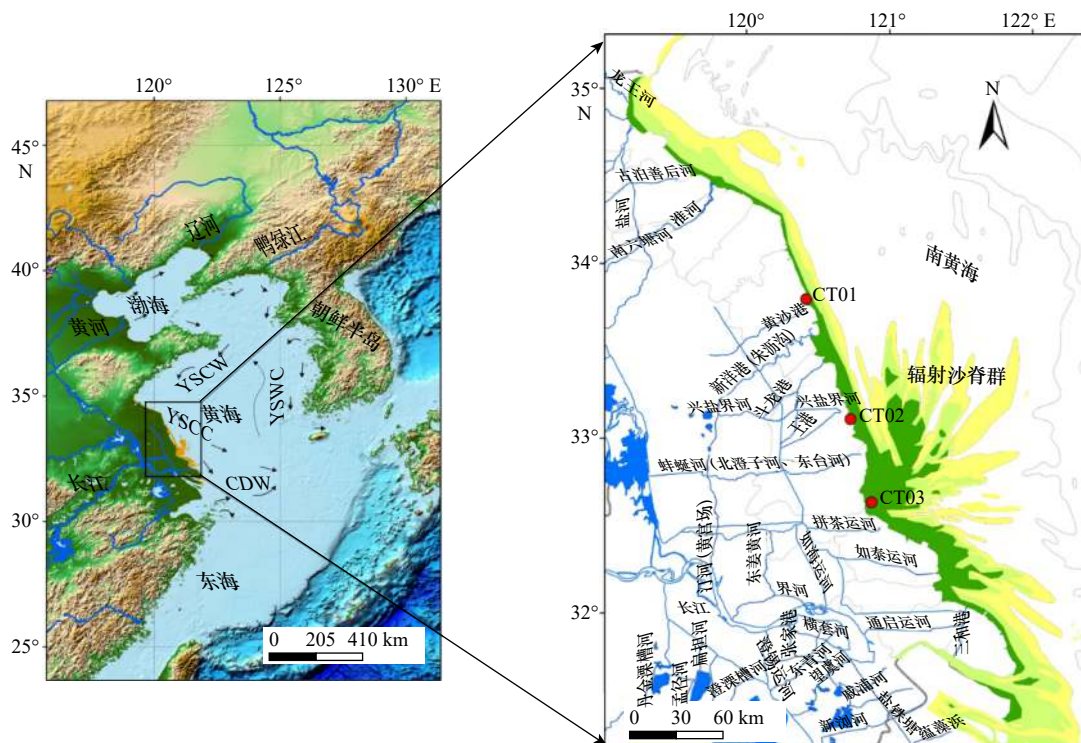


图1 研究区及其采样位置

Fig. 1 The study area and sampling location

YSCW: 黄海冷水; YSWC: 黄海暖流; YSCC: 黄海沿岸流; CDW: 长江冲淡水; 红色圆点为采样点
YSCW: Yellow Sea Cold Water; YSWC: Yellow Sea Warm Current; YSCC: Yellow Sea Coastal Current;
CDW: Changjiang Diluted Water; the red point is sampling location

褶扇状向海,水深为 0~25 m,总面积达 22 470 km²,是世界上最大的海沙复合体之一^[6]。苏北辐射沙洲附近潮滩是中国连片面积最大、最宽广、生态类型最齐全和冲淤演变最复杂的典型淤泥质潮滩^[31]。潮滩平均宽为 6.5 km,最宽处在条子泥边滩,可达 14 km。历史上长江、黄河曾在苏北入海,带来的大量泥沙供给是淤泥质潮滩形成和淤涨的主要物质来源,其以潮差大(平均潮差为 2~4 m)、潮汐作用强为主要特征,潮滩发育完善,具有明显的分带性^[13,32]。辐射沙洲近岸多属于非正规半日潮,其中琼港至小洋口一带潮差最大,在长沙港北达 6.45 m,之后向南北两侧递减。其潮流作用较强,最大流速可达 1~2 m/s 以上,以琼港为界,南部外海以旋转潮流主导,近岸往复流性质明显^[33]。

2.2 样品采集

2018 年 8 月,在苏北辐射沙洲近岸潮滩,利用便携式重力采样器钻取了(内径为 9 cm)3 根长度为 105~120 cm 的柱状岩芯(表 1,图 1)。对获得的岩芯用胶带和锡纸密封保存,防止样品氧化。样品运回实验室,放置冰柜冷藏,处理时纵向剖开,进行描述、岩芯扫描和拍照后,纵向间隔 2 cm 进行分样,在分离样品过程中用去离子水对分样工具进行清洗,避免对相邻样品造成污染而影响结果的测定。对于所分好的样品,用冷冻干燥机进行低温冻干,主要用于沉积物年代分析和粒度分析。

表 1 苏北辐射沙洲岸滩柱状岩芯沉积物站位信息

Table 1 The information of core sediments samples station in tidal flat in the northern Jiangsu radial sand ridges

岩芯编号	取样地点	纬度	经度
CT01	射阳河口	33.772°N	120.526 55°E
CT02	川东港	33.076 566°N	120.867°E
CT03	海安	32.648 6°N	120.986°E

2.3 实验室分析

本文对所采集柱状沉积物样品粒度测量在南京师范大学海洋科学与工程学院进行,测试仪器使用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪,仪器测试粒径范围为 0.02~2 000 μm,多次重复测量误差小于 3%。在测试前,对所测试的样品进行前处理分析,首先称取 1 g 左右冻干的沉积物放置于烧杯中,先后加入 10% 的 H₂O₂ 和 10% 的盐酸溶液,搅拌均匀,静置 12 h 以去除样品中的有机质,然后加入浓度为 10% 的六偏磷酸钠,充分搅拌后静置 24 h 以上然后上机测试,对所测试的结果选用 Folk 和 Ward

图解法公式和 GRADISTAT 软件进行计算,获得平均粒径(M_z)、分选系数(σ_1)、偏态系数(sk_1)、峰态系数(K_g)4 个粒度参数。

沉积物沉积速率和年代的确定采用 ²¹⁰Pb 和 ¹³⁷Cs 放射性同位素测年方法,沉积物样品中放射性核素的测定在中国科学院南京地理与湖泊研究所同位素实验室完成,分析仪器采用美国 EG&G Ortec 公司生产的低本底高纯锗探 γ 能谱仪井型探测器(HPGe GWL 120-15),该 γ 谱议的主要指标为,能量响应范围为 40~10 MeV、峰康比大于 60:1、相对探测效率为 10%~150%,具有良好的稳定性。高纯锗探测器可测得低能 γ 射线,同时在环境样品的高纯锗探测器谱中,46.5 keV 处的 γ 射线与其他射线互不干扰。在实验室内,将短柱样品进行冷冻干燥处理,选取 10 g 左右样品,研磨过 100 目筛,进行放射性核素 ²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 和 ²²⁶Ra 的活度测试,为了减少误差,测定时间为 40 000 s 左右(实时),活度按计数值和计数误差比来确定。其中,其中 ¹³⁷Cs 的比活度由 661.6 KeV 处的 γ 射线谱峰面积获得, ²¹⁰Pb_{ex} 比活度可以通过从总的 ²¹⁰Pb 的比活度中减去 ²²⁶Ra 比活度来确定。其中, ²¹⁰Pb 的总量为 46.5 KeV 处的 γ 射线谱峰面积, ²²⁶Ra 比活度根据 ²¹⁴Pb 的谱峰面积(351.9 KeV 处)求算,半衰期极短的 ²¹⁴Pb 是 ²²⁶Ra 的衰变产物。实验中 ¹³⁷Cs 和 ²²⁶Ra 标准样品由中国原子能研究所提供, ²¹⁰Pb 标准样品由英国利物浦大学提供的标准样品作对比标准。

2.4 XRF 岩芯扫描仪

本研究中,地化元素主要是通过 XRF 岩芯扫描仪(X-Ray Fluorescence Core Scanner)扫描获取。随着元素地球化学研究的不断深入,XRF 岩芯扫描仪的使用也越来越广泛。XRF 岩芯扫描分析方法是在不破坏样品的前提下,通过直接对样品剖面进行扫描,快速得到高分辨率元素的相对变化。

XRF 样品扫描分析在南京师范大学地理科学学院 XRF 岩芯扫描实验室完成,扫描仪器为英国 GeoTek 公司生产的 MSCL-S 岩芯扫描仪,以 2 mm 的分辨率对卡槽样品进行元素扫描分析。该仪器广泛用于海底沉积物、湖泊沉积物及岩石岩芯等扫描分析,其多个系统可同步、快速、准确和全自动测量。目前,该仪器传感器包括光学成像系统、彩色分光光度计、磁化率和高精度 XRF 元素。利用 MSCL-S 测量时,岩芯长度不超过 150 cm,直径为 50~150 mm,可分析 Mg 到 U 之间的大部分元素。此外,可利用氦气极大提高传感器的灵敏度,尤其在测量 Mg、Al 等元素时,可以增强峰值,消除谱图中的氦峰。本次沉积物柱状

样品扫描是在 10 kV 和 40 kV 两个电压控制的射线条件下, 以 1 cm 为分辨率, 每个点测试时间为 10 s 获取的元素相对含量信息。

岩芯扫描完成后, 利用 bAxil Batch 软件对数据进行批处理, 处理得到的数据除以真实测量的时间, 即可获得某种元素相对元素强度(单位: cps)。

2.5 聚类分析

聚类分析是把未知类别的变量依据相应的规律分类, 分类过程是一个逐步减少类别的过程, 每一个聚类层次, 必须满足“类内差异小, 类间差异大”的原则^[36-37]。在本研究中, 依据 R 型聚类分析方法对每个柱状岩芯中元素进行 R 型聚类分析, 该方法可以将地化特征比较接近、行为比较密切的元素进行归类^[38]。主要元素的聚类分析在 SPSS 20 软件中完成。

3 结果与分析

3.1 沉积物岩芯描述

射阳河口柱状岩芯位于射阳河口南部互花米草滩, 全长为 105 cm, 整个柱状样含水率中等, 主要以粉砂质黏土、黏土质粉砂和粉砂组成, 在 0~10 cm 深度处, 有大量的互花米草根系; 在 10~30 cm 深度处, 以

浅灰色粉砂质黏土为主, 有机质含量较高; 在 30~65 cm 深度处, 以浅黄色黏土质粉砂为主, 且中间夹杂一些黏土层; 在 65 cm 以下, 主要以粉砂为主, 有零星有机碳分布(图 2a)。川东港采样地点位于大丰麋鹿自然保护区外围互花米草滩, 整个岩心长度为 110 cm, 以粉砂、黏土质粉砂为主; 有明显的泥沙层理分布, 压缩性小, 含水率中等, 在 10~22 cm 深度处, 含水量较高, 有机质含量高(图 2b)。海安样点位于海安县岸外光滩处, 受潮沟波动影响以及沉积物沉积特性, 沉积物柱状样采集难度大, 岩芯底部和顶部不同程度受到人为干扰。获取的岩芯真实长度为 120 cm, 以黏土质粉砂和细粉砂为主, 砂泥互层明显, 无贝壳碎屑, 含水率中等, 夹杂黑色有机质层(图 2c)。由于样品采集时受到人为干扰, 因此去除两头受人为影响较大的部分对其进行分析。

3.2 沉积物柱状岩芯沉积速率

射阳河口沉积物沉积速率不是通过放射性同位素 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 测年来确定的, 而是通过互花米草引种时间确定。互花米草适宜生长在潮间中上带, 具有促淤保滩、改良土壤、绿化海滩和改善海滩生态环境的功能, 1979 年我国从美国引进互花米草, 1982-1983

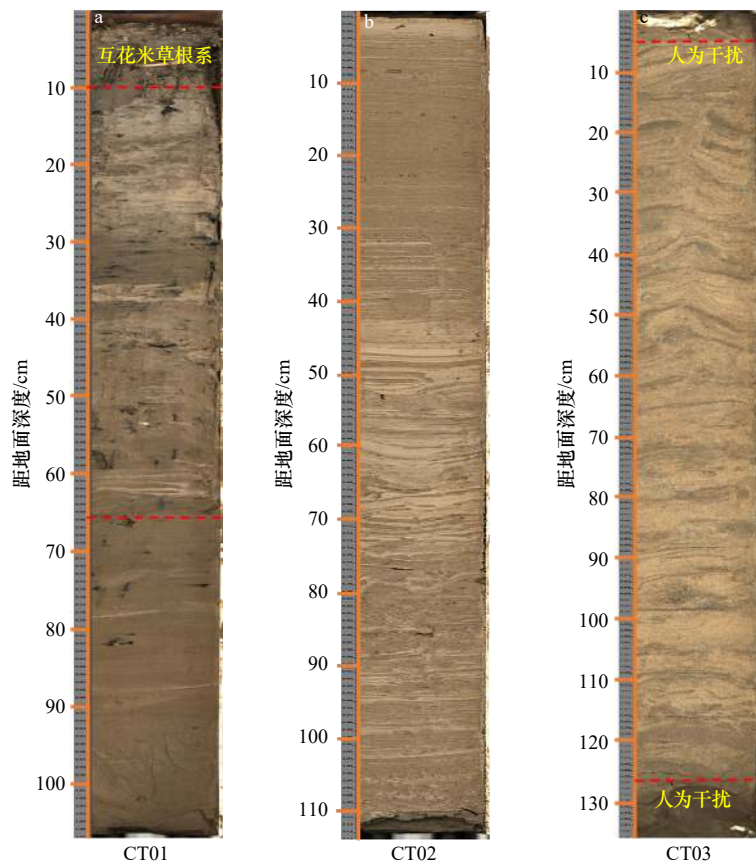


图 2 苏北辐射沙洲潮滩沉积物岩芯剖面

Fig. 2 The profile of core sediments in tidal flat in the northern Jiangsu radial sand ridges

年引种到灌云县、射阳等地^[34]。本文研究射阳河口沉积物柱状岩芯沉积速率时发现,柱状岩芯沉积物平均粒径在 65 cm 处发生了明显变小的趋势,沉积物组分砂含量减少且粉砂和黏土含量增多,这可能是互花米草入侵而导致水动力减弱,引起细颗粒物质沉积。结合沉积相和沉积物粒度参数变化特征,本研究假定该柱状岩芯 65 cm 所对应的年代是 1982 年。由于柱状样采集时间是 2017 年 8 月,故岩芯 65 cm 以上的沉积速率是 1.67 cm/a。此外,柱状岩芯 65 cm 以下主要以粉砂和砂为主,沉积相类似于光滩的泥沙沉积,徐晓凤^[35]在射阳河口光滩采集柱状样获得的沉积速率为 0.88 cm/a,因此,65 cm 以下沉积速率参照徐晓凤的研究结果。

对川东港互花米草滩沉积物放射性²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 测试发现(图 3a1, 图 3a2),该柱状岩芯²¹⁰Pb 最大比活度为 118.15 Bq/kg,最小比活度为 44.80 Bq/kg,平均比活度为 74.71 Bq/kg。比活度值在 30 cm 以上相对比较稳定,在 30 cm 以下呈指数衰减趋势,大约在 105 cm 以下与²²⁶Ra 的比活度值接近,基本达到了本底值。根据拟合结果,得出柱状岩芯平均沉积速率为 2.3 cm/a。¹³⁷Cs 在仪器允许的误差下,没用检测到其活度,不能判断出沉积物的沉积速率。因此,在这个柱状样中,选用²¹⁰Pb 比活度计算的结果作为平均沉积速率。

通过对海安潮滩典型剖面进行放射性同位素²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 的沉积速率分析(图 3b1, 图 3b2),²¹⁰Pb 在整个垂向剖面最大比活度为 98.31 Bq/kg,最小比活度为 46.75 Bq/kg,平均比活度为 69.07 Bq/kg。整个柱状岩芯比活度呈垂向波动衰减的趋势。此外,大约 120 cm

上下,²¹⁰Pb 比活度值与²²⁶Ra 的比活度值一致,达到了本底值。根据线性拟合结果得出沉积物沉积速率为 1.6 cm/a。¹³⁷Cs 在仪器允许的误差下,没用检测到其活度,不能判断出沉积物的沉积速率。因此,在这个柱状样中选用²¹⁰Pb 比活度计算的结果作为平均沉积速率。

3.3 沉积物粒度特征

射阳河口沉积物柱状岩芯粒度参数分布特征如图 4a 所示,沉积物平均粒径由底向上呈波动减小的变化趋势,在 55 cm 处发生了偏转,55 cm 以上呈现波动稳定变化特征。根据沉积物粒度变化特征,将该岩芯自下而上划分为 2 个阶段。第 1 阶段(105 cm 至 55 cm),沉积物平均粒径呈减小趋势,介于 30.84 μm 至 60.90 μm,平均为 51.05 μm;第 2 阶段(55 cm 至 0 cm),平均粒径呈相对波动稳定状态,在 34 cm 和 8 cm 处有典型的突变增大,介于 8.84~53.18 μm,平均为 25.74 μm,相较于第 1 阶段,平均粒径明显减小,粒度变细。

川东港米草滩沉积物岩芯平均粒径(图 4b)在 30 cm 以下相对比较稳定,然后在 30 cm 至 10 cm 处波动增加,10 cm 以上呈减少趋势,介于 3.07~88.99 μm 之间,平均值为 17.7 μm;在 110 cm 至 30 cm 深度,沉积物平均粒径基本呈稳定状态,介于 3.07~32.53 μm,平均为 13.04 μm;在 30 cm 至 0 cm 深度,沉积物平均粒径先增大后减小,介于 10.16~88.99 μm,平均值为 27.82 μm。

海安潮滩沉积物岩芯平均粒径(图 4c)介于 20.33~61.17 μm,平均为 45.29 μm,呈波动稳定变化特征。

3.4 沉积物元素地球化学特征

射阳河口互花米草滩岩芯沉积物元素分布特征

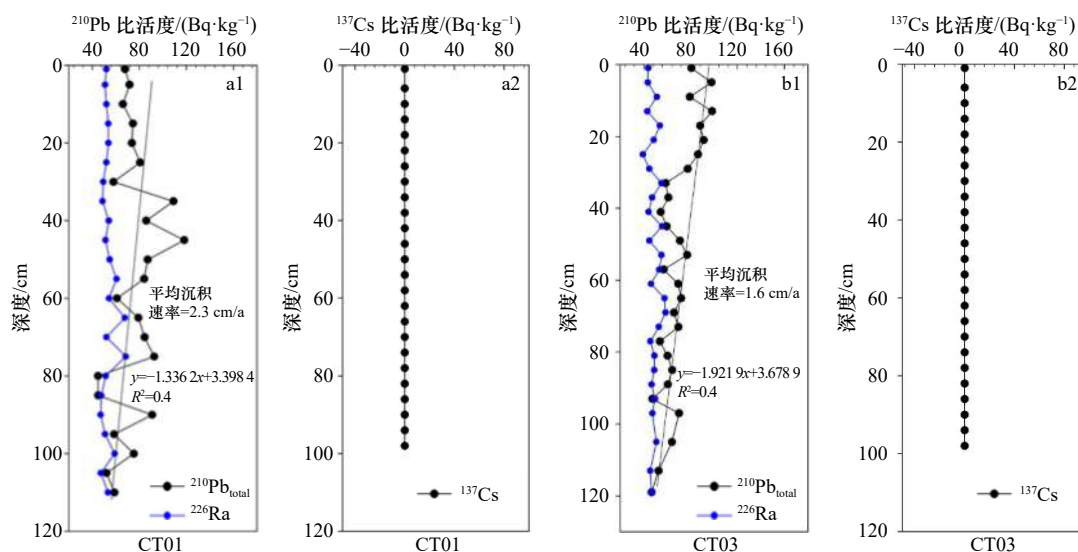


图 3 苏北辐射沙洲潮滩沉积物沉积速率

Fig. 3 Sediment deposition rate in tidal flat in the northern Jiangsu radial sand ridges

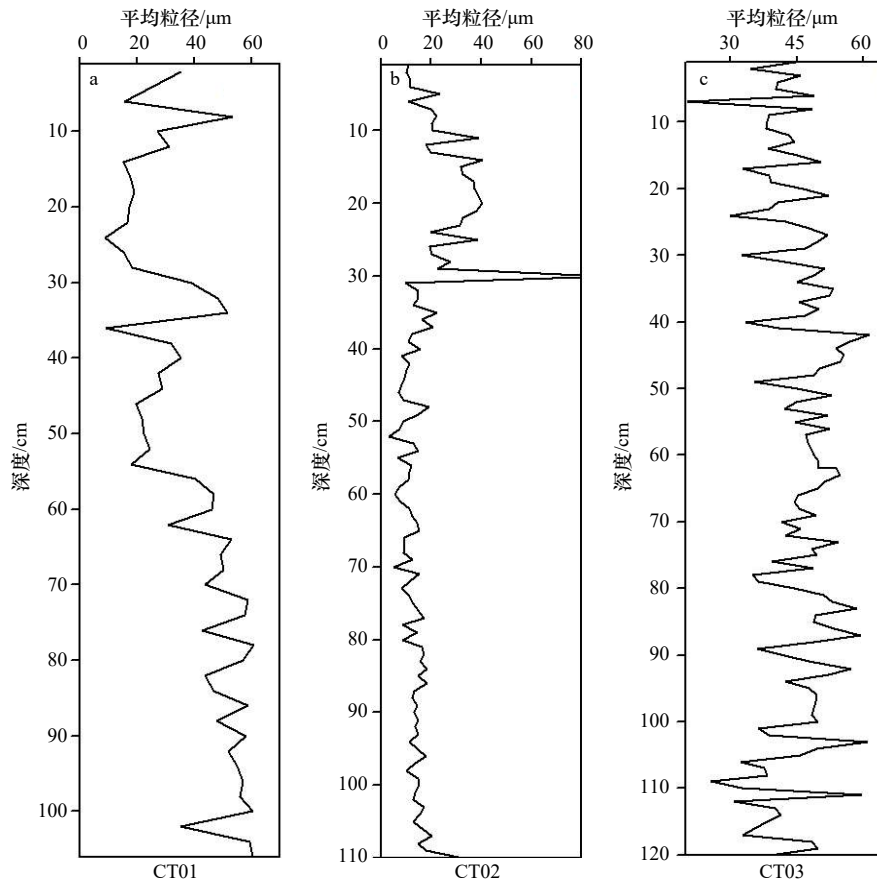


图4 苏北辐射沙洲潮滩岩芯沉积物平均粒径

Fig. 4 Mean particle size of core sediments in tidal flat in the northern Jiangsu radial sand ridges

如图5和表2所示,其中Si、Ca、Fe和As元素有较高的相对含量,其平均值为95.41 cps、144.92 cps、425.82 cps和248.10 cps;其次是S、Ti、V、Ni、Rb和Sr;而Zn、Cu、Ba和Mn的相对含量较低,为5.31 cps、17.27 cps、10.64 cps和29.36 cps。基于元素的相对平均含量,可将其分为3组,第1组为Si、Ca、Fe和As元素,相对含量高,平均在100 cps以上;第2组为S、Ti、V、Ni、Rb和Sr元素,相对含量为45~100 cps;第3组为Zn、Cu、Ba和Mn元素,相对含量较低,平均在30 cps以下。同样地, Si、Ca、As和Fe元素的标准偏差也较高,说明这几种元素在垂向剖面中变化大。

根据元素的变异系数,结果由大到小依次为S(2.37)、Zn(0.55)、Mn(0.43)、Fe(0.38)、Ca(0.34)=Si(0.34)、Rb(0.30)、Ti(0.24)、Ba(0.23)、Cu(0.22)=Sr(0.22)、V(0.21)、As(0.11)、Ni(0.10)。S的变异系数为2.37,主要是在用XRF岩芯扫描仪扫描过程中出现负值,因此所获取的元素信号强度不准确,故不予采用;除元素Zn和Mn的变异系数较大外,大部分元素变异系数为0.1~0.4,相对较小,说明该柱状岩芯沉积物元素分布相对较均匀。

沉积物柱状岩芯中Si、Ca和Fe元素相对含量变化趋势一致,可能存在比较相似的地球化学行为。元素剖面自底部向上呈“先增加(105 cm至90 cm)-减少(90 cm至55 cm)-增加(55 cm至10 cm)-减少(10 cm至0 cm)”的变化特征,元素Ni和Mn呈近似相反的变化特征,而其他元素在整个剖面中垂向变化不大,呈波动稳定特征。

川东港互花米草滩岩芯沉积物元素分布特征如图6和表2所示,可以看出元素Si、Ca、Fe和As的相对平均含量高,其平均值分别为246.00 cps、285.80 cps、887.94 cps和240.38 cps; Mn、Ba、Cu和Zn元素含量较低,分别为25.73 cps、13.66 cps、16.01 cps和5.68 cps,其他的元素相对含量介于40~100 cps。通过与射阳河口元素对比发现,川东港岩芯沉积物Si、Ca、Fe相对含量明显高于前者的含量,为前者的2倍多。

沉积物岩芯元素垂向变化表现为:第一, Si、Ca和Fe具有明显的一致性,即自底部向上呈先波动稳定后增加的趋势, Ti也表现出了类似的变化特征,但不明显;第二, V和Ni近似的表现为与Si、Ca和Fe相反的变化趋势;第三,其他元素相对比较稳定,

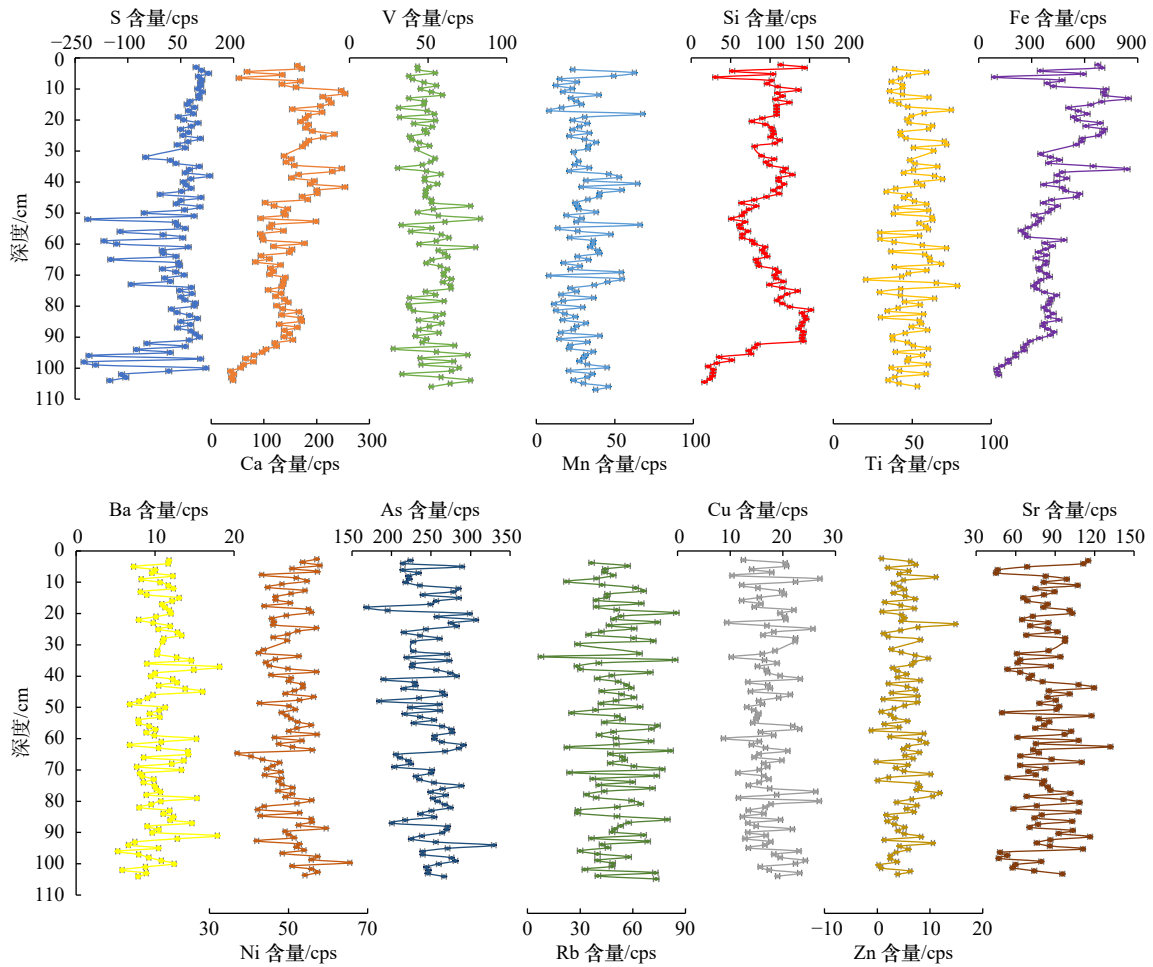


图5 射阳河口岩芯沉积物元素分布曲线

Fig. 5 Element distribution curve of core sediments in the Sheyang River Estuary

表2 苏北辐射沙洲岸滩沉积物元素含量

Table 2 The element content of core sediments in tidal flat in the northern Jiangsu radial sand ridges

元素	射阳河口潮滩					川东港互花米草滩					海安近岸潮滩				
	最小值 /cps	最大值 /cps	平均值 /cps	标准 偏差	变异 系数	最小值 /cps	最大值 /cps	平均值 /cps	标准 偏差	变异 系数	最小值 /cps	最大值 /cps	平均值 /cps	标准 偏差	变异 系数
Si	16.76	151.80	95.41	31.99	0.34	172.94	560.33	246.00	75.10	0.31	11.49	549.54	235.09	122.1	0.52
S	-224.6	132.56	34.76	82.32	2.37	16.73	147.06	75.40	34.94	0.46	-146.7	176.34	87.08	48.81	0.56
Ca	36.45	253.78	144.92	49.86	0.34	206.21	636.93	285.80	62.13	0.22	12.75	337.83	176.28	65.69	0.37
Ti	19.17	77.24	48.59	11.59	0.24	28.33	88.94	58.27	12.65	0.22	22.33	84.53	48.05	13.25	0.28
V	27.85	83.24	51.80	10.94	0.21	21.97	74.40	45.63	9.39	0.21	27.91	74.59	48.28	9.07	0.19
Mn	6.85	66.61	29.36	12.52	0.43	3.68	50.18	25.73	10.42	0.41	6.19	65.04	27.83	11.37	0.41
Fe	88.52	847.36	425.82	161.3	0.38	601.70	1793.6	887.94	187.26	0.21	5.57	1213.5	604.23	230.8	0.38
Ba	5.27	18.16	10.64	2.46	0.23	6.62	22.55	13.66	3.01	0.22	1.92	22.98	12.88	3.78	0.29
Ni	36.79	65.28	50.07	4.90	0.10	33.09	53.30	43.83	4.23	0.10	34.33	64.57	48.69	4.87	0.10
Cu	8.72	27.03	17.27	3.87	0.22	4.08	26.28	16.01	4.00	0.25	6.28	27.71	17.22	4.27	0.25
Zn	-0.83	15.15	5.31	2.94	0.55	-0.91	18.71	5.68	3.78	0.67	-0.72	15.63	5.54	3.30	0.59
As	168.18	329.38	248.10	28.25	0.11	186.12	351.51	240.38	28.98	0.12	167.67	312.54	243.35	29.83	0.12
Rb	7.68	84.77	50.46	15.29	0.30	30.70	101.78	58.92	14.21	0.24	21.84	85.56	52.30	13.11	0.25
Sr	45.09	132.00	82.47	18.44	0.22	53.18	136.33	91.92	15.60	0.17	28.04	132.26	85.01	19.35	0.23

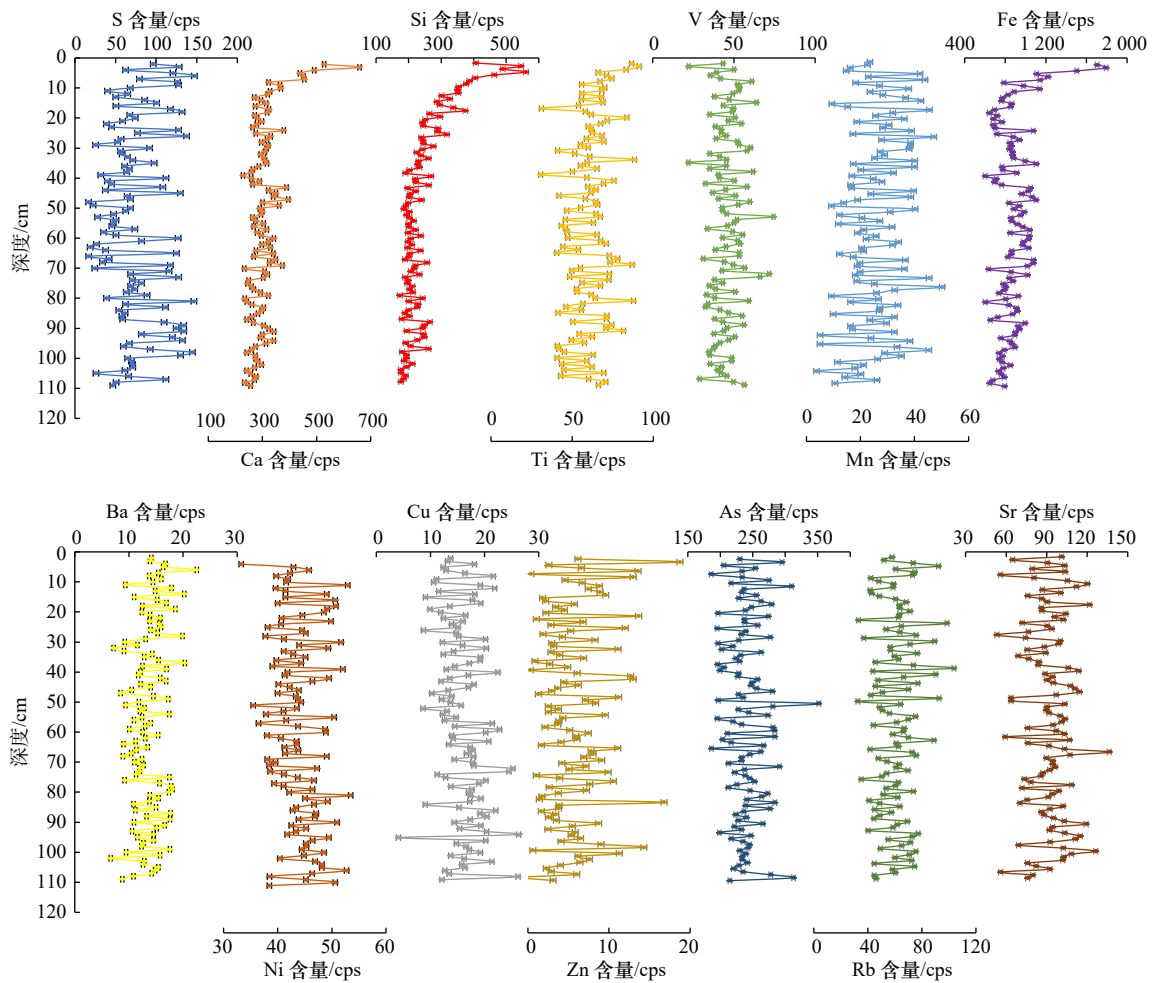


图6 川东港互花米草滩岩芯沉积物元素分布曲线

Fig. 6 Element distribution curve of core sediments in the *Spartina alterniflora* tidal flat of Chuandong Gang

呈波动稳定变化趋势。因此,根据元素 Si、Fe 和 Ca 垂向变化特征可将岩芯分为两部分:第 1 部分(110 cm 至 30 cm),元素呈波动稳定变化特征;第 2 部分(30 cm 以上),元素呈增加趋势。结合沉积物组分含量垂向变化特征,砂含量在 30 cm 出现了增加趋势,而粉砂含量减少,暗示了 Si、Fe 和 Ca 含量与沉积物平均粒径关系密切。

海安潮滩岩芯沉积物元素分布特征如图 7 和表 2 所示,可以看出元素 S 元素出现了负值,主要是使用 XRF 岩芯扫描仪在扫描过程中所获取的元素信号强度不准确,故不予采用;Si、Ca、Fe 和 As 的相对平均含量高,其平均值分别为 235.09 cps、176.28 cps、604.23 cps 和 243.35 cps;Mn、Ba、Cu 和 Zn 元素含量较低,分别为 27.83 cps、12.88 cps、17.22 cps 和 5.54 cps,其他的元素相对含量介于 40~100 cps。通过与射阳河口元素对比发现,海安岩芯沉积物元素 Si、Ca、Fe 相对含量明显高于前者的含量,但是略低于川东港的元素相对含量。

岩芯沉积物元素垂向变化表现为:第一, Si、Ca 和 Fe 具有明显的一致性,元素相对含量在 70 cm 上下发生了明显的转折,在 45 cm 上下达到最大值,然后又呈减少趋势,这可能与该区域的沉积动力环境和物质来源有密切的关系;第二,其他元素相对比较稳定,呈波动稳定变化趋势。因此,根据元素 Si、Fe 和 Ca 垂向变化特征可将岩芯分为两部分:第 1 部分(140 cm 至 70 cm),元素含量呈波动近似稳定变化特征;第 2 部分(70 cm 以上),元素含量呈先增加和减少的趋势。

综上所述,通过对苏北辐射沙洲典型潮滩剖面岩芯沉积物 XRF 扫描元素的相对含量变化进行分析, Si、Ca 和 Fe 元素相对含量较高,且自北向南其含量不断的增加, Mn、Ba、Cu 和 Zn 元素含量较低,基本在 30 cps 以下,在所有剖面含量变化不大,其他元素相对含量介于 40~100 cps,在各岩芯中变化不大。在垂向变化上, Si、Ca 和 Fe 元素垂向变化趋势一致,显示具有较高的相关性,即具有近似的地球化学行为和

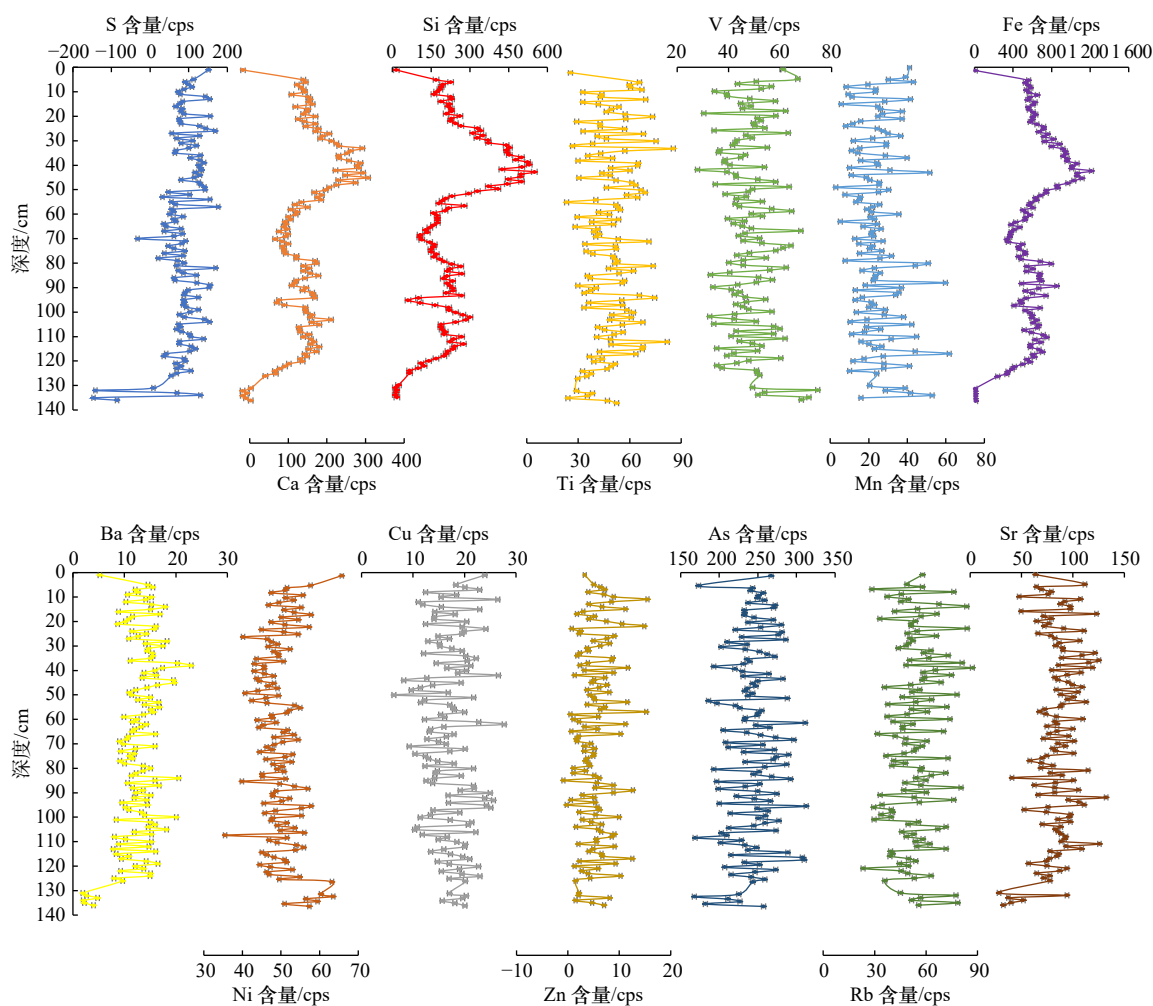


图7 海安潮滩岩芯沉积物元素分布曲线

Fig. 7 Element distribution curve of core sediments in the Haian tidal flat

一致的物质来源；而 Ni、Zn 和 S 元素在不同柱状岩芯中呈现与 Si、Ca 和 Fe 相反的变化趋势，暗示了这几种元素与前者具有不同的地化行为，其他元素垂向变化在所有柱状岩芯中基本相对稳定，呈波动稳定的变化特征。

4 讨论

4.1 岩芯沉积物元素间相关性及其与粒度关系

沉积物中元素的相关性反映的是不同元素在地球化学性质方面的差异，通常记录且保存了沉积物物质来源的重要信息。因此，其有助于分析沉积物的来源和沉积环境的变化。通过 SPSS 软件中的 Pearson 相关对 14 种元素和沉积物平均粒径进行相关性分析，再经双尾显著性检验。

射阳河口互花米草滩沉积物元素相关性结果显示(表 3)，Si、Ca、Fe 和 Ba 具有较强的相关性，且都通过了 0.01 的显著性检验；此外，这些元素与 Ti、Zn 和 Rb 呈正相关；与元素 V、Ni、Cu 和 As 呈负相关。

元素 Si、Ca、Fe 和 Ba 与平均粒径均呈负相关，其相关系数分别为 -0.1、-0.59、-0.65 和 -0.09，其中 Ca 和 Fe 与平均粒径呈显著的负相关，通过了 0.01 的显著性水平检验，这暗示了 Ca 和 Fe 元素受平均粒径影响大，明显的遵循“元素粒度控制规律”，而其他元素与平均粒径的相关性不显著。

川东港岩芯沉积物元素相关性分析如表 4 所示，Fe、Si 和 Ca 三者仍然是有较高的相关性，相关系数在 0.5 及以上以上，且都通过了 0.01 的显著性检验；同时，三者与 S、Zn、Ti、As、Rb 和 Ba 存在正相关，与 V、Cu 呈负相关。Si 与平均粒径呈正相关，Ca 和 Fe 与平均粒径呈负相关，其他元素与平均粒径均呈不显著的相关关系。

海安潮滩岩芯沉积物元素相关系数结果显示(表 5)，Si、Ca 和 Fe 有非常高的相关性，相关系数在 0.8 以上，且都通过了 0.01 的显著性检验，但是，这些元素与 Ni、V 和 As 呈负相关；此外，这些元素与 Ba、Zn、S、Rb 和 Sr 也有较好的正相关性。Si、Ca、Fe、

表3 射阳河口互花米草滩岩芯沉积物中元素相关性

Table 3 The element correlation of core sediments in the *Spartina alterniflora* tidal flat of Sheyang Estuary

相关性	Si	S	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Ba	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	平均粒径
Si	1														
S	0.52**	1													
Ca	0.63**	0.43**	1												
Ti	0.04	-0.03	0.17	1											
V	-0.24*	-0.45**	-0.26**	-0.05	1										
Mn	-0.13	-0.12	-0.05	0.04	0.15	1									
Fe	0.55**	0.45**	0.85**	0.22*	-0.28**	-0.02	1								
Ba	0.37**	0.21*	0.38**	0.25*	-0.15	-0.01	0.34**	1							
Ni	-0.27**	-0.06	-0.29**	-0.12	-0.08	0.10	-0.23*	-0.08	1						
Cu	-0.19	-0.07	-0.15	-0.15	0.01	0.02	-0.08	-0.22*	0.39**	1					
Zn	0.14	0.10	0.10	0.09	-0.17	-0.09	0.12	0.04	-0.08	0.10	1				
As	-0.09	-0.05	-0.09	-0.03	0.14	-0.17	-0.08	-0.21*	0.08	0.05	0.12	1			
Rb	0.02	-0.10	0.02	0.11	-0.09	0.04	0.01	0.03	0.05	-0.12	-0.09	-0.04	1		
Sr	0.20*	0.08	0.22*	0.05	-0.10	-0.02	0.18	0.10	0.17	0.02	0.04	-0.12	0.09	1	
平均粒径	-0.10	-0.25	-0.59**	-0.03	0.12	-0.18	-0.65**	-0.09	0.17	0.06	0.08	0.14	0.08	0.13	1

注: **表示在0.01级别(双尾), 相关性显著; *表示在0.05级别(双尾), 相关性显著。

表4 川东港互花米草滩岩芯沉积物中元素相关性

Table 4 The element correlation of core sediments in the *Spartina alterniflora* tidal flat of the Chuangdong Gang

相关性	Si	S	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Ba	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	平均粒径
Si	1														
S	0.41**	1													
Ca	0.74**	0.33**	1												
Ti	0.34**	0.05	0.36**	1											
V	-0.02	-0.13	-0.10	0.07	1										
Mn	0.09	0.14	0.02	-0.05	-0.15	1									
Fe	0.50**	0.15	0.87**	0.31**	-0.15	-0.02	1								
Ba	0.29**	0.19*	0.12	0.08	-0.12	0.03	-0.01	1							
Ni	-0.04	0.06	-0.27**	-0.16	-0.02	-0.07	-0.31**	0.11	1						
Cu	-0.12	0.07	-0.14	-0.10	0.05	-0.10	-0.12	-0.08	0.25**	1					
Zn	0.26**	0.20*	0.25**	0.05	-0.17	0.14	0.15	-0.01	-0.09	0.09	1				
As	0.01	0.07	0.02	-0.02	-0.11	-0.09	0.04	-0.05	0.17	0.06	0.13	1			
Rb	0.08	-0.08	0.12	-0.08	0.03	0.06	0.08	0.04	-0.15	-0.02	-0.05	-0.25**	1		
Sr	-0.02	-0.00	0.02	-0.10	0.06	-0.01	-0.02	-0.14	-0.06	0.06	-0.11	-0.10	0.12	1	
平均粒径	0.217*	0.02	-0.04	-0.08	0.16	0.17	-0.22*	0.13	0.02	-0.08	-0.06	-0.03	0.05	-0.03	1

注: **表示在0.01级别(双尾), 相关性显著; *表示在0.05级别(双尾), 相关性显著。

表 5 海安岸外潮滩岩芯沉积物中元素相关性

Table 5 The element correlation of core sediments in the Haian tidal flat

相关性	Si	S	Ca	Ti	V	Mn	Fe	Ba	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	平均粒径
Si	1														
S	0.45**	1													
Ca	0.94**	0.43**	1												
Ti	0.17	0.16	0.20*	1											
V	-0.19*	-0.13	-0.21*	0.11	1										
Mn	0.01	0.04	-0.02	0.10	0.06	1									
Fe	0.88**	0.40**	0.89**	0.15	-0.24**	0.02	1								
Ba	0.38**	0.17	0.41**	-0.15	-0.19*	0.07	0.40**	1							
Ni	-0.35**	-0.10	-0.31**	-0.08	0.10	-0.01	-0.28**	-0.10	1						
Cu	-0.10	0.00	-0.07	0.06	-0.12	0.06	0.06	0.01	0.23*	1					
Zn	0.04	0.07	0.03	-0.05	-0.01	0.08	0.07	0.09	0.07	0.14	1				
As	-0.08	-0.16	-0.10	-0.06	0.13	0.04	-0.07	-0.11	0.13	0.06	0.05	1			
Rb	0.33**	0.17	0.30**	0.04	-0.06	-0.03	0.29**	0.23**	-0.18	-0.03	-0.11	-0.19*	1		
Sr	0.31**	0.11	0.30**	0.14	0.06	0.00	0.29**	0.06	0.00	0.02	-0.05	-0.15	0.26**	1	
平均粒径	0.09	0.04	0.01	0.05	0.00	-0.09	0.03	-0.12	-0.16	-0.09	-0.18*	-0.14	-0.04	-0.02	1

注: **表示在0.01级别(双尾),相关性显著; *表示在0.05级别(双尾),相关性显著。

Ti 和 S 与沉积物平均粒径呈正相关, V 与平均粒径呈不相关而其他元素与平均粒径呈负相关。

综上所述,通过对辐射沙洲近岸潮滩沉积物元素及其与平均粒径的相关性分析发现,元素 Si、Ca、Ba 和 Fe 具有较强的相关性,且通过了 0.01 的显著性水平检验,暗示了这些元素有着相似的地球化学行为和一致的物质来源;这些元素同 Ni、V 和 Zn 呈负相关,也暗示了 Ni、V 和 Zn 有着类似的地球化学行为和一致的来源;其他元素都呈较弱的相关性。此外,通过元素与沉积物平均粒径的相关性研究发现,苏北辐射沙洲海岸北部(射阳河口和川东港)Ca、Fe 和 Si 同平均粒径呈负相关,而辐射沙洲内缘区(海安)岩芯沉积物 Ca、Fe 和 Si 与沉积物平均粒径呈正相关,这可能与沉积物组分含量有密切的关系,辐射沙洲北部海岸潮滩沉积物主要是以粉砂和黏土为主,而内缘区海安潮滩主要以砂为主,这暗示了元素的分布和富集特征同沉积物组分含量有密切的关系,明显的遵循“元素粒度控制规律”的原则。

4.2 沉积物元素之间的聚类分析

通过 XRF 岩芯扫描仪扫描潮滩沉积物柱状样,得到元素 Si、Ca、V、Fe、S、Ti、Mn、Ba、Cu、As、Sr、

Ni、Zn、Rb,使用 SPSS 24.0 软件和最远邻近元素分析法进行 R 型聚类分析,得到 R 型聚类图(图 8),结果显示,射阳河口互花米草滩岩芯沉积物元素组合表现为 Ca、Fe、Si、S、Ti、Ba、Rb 和 Sr 聚为一类,剩余的其他元素聚为一类;川东港互花米草滩沉积物岩芯元素聚类结果显示, Ca、Fe、Si 和 Ti 聚为一类, S、Zn、Mn、Ba 聚为一类, Rb、Sr 和 V 聚集在一起, Ni、Cu 和 As 聚集为一类。海安潮滩柱状岩芯元素聚类结果显示, Si、Ca、Fe 聚在一起, Si、Ca、Fe、Ba、S、Sr 和 Ti 聚为一大类, V、Mn、Rb、Ni、Cu、As 和 Zn 聚为一类。

从辐射沙洲潮滩岩芯元素聚类分析来看,大部分柱状岩心元素聚类结果都表现出一定的相似性,即 Si、Fe、Ca、Ba、Sr、Zn、Rb 和 Ti 聚在一起, Ni、Cu、As 和 Mn 聚在一起,说明这两类元素有不同的来源,可能受到物质来源、地球化学环境和生物沉积作用的影响。其中射阳河口、川东港和海安潮滩沉积物元素 Si、Fe、Ca 具有极强的相似性,可能由沉积物“粒控效应”制约造成的,即随着沉积物粒度变大,其元素相对强度愈来愈低。此外, Fe 和 Si 的相似性还受到陆地(长江、黄河)物源的影响,即来源于长江和黄河的物质在近海沉积动力作用下,大量物质堆积在

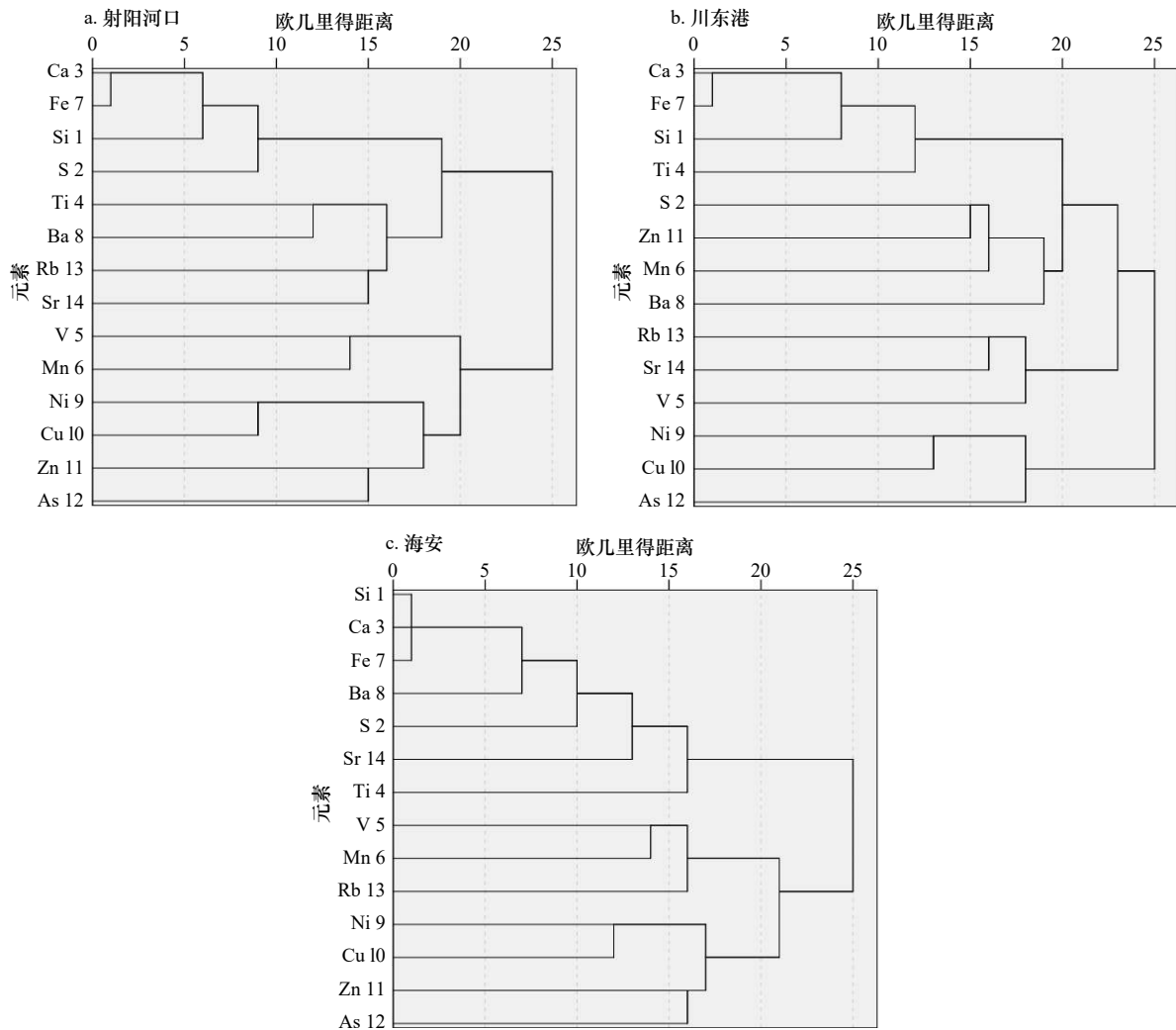


图 8 苏北辐射沙洲海岸潮滩岩芯沉积物元素聚类分析

Fig. 8 Cluster analysis of core sediments elements in tidal flat in the northern Jiangsu radial sand ridges

海岸区域;其次, Si 和 Fe 具有相似的化学性质,二者在水中溶解度小,往往呈悬浮态进行迁移,而 Ca 元素溶解度大,当河流携带的陆源物质进入海洋后,随着海水的 pH 和盐度增大,悬浮态的物质就发生絮凝下沉,不利于其进行迁移;其次是在中国陆架外侧分布含贝壳碎屑较多的残留沉积物,也会导致 Ca 的含量增多,然而在沉积相中没有发现生物贝壳碎屑。因此, Ca、Fe 和 Si 主要来自陆源碎屑物质。

4.3 沉积物元素地球化学特征的环境指示意义

射阳河口作为近百年江苏海岸冲淤交替的重要界面,其沉积环境相对复杂;此外,建闸和围垦对射阳河口地区沉积环境带来显著的影响。岩芯剖面中 Si、Ca 和 Fe 元素相对含量变化趋势一致,可能存在比较相似的地球化学行为。相关性显示, Si、Ca、Fe 和 Ba 具有较强的相关性,且都通过了 0.01 的显著性检验;此外,这些元素与 Ti、Zn 和 Rb 呈正相关;与元

素 V、Ni、Cu 和 As 呈负相关。剖面中大部分元素呈稳定趋势, Si 元素与砂含量变化一致,可见粗粒径含量对 Si 元素有很大的影响,而 Ca 元素和 Fe 元素基本与粉砂和黏土含量变化一致,同平均粒径垂向剖面变化相反,这可能受到粒度控制效应的影响,沉积物较细,有利于 Ca 元素和 Fe 元素的富集。

此外,1982 年以来,随着互花米草的引入,占领了该区域生态环境,苏北海岸侵蚀的细颗粒物在江苏沿岸流和潮流的共同作用下沉积在 65 cm 以上区域。

川东港互花米草滩上端岩芯中大部分元素呈稳定波动变化,根据元素 Si、Fe 和 Ca 垂向变化特征可以看出, Si 含量与砂含量的变化趋势一致,而 Fe 和 Ca 元素垂向相对含量变化一致;同时在大约 40 cm 以下(2000 年以前),该区域潮滩沉积环境较为稳定;岩芯 40 cm 至 10 cm,砂含量和 Si 元素相对含量增加,暗示了这段时间水动力环境比较强,携带粗颗粒沉积物

在此沉积; 10 cm 以上, 黏土和粉砂含量增加, 平均粒径迅速减小, Fe 和 Ca 元素相对含量增加, 可能是由于近岸人类围填海活动导致靠岸堆积, 互花米草生长, 使其前端发生沉积。

从沉积物平均粒径、组分含量和主要元素变化特征可以看出, 2000 年前该区域沉积环境比较稳定, 沉积物主要来源于自苏北海岸侵蚀的细颗粒沉积物的沉积; 2000 年后水动力变强, 西洋水道往南延伸, 水道变宽加深, 所携带的沉积物在近岸堆积, 堆积的沉积物为近岸物质的来源。

海安岸外潮滩剖面中 Si、Ca 和 Fe 元素相对含量变化趋势一致, 元素相对含量自底部向上整体呈减少趋势, 岩芯在 70 cm 处发生了明显的转折, 然后呈波动稳定变化, 10 cm 上下发生了减少变化趋势。说明该区域沉积环境在 70 cm 以下比较稳定, 而 70 cm 以上(1974 年前后)发生了变化, 可能是人类围垦活动, 改变了沉积物动力格局, 导致物源发生了变化。

5 结论

本文通过 XRF 岩芯扫描方法获取了海岸潮滩柱

状岩芯的沉积物地化元素。得出以下结论:

(1) 通过对苏北辐射沙洲典型潮滩剖面岩芯沉积物 XRF 扫描仪扫描元素的相对含量变化进行分析, Si、Ca 和 Fe 元素相对含量较高, 且自北向南其含量不断的增加, Mn、Ba、Cu 和 Zn 元素含量较低, 基本在 30 cps 以下, 在所有剖面含量变化不大, 其他元素相对含量介于 40~100 cps, 在各岩芯中变化不大。

(2) 在垂向变化上, Si、Ca 和 Fe 元素垂向变化趋势一致, 显示具有较高的相关性, 即具有近似的地球化学行为和一致的物质来源; 而 Ni、Zn 和 S 元素在不同柱状岩芯中呈现与 Si、Ca 和 Fe 相反的变化趋势, 暗示了这几种元素与前者具有不同的地球化学行为, 其他元素垂向变化在所有柱状岩芯中基本相对稳定, 呈波动稳定的变化特征。

(3) 通过对苏北辐射沙洲近岸潮滩沉积物元素及其与平均粒径的相关性分析和聚类分析发现, 元素 Si、Ca、Ba 和 Fe 有着相似的地球化学行为和一致的物质来源, Ni、V、Cu 和 Zn 有着类似的地球化学行为和一致的物质来源, 这两类元素有不同的来源, 可能受到物质来源、地球化学环境和生物沉积作用的影响。

参考文献:

- [1] 王颖, 朱大奎, 周旅复, 等. 南黄海辐射沙脊群沉积特点及其演变[J]. 中国科学(D辑), 1998, 28(5): 385-393.
Wang Ying, Zhu Dakui, Zhou Lüfu, et al. Sedimentary characteristics and evolution of radiative sand ridge group in the South Yellow Sea[J]. Science in China (Series D), 1998, 28(5): 385-393.
- [2] Murray N J, Clemens R S, Phinn S R, et al. Tracking the rapid loss of tidal wetlands in the Yellow Sea[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2014, 12(5): 267-272.
- [3] Li Xing, Zhang Xin, Qiu Chuanyin, et al. Rapid loss of tidal flats in the Yangtze River delta since 1974[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(5): 1636.
- [4] Zhao Chuanpeng, Qin Chengzhi, Teng Jiakun. Mapping large-area tidal flats without the dependence on tidal elevations: a case study of Southern China[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, 159: 256-270.
- [5] Sagar S, Roberts D, Bala B, et al. Extracting the intertidal extent and topography of the Australian coastline from a 28 year time series of Landsat observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 195: 153-169.
- [6] 王颖. 黄海陆架辐射沙脊群[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Wang Ying. Radiative Sandy Ridge Field on Continental Shelf of the Yellow Sea[M]. Beijing: China Environmental Press, 2002.
- [7] 任美镠. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
Ren Mei'e. Comprehensive Survey Report on Coastal Zone and Marine Resources of Jiangsu Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 1986.
- [8] Zhang R S, Chen C J. Evolution of Jiangsu Offshore Banks (Radial Offshore Tidal Sands) and Probability of Tiaozini Sands Merged into Mainland[M]. Beijing: China Ocean Press, 1992: 56-64.
- [9] Gao Shu. Modeling the preservation potential of tidal flat sedimentary records, Jiangsu coast, eastern China[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(16): 1927-1936.
- [10] 金宇豪, 丁贤荣, 葛小平. 基于MSS/ETM影像辐射沙脊群沙脊地貌遥感演变分析[J]. 地理空间信息, 2015, 13(6): 79-81, 88.
Jin Yuhao, Ding Xianrong, Ge Xiaoping. Sand ridge geomorphic remote sensing evolution analysis of radial sand ridges based on MSS/ETM[J]. *Geospatial Information*, 2015, 13(6): 79-81, 88.
- [11] 李岚, 丁贤荣, 葛小平, 等. 辐射沙脊群蒋家沙西段地貌演变特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 366-370.
Li Lan, Ding Xianrong, Ge Xiaoping, et al. Geomorphic evolution characteristics of western segment of Jiangjiasha in radial sand ridge group area[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2015, 43(4): 366-370.
- [12] 李清, 殷勇. 南黄海辐射沙脊群里磕脚11DT02孔沉积相分析及环境演化[J]. 地理研究, 2013, 32(10): 1843-1855.

- Li Qing, Yin Yong. Sedimentary facies and evolution of the Likejiao sandy ridge, in the South Yellow Sea offshore area, eastern China[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(10): 1843–1855.
- [13] 朱大奎, 柯贤坤, 高抒. 江苏海岸潮滩沉积的研究[J]. *黄渤海海洋*, 1986, 4(3): 19–27.
Zhu Dakui, Ke Xiankun, Gao Shu. Tidal flat sedimentation of Jiangsu coast[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1986, 4(3): 19–27.
- [14] 王宝灿, 虞志英, 刘苍宇, 等. 海州湾岸滩演变过程和泥沙流动向[J]. *海洋学报*, 1980, 2(1): 79–96.
Wang Baocan, Yu Zhiying, Liu Cangzi, et al. The change of coasts and beaches and the movement of longshore sediments of the Haizhou Bay[J]. *Haiyang Xuebao*, 1980, 2(1): 79–96.
- [15] 任美镠, 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 Mei'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.
- [16] 李炎, 谢钦春. 杭州湾庵东浅滩地貌演变规律[J]. *东海海洋*, 1993, 11(2): 25–33.
Li Yan, Xie Qinchun. Dynamical development of the Andong tidal flat in Hangzhou Bay, China[J]. *Donghai Marine Science*, 1993, 11(2): 25–33.
- [17] 李九发. 长江河口南汇潮滩泥沙输移规律探讨[J]. *海洋学报*, 1990, 12(1): 75–82.
Li Jiufa. Sediment transport in Nanhui tidal flat of the Changjiang Estuary[J]. *Haiyang Xuebao*, 1990, 12(1): 75–82.
- [18] 李占海. 江苏大丰潮滩沉积动力过程研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.
Li Zhanhai. Sediment dynamic process of intertidal flats, Dafeng, Northern Jiangsu, China[D]. Shanghai: East China Normal University, 2005.
- [19] 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.
Wang Aijun, Gao Shu, Jia Jianjun, et al. Contemporary sedimentation rates on salt marshes at Wanggang, Jiangsu, China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 61–70.
- [20] 杨桂山, 施雅风, 季子修. 江苏淤泥质潮滩对海平面变化的形态响应[J]. *地理学报*, 2002, 57(1): 76–84.
Yang Guishan, Shi Yafeng, Ji Zixiu. The morphological response of typical mud flat to sea level change in Jiangsu coastal plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(1): 76–84.
- [21] 高抒, 李安春. 浅海现代沉积作用研究展望[J]. *海洋科学*, 2000, 24(2): 1–3.
Gao Shu, Li Anchun. Research of sedimentary processes in marine environments: a prospect[J]. *Marine Science*, 2000, 24(2): 1–3.
- [22] 陈志华, 石学法, 王湘芹, 等. 南黄海B10岩心的地球化学特征及其对古环境和古气候的反映[J]. *海洋学报*, 2003, 25(1): 69–77.
Chen Zhihua, Shi Xuefa, Wang Xiangqin, et al. Geochemical changes in Core B10 in the southern Huanghai Sea and implications for variations in paleoenvironment and paleoclimate[J]. *Haiyang Xuebao*, 2003, 25(1): 69–77.
- [23] Li Xiangdong, Shen Zhenguo, Wai O W H, et al. Chemical forms of Pb, Zn and Cu in the sediment profiles of the Pearl River Estuary[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 42(3): 215–223.
- [24] Weltje G J, Tjallingii R. Calibration of XRF core scanners for quantitative geochemical logging of sediment cores: theory and application[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 274(3/4): 423–438.
- [25] Boyle J F. Rapid elemental analysis of sediment samples by isotope source XRF[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2000, 23(2): 213–221.
- [26] Loring D H, Asmund G. Geochemical factors controlling accumulation of major and trace elements in Greenland coastal and fjord sediments[J]. *Environmental Geology*, 1996, 28(1): 2–11.
- [27] Hu Guang, Jin Zhangdong, Zhang Fei. Constraints of authigenic carbonates on trace elements (Sr, Mg) of lacustrine ostracod shells in paleoenvironment reconstruction and its mechanism[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(5): 654–664.
- [28] Francus P, Lamb H, Nakagawa T, et al. The potential of high-resolution X-ray fluorescence core scanning: applications in paleolimnology[J]. *PAGES News*, 2009, 17(3): 93–95.
- [29] Ziegler M, Jilbert T, De Lange G J, et al. Bromine counts from XRF scanning as an estimate of the marine organic carbon content of sediment cores[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(5): Q05009.
- [30] Metcalfe S E, Jones M D, Davies S J, et al. Climate variability over the last two millennia in the North American Monsoon region, recorded in laminated lake sediments from Laguna de Juanacatlán, Mexico[J]. *The Holocene*, 2010, 20(8): 1195–1206.
- [31] 刘旭英, 高建华, 白凤龙, 等. 苏北新洋港潮滩柱状沉积物粒度分布特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(4): 27–35.
Liu Xuying, Gao Jianhua, Bai Fenglong, et al. Grain size information in different evolution periods of Xinyanggang tidal flat in Jiangsu Province[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(4): 27–35.
- [32] 王颖, 朱大奎. 中国的潮滩[J]. *第四纪研究*, 1990, 10(4): 291–300.
Wang Ying, Zhu Dakui. Tidal flats of China[J]. *Quaternary Sciences*, 1990, 10(4): 291–300.
- [33] 诸裕良, 严以新, 薛鸿超. 南黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究——I. 潮流运动平面特征[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(5): 403–410.
Zhu Yuliang, Yan Yixin, Xue Hongchao. Hydrodynamic mechanism of the formation and development of radiative sandbars in the South Yellow Sea: I. Plane characteristics of tidal current movement[J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(5): 403–410.

- [34] 张忍顺, 沈永明, 陆丽云, 等. 江苏沿海互花米草(*Spartina alterniflora*)盐沼的形成过程[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(4): 358–366.
Zhang Renshun, Shen Yongming, Lu Liyun, et al. Formation of *Spartina alterniflora* salt marsh on Jiangsu coast, China[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(4): 358–366.
- [35] 徐晓凤. 射阳海岸现代沉积速率及重金属污染特征[D]. 南京: 南京师范大学, 2015.
Xu Xiaofeng. Modern sedimentation rate and heavy metal pollution characteristics of Sheyang coast[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2015.
- [36] 刘婷, 胡宝清. 基于聚类分析的复杂网络中的社团探测[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2007, 4(1): 28–35.
Liu Ting, Hu Baoqing. Detecting community in complex networks using cluster analysis[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2007, 4(1): 28–35.
- [37] 胡雷芳. 五种常用系统聚类分析方法及其比较[J]. 浙江统计, 2007(4): 11–13.
Hu Leifang. Five common system cluster analysis methods and their comparison[J]. *Zhejiang Statistics*, 2007(4): 11–13.
- [38] 李天斌. 宁夏天景山奥陶系马家沟组、米钵山组常量、微量元素聚类分析成果解释[J]. 岩相古地理, 1999, 19(2): 21–28.
Li Tianbin. The geological interpretation on the results of cluster analysis of major and trace elements from the Ordovician Majiagou and Miboshan Formations in the Tianjing mountain area, Ningxia[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1999, 19(2): 21–28.

Centennial scale environmental changes in the elemental geochemistry of tidal flat sediments in the northern Jiangsu radial sand ridges

Zhao Yifei¹, Xu Min¹, Liu Qing¹, Shu Qiang¹, Wang Ping²

(1. School of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. School of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The radial sand ridges is a typical sedimentary accumulation body distributed off the coast of Jiangsu Province. Under the influence of the sediment supply of the Changjiang River and the Huanghe River as well as the coastal tidal current, the typical silty-muddy tidal flats are developed, and the sediment elements can record the important information of the environmental changes of the tidal flats. Three short core samples were collected in the tidal flat of radial sand ridges to establish a reliable chronological framework and geochemical element testing, and 14 elements with high X-ray fluorescence (XRF) core scanner analysis signal strength were selected for clustering and correlation method to extract environmental information. The sedimentary environment changes of the northern Jiangsu radial sand ridges under the influence of human activities and coastal environment changes in the past 100 years were studied. The results indicate that the contents of Si, Ca and Fe in the core sediments of typical tidal flat profile in this area are relatively high, and the contents of Si, Ca and Fe increasing from north to south, while the contents of Mn, Ba, Cu and Zn are low, and the little changes in contents at all profiles changes. In terms of vertical change, Si, Ca and Fe have the same vertical change trend, while Ni, Zn and S have the opposite change trend with Si, Ca and Fe in different sediment cores. Correlation and clustering analysis show that Si, Ca and Fe have high correlation, that is, they have similar geochemical behavior and consistent material source. In addition, it is negatively correlated with elements Ni, Cu and Zn, suggesting that these elements have different geochemical behaviors with the former. The sedimentary environment changes of the tidal flat are obvious and show different patterns in different regions in the northern Jiangsu radial sand ridges, and the material source, hydrodynamic environment and human activities are the main reasons leading to the change of the sedimentary environment.

Key words: tidal flats; sediment; element geochemistry; X-ray fluorescence; northern Jiangsu radial sand ridges