

近百年来长江口启东嘴潮滩沉积物质 来源及定量估算

张云峰¹, 张振克², 任 航², 高 磊³, 丁海燕¹

(1. 盐城师范学院江苏沿海开发研究院, 江苏 盐城 224007; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 河流入海输沙是海岸稳定的重要物质基础。启东嘴潮滩位于长江北支口门, 与江苏海岸线交汇, 陆海相互作用强烈。利用电感耦合等离子体质谱仪测定了岩芯沉积物 QDZ-1 的地球化学元素。根据地球化学元素的分布特征和富集系数, 分析了物源指示意义, 表明启东嘴潮滩沉积物受到长江物质和南黄海物质的共同影响。基于地球化学元素的沉积物端元定量判别方法, 对不同物质来源的贡献率进行了定量估算。在 1930 年前启东嘴潮滩沉积物主要来自长江的入海输沙, 贡献率为 68.1%, 随着长江北支河槽的衰退, 贡献率逐渐减少, 在 1930-1972 年间为 38.5%, 到 1972 年后减少到 17.5%。苏北沿岸流携带向南输运的南黄海物质, 贡献率逐渐增加, 在 1930 年前为 27.1%, 在 1930-1972 年间为 55.6%, 到 1972 年后增加到 75.9%, 成为启东嘴潮滩主要物质来源。沉积物来源的阶段变化, 在时间上与北支水动力的阶段性变化基本吻合。

关键词: 长江口; 启东嘴潮滩; 物质来源; 环境变化; 定量估算

DOI: 10.11821/dlxb201811005

1 引言

河口海岸是陆海相互作用最具特色的区域, 也是受人类活动影响最为敏感的地区^[1-2]。海岸带陆海相互作用研究计划 (Land Ocean Interactions in the Coastal Zone, LOICE) 是国际科学研究计划, 其中一个重要研究内容就是强调对人类活动与“流域—海岸”的相互影响研究^[3]。河流入海泥沙是海岸稳定的重要物质来源, 基于 1930s 以来的历史数据, Walling 等对世界 140 余条河流的径流量和输沙量分析表明, 河流入海输沙呈普遍减少趋势^[4], 主要原因是气候变化和人类活动, 而后者越来越占据主导地位^[5]。入海泥沙的减少会导致河口三角洲延伸淤长减缓, 加剧海岸侵蚀^[6]。尼罗河三角洲最为典型, 自 1964 年阿斯旺大坝建设后, 海岸线严重侵蚀后退^[7-8]。中国也面临入海输沙下降的问题^[9-11]。长江是中国第一大河, 历年携带巨量泥沙入海, 但从 20 世纪 60 年代开始, 出现持续下降趋势。水利工程和水土保持等人类活动, 尤其是三峡大坝的建设, 拦截了大量泥沙, 进一步加剧

收稿日期: 2017-12-08; 修订日期: 2018-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(41501003, 41701101, 41371024, 41771199); 江苏省高校哲学社会科学研究项目(2013SJD790028); 江苏省高校自然科学研究项目(14KJD170005, 14KJA170006); 江苏省自然科学基金项目(BK20160446) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41501003, No.41701101, No.41371024, No.41771199; Philosophy and Social Sciences Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China, No.2013SJD790028; Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China, No.14KJD170005, No.14KJA170006; Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China, No.BK20160446]

作者简介: 张云峰(1980-), 男, 江苏盐城人, 博士, 副教授, 主要研究方向为沉积地貌演变与人类活动的环境效应, 陆海相互作用与海岸环境变化等。E-mail: zhangyunfeng1980@126.com

了入海泥沙的减少^[12-15], 导致河口三角洲沉积速率减缓, 局部岸段发生侵蚀^[16-19]。作为长江入海第一级分汊水道的北支, 1970年立新坝的修建使其分流角增大至几乎90度, 沉积动力条件显著改变, 以潮流作用为主替代径流作用, 北支河宽的缩窄和河床的抬高淤浅过程同时发生, 大幅度减少了河槽容积, 在涨潮流作用下, 口外悬沙扩散进入北支沉积, 泥沙净向上输移^[20]。自20世纪80年代开始, 基于物源示踪的定性分析, 对长江北支泥沙输移和沉积物来源形成了不同观点, 如长江源^[21-23]、苏北源^[24-26]、混合源^[27-28]等。

无论是地质年代、历史年代, 还是现代, 物源始终对判别沉积物特征和决定演化过程起主要作用^[29]。因此, 判断物源与物质特性往往成为研究的首要问题。物源分析包括源区位置与环境条件、沉积物的搬运路径及特性等^[30]。随着现代技术水平的不断提高, 物源分析方法逐渐增多, 如沉积学方法、岩石学方法、矿物方法、元素地球化学方法、地质年代学方法、化石及生标化合物方法及地球物理学方法等^[31-32]。物源识别研究逐渐由从定性分析向定量分析转变。对于具有混合特征的沉积物而言, 物源的定量分析还需要给出不同物源的贡献率。例如, 利用线性规划方法定量分离出混合源沉积物的端元^[33-34]; 利用主成分分析方法分离混合源沉积物的成分数据问题^[35]; 借助基于“质量守恒”原理的非线性规划模型定量识别沉积物物源^[36]; 利用成分数据的统计方法处理沉积物样品的地球化学数据^[37-39], 对沉积物源实现了定量分离。

启东嘴潮滩位于长江北支口门, 根据野外观测, 淤积十分明显, 与长江入海泥沙减少相矛盾, 也与北支河槽缩窄淤浅相矛盾, 大量泥沙从何而来? 北支的沉积动力环境发生了根本性变化, 对物源又产生怎样的影响? 本文使用地球化学元素, 做了物源示踪, 进而采用物源的端元定量判识方法, 分析启东嘴潮滩沉积物质的来源及变化。既对深化认识海岸沉积环境演变提供科学依据, 又对合理开发利用潮滩资源提供决策参考。

2 样品采集与研究方法

2.1 样品采集

长江口启东嘴潮滩是长江北支现代人类活动最为活跃的地区之一。早在20世纪50年代, 为改善区域交通、抵御风暴潮灾害, 修建了海防公路。2006年, 广州恒大地产集团有限公司建设了高等级标准的围垦大堤。在海防公路和恒大围垦大堤之间, 还有3道大堤, 分别建于1970年、1989年和1992年^[40-41]。2011年8月在启东嘴潮滩进行了为期3天的野外调查, 为保证沉积物样品能够真实反映潮滩沉积环境的变化, 沉积物样品的采集选择了未受人类活动直接干扰的圆陀角湿地保护区内的互花米草盐沼滩地。利用重力取样器, 采集了长215 cm的岩芯沉积物QDZ-1, 如图1所示。采样器是荷兰Eijkelpkamp公司生产的半圆筒便捷式手持钻, 可以很好地避免岩芯沉积物的压缩和变形。样品采集后, 用刮刀轻轻除去表层碎屑, 现场对沉积岩芯进行了特征描述、拍照和分样。为防止样品受到损失和污染, 分样后, 立即装进聚乙烯封塑袋内, 最后放入冷藏箱中, 密封并运回实验室内供实验测试使用。

2.2 研究方法

2.2.1 沉积物样品分析 沉积物样品的元素分析, 采用电感耦合等离子体质谱法 (HR-ICP-MS), 所用仪器为德国菲尼根玛特 (Finnigan MAT) 公司生产的高分辨率ELEMENT 2型等离子质谱仪。在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成样品的测试。沉积物样品前期处理和测试流程参考高剑锋等^[42]的研究方法。取混合均匀的样品0.5 g, 用玛瑙研钵磨至200目以下, 放入微波消解罐的专用杯中加入少量蒸

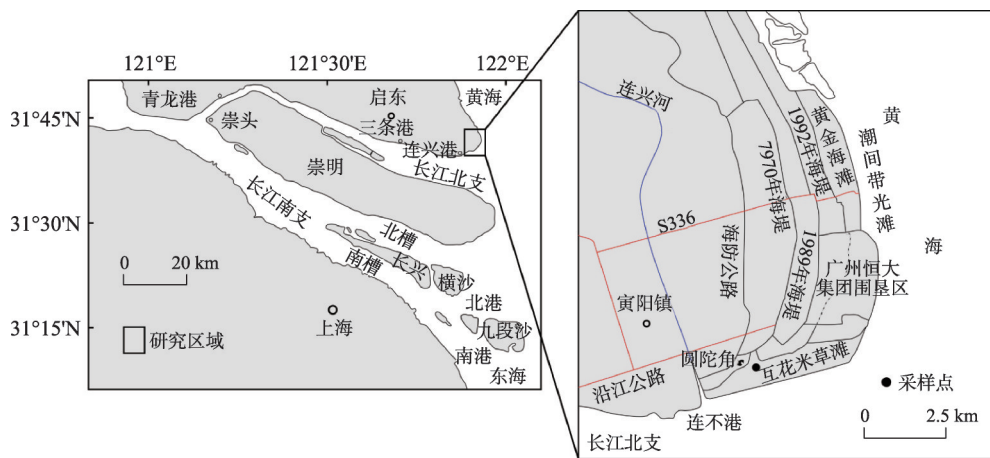


图1 研究区及样品采集位置示意图

Fig. 1 The research area and location of core sediments

馏水使沉积物样品变得湿润后，加入适量的氢氟酸（HF）和硝酸（HNO₃）反复加热蒸干至湿盐状，经过酸溶法消解后，直至硝化液不再出现残留的白色或黑色残渣；然后，用5 ml 30%（v/v）的硝酸溶液（HNO₃）提取残渣，加入1 ml 500 mg/ml的Rh内标溶液稀释到50 ml，对检测过程进行全程的质量控制。

2.2.2 富集系数的计算 沉积物中微量元素的含量通过地球化学指标标准化处理后，可揭示出相对于地壳的富集程度，即富集系数EF。由于Al在表生环境中非常稳定，因其测量的准确性和精确性，是最常被采用的地球化学指标^[43]，计算公式如下：

$$EF = \frac{(X/Al)_{\text{样品}}}{(X/Al)_{\text{地壳}}} \tag{1}$$

式中：分子是样品的元素与Al的比值；分母是地壳的元素与Al的比值。中国沿海陆架沉积物的物质来源基本上都是来自入海河流的输沙，因此，地壳的元素比值选择中国东部大陆壳的地球化学元素的丰度值作为参考背景值，数据来自迟清华等^[44]。

2.2.3 物源定量判别方法 如果将具有多个物质来源的沉积物样品的每一个物源组分称为端元的话，那么物源定量识别的端元模型可基于如下思路进行建立^[37-39]：假设沉积物样品经过实验测试得到m个地球化学元素，根据元素的含量按照一定的顺序排成一个行向量，那么n个样品可组成元素数据矩阵X_{n×m}，同nf个端元可组成端元成分矩阵B_{nf×m}。如果沉积物样品是端元按不同比例混合而成的，那么满足如下线性组合关系：

$$X_{n \times m} \approx L_{n \times nf} \times B_{nf \times m} \quad (nf \leq n) \tag{2}$$

L_{n×nf}的第i行向量元素为各端元在第i样品中的相对百分含量。矩阵X_{n×m}的数据由野外采样样品和实验分析获得，是已知数据。如果从X_{n×m}出发求得B_{nf×m}和L_{n×nf}，便获得了各端元的成分和端元在样品中的百分含量。

第一步，数据成分化和列变换。为保证数据矩阵X_{n×m}满足成分数据的条件，应对原始数据做成分化调整，使各项指标含量之和为常数。同时对原始数据进行标准化处理，即对数据矩阵的列进行变换：

$$x'_{ij} = (x_{ij} - x \min_j) / (x \max_j - x \min_j) \tag{3}$$

式中：xmin_j为第j列的最小值；xmax_j为第j列的最大值。

第二步，求解端元的初始成分。首先，利用成分化Q型因子分析算法，处理元素数

据 $X_{n \times m}$ 。如果研究区沉积物有 3 个物质来源, 就确定因子数为 3, 也就是定义 $nf = 3$, 这样就能够得到成分化正交因子, 一共 nf 个。如果得到的这 nf 个成分化正交因子有负值的话, 还需要进一步通过“最优斜交变换方法”的线性规划方法, 将负值的成分化正交因子投影到估计空间的正象限。经过这一系列步骤的处理后, 就得到了没有负值的成分化斜交因子 $B_{nf \times m}^0$, 一共 nf 个, 最后, 将这 nf 个成分化斜交因子 $B_{nf \times m}^0$ 作为需要求解的初始端元成分。

第三步, 求解端元的初始含量。采用“最小二乘法”法来求解端元的初始含量, 如果端元的初始含量 $L_{n \times nf}^0$ 有负值的话, 说明上一步求解得到的初始端元成分不满足成分条件, 需要做进一步的调整。

第四步, 对不满足成分条件的初始端元成分进行调整, 直到得到最佳的端元成分和含量。当端元成分 $B_{nf \times m}$ 和端元含量 $L_{n \times nf}$ 均为不含负数时, 可以认为端元的成分及其含量是最优解。 $B_{nf \times m}$ 和 $L_{n \times nf}$ 正是定量分离出来的端元成分和端元百分含量。

3 结果分析

3.1 微量元素地球化学特征

微量元素分析结果(表1)显示, 根据平均含量可划分为四组。第一组是Ti元素, 含量最高, 高达 5000 $\mu\text{g/g}$ 以上。第二组包括Mn、Ba、Zr、Sr、Rb、V等元素, 在 100 $\mu\text{g/g}$ 以上; 第三组包括Zn、Cr、Ni、Cu、Pb、Nb、Co、Th、Sc等元素, 在 10 $\mu\text{g/g}$ 以上。第四组包括Hf、Mo等元素, 含量较低, 低于 10 $\mu\text{g/g}$, 其中Mo元素的含量非常少, 不到 1 $\mu\text{g/g}$ 。

表1 岩芯沉积物 QDZ-1 的微量元素含量的统计指标值
Tab. 1 The statistical parameters of micro-elements from QDZ-1 core sediments

元素	最小值($\mu\text{g/g}$)	最大值($\mu\text{g/g}$)	平均值($\mu\text{g/g}$)	标准偏差	变异系数(%)
Sc	10.33	17.73	12.91	2.17	0.17
Ti	4622.31	6166.75	5309.01	420.01	0.08
Zr	204.96	567.74	296.27	79.00	0.27
Nb	13.09	16.58	14.47	0.89	0.06
Hf	5.24	14.78	7.77	2.10	0.27
Th	10.97	18.35	13.38	1.48	0.11
Rb	79.84	154.14	109.97	21.68	0.20
Sr	138.87	176.85	155.44	10.11	0.07
Ba	336.45	424.90	378.21	24.35	0.06
V	76.91	139.42	100.41	18.69	0.19
Cr	48.22	82.05	63.13	8.98	0.14
Mn	504.04	912.69	670.27	131.74	0.20
Co	10.05	18.91	14.07	2.63	0.19
Ni	23.89	50.95	35.82	7.74	0.22
Cu	11.37	32.24	19.79	6.14	0.31
Zn	45.29	153.02	73.95	20.93	0.28
Mo	0.29	0.99	0.52	0.20	0.38
Pb	13.50	30.79	19.19	4.74	0.25

微量元素的垂向变化曲线如图2所示, 大部分微量元素有着一致的变化趋势, 在深度52.5 cm处可分为上下两段, 上段垂向变化规律性显著, 下段垂向变化较为复杂, 且出现峰值。根据垂向特征, 大致可分为三种类别。第一类包括Zr、Hf两种元素, 在上段表现为由下向上呈减少趋势。第二类包括Sr、Ba两种元素, 在上段的规律性不显著。其余元素可归为第三类, 在上段表现为由下向上呈增加趋势。其中, Ti、Zr、Nb、Hf、Th等在深度172.5 cm处出现峰值, 其余元素也在此深度表现出了一定程度的峰值变化。

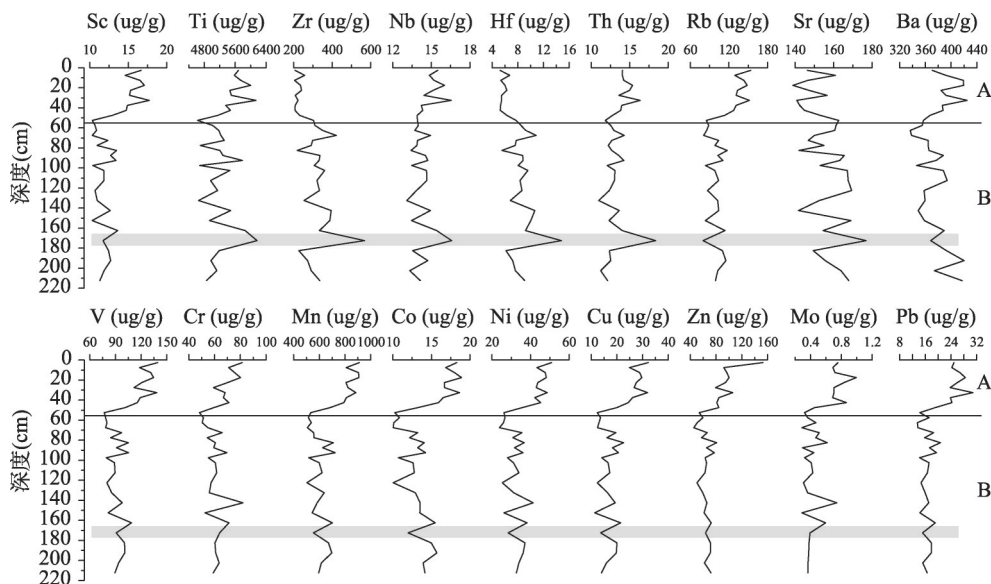


图2 岩芯沉积物QDZ-1微量元素垂向变化

Fig. 2 The profile characteristic of micro-elements from QDZ-1 core sediments

3.2 微量元素的物源指示意义

沉积物中的微量元素特征对指示沉积区域的演化历史、沉积环境及沉积物的物质来源具有十分重要的示踪作用^[45-47]。中国沿海陆架沉积物主要来自长江和黄河, 黄河每年有约 10×10^8 t的泥沙入海; 长江每年有约 5×10^8 t的泥沙入海^[48]。南黄海沉积物受到长江和黄河的共同影响, 地质时期主要来自古长江入海泥沙, 历史时期又有黄河入海泥沙的加入, 在长期的地质过程作用下不断扩散混合, 具有混合源特征^[49-50]。从表2可以看出, 岩芯沉积物QDZ-1微量元素与邻近区域有很好的可比性。富集系数与南黄海最为接近的有Sc、Cr、Mn、Co、Cu、Rb、Zr、Pb、Th等9种元素; 与长江最为接近的有Ti、V、Ni、Zn、Nb、Ba等6种元素; 与黄河最为接近的只有Sr一种元素。可以推断长江口启东嘴潮滩沉积物受到长江物质和南黄海物质的共同影响, 与南黄海物质的关系更为密切。

3.3 沉积物质不同来源的贡献率

根据 ^{137}Cs 蓄积峰时标, 岩芯沉积物QDZ-1的平均沉积速率为 2.61 cm/a ^[53], 据此估算, 在深度52.5 cm处的时标为1972年, 在深度172.5 cm处的时标为1930年。因此, 以深度52.5 cm、172.5 cm将岩芯沉积物QDZ-1分成3段。基于地球化学元素的沉积物端元定量判识方法, 得到沉积物质不同来源分别在上段、中段、下段等层位的贡献率。如表3可以看出, 在1930年以前, 长江物质的贡献率最大, 为68.1%, 其次为南黄海物质, 贡献率为27.1%, 黄河物质的贡献最小, 为4.8%。此后, 长江物质的贡献逐渐减少, 在1930-1972年间下降到38.5%, 在1972年后更是减少到17.5%。南黄海物质的贡献率增加

表2 沉积物元素富集系数与邻近区域的比较

Tab. 2 Comparison of the micro-elements enrichment coefficient of core sediments with adjacent areas									
元素	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn
长江	0.84	2.16	1.60	1.31	1.30	1.02	1.68	2.33	1.95
黄河	0.75	1.46	1.46	1.28	0.81	0.87	1.30	1.03	1.19
南黄海	1.03	2.02	1.13	1.42	1.59	1.05	1.51	1.42	1.39
均值	1.41	2.46	1.66	1.54	1.53	1.37	1.69	1.41	1.80
元素	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	Pb	Th	数据来源	
长江	1.82	0.49	2.06	2.46	0.95	4.29	3.59	文献[51]	
黄河	1.50	0.80	2.47	2.04	1.61	2.96	4.64	文献[51]	
南黄海	2.55	0.98	2.66	2.21	1.43	2.44	4.49	文献[52]	
均值	2.91	0.82	3.43	2.68	1.13	2.37	4.13	本文	

表3 沉积物不同端元物质贡献率变化的定量识别

Tab. 3 The quantification of contribution rate among different sediment sources			
深度	上段(0~52.5 cm)	中段(52.5~172.5 cm)	下段(172.5~212.5 cm)
长江贡献(%)	17.5	38.5	68.1
黄河贡献(%)	6.6	5.9	4.8
南黄海贡献(%)	75.9	55.6	27.1
时间	1972年后	1972-1930年	1930年前
河槽性质	涨潮型	过渡型	落潮型

显著，在1930-1972年间增加到55.6%，在1972年后增加到75.9%，成为长江口启东嘴潮滩的主要物质来源。

4 讨论

4.1 北支沉积动力变化与阶段划分

长江口启东嘴潮滩处于长江北支下段连兴港附近，长江北支沉积动力环境的变化，必然对进入启东嘴潮滩的悬浮泥沙的输运和沉降有着重要影响。长江北支由河控通道转变为潮控通道，不断缩窄淤浅，大致可分为3个阶段^[54-56]：第一阶段（1931年之前）：在自然因素作用下河势演变缓慢，水动力以径流作用为主。第二阶段（1931-1970年）：人类活动对北支演变的影响逐渐增强，水动力由河控型向潮控型转变。第三阶段（1970年后），人类围垦进一步加剧北支的缩窄淤浅，涨潮流为主要动力，净向上输沙，北支趋于淤废。根据¹³⁷Cs沉积速率分析可知^[53]，在深度52.5 cm处的时标为1972年，这与长江北支分流角增大到几乎90°直角的1970年，在时间上非常接近；在深度172.5 cm处的时标为1930年，长江北支水道在1915年之前基本稳定，长江流域在20世纪的1931、1954和1998年发生了全流域性大洪水，考虑测年误差，微量元素的垂直剖面在深度172.5 cm处出现的极值变化，可能是受到1931年大洪水极端环境变化的影响。

4.2 启东嘴邻近海域动力环境与沿岸输沙

长江口启东嘴潮滩近海海域的沉积动力主要有苏北沿岸流、浙闽沿岸流、台湾暖流、长江冲淡水等^[57-58]。台湾暖流在远离长江口的海区，位置偏东南且流向东北^[54]。浙闽沿岸流位置偏南，冬季流向偏南，夏季主流在远海区转向东北^[29]。长江冲淡水主要通过

南支入海，在冬季沿岸南下，在夏季受苏北沿岸流和台湾暖流的合力作用，在远海区转向东北^[59-60]。可以认为对沉积物搬运和扩散起关键作用的是苏北沿岸流。苏北沿岸流流向终年偏南，甚至有越过长江口向南侵入东海的趋势^[61]。根据长江北支水道萎缩与入海输沙减少的时间节点，可以初步确定自20世纪70年代后，长江口启东嘴潮滩的物质来源已不再是长江的入海输沙，贡献率由68.1%减少到17.5%。沉积物主要来源于南黄海的悬浮泥沙输运，包括苏北废黄河三角洲和南黄海辐射沙洲沉积物，贡献率由27.1%增加到75.9%。黄河北归渤海入海后，在海洋动力作用下，苏北废黄河三角洲受到大面积的冲刷，在苏北沿岸流的影响下悬沙输运以南向为主^[62]。辐射沙洲自形成以来，始终处于动态变化之中，近半个世纪以来沙脊群普遍存在整体逐渐南移的趋势，尤其是辐射沙洲南翼的小庙洪、网仓洪、烂沙洋和黄沙洋等水道及其之间的沙洲南移趋势更为显著^[63-64]。

4.3 涨潮动力作用与泥沙扩散倒灌

长江北支在自然河床演变和人类围垦活动的影响下，北支水沙分流比不断减少，河槽性质发展变化，涨潮流成为主要动力作用，水沙净输向上呈现倒灌^[65-66]。涨潮流的含沙量远远大于落潮流的含沙量，在大潮时更为明显，泥沙在涨潮流和落潮流的携带下做往复运动，但总的趋势是往上输移。北支已由落潮流占优势的河段转变为涨潮流占优势的河段，进潮量大是导致北支水沙倒灌南支及北支河段衰退的主要动力机制^[66]。如表4所示，连兴港断面，潮量大进大出，水沙净输向上，呈现倒灌；从潮型比较，涨、落潮量和进、出沙量均为大潮>中潮>小潮；倒灌沙量也以此为序；而倒灌水量相反，为大潮<中潮<小潮，但相差不大。青龙港断面，进、出潮量均小于 $5.5\times10^8\text{ m}^3$ ，较连兴港断面小一个量级；各潮型的净输水量均为下泄，但量值很小，大、小潮均不足 $1\times10^8\text{ m}^3$ ，大潮泥沙净输上溯，倒灌入南支 $1.69\times10^4\text{ t}$ 。已有研究表明，长江北支口门外发生强烈的侵蚀^[67-68]，在1997-2012年间，侵蚀率高达 -7.1 cm/a ，侵蚀下来的泥沙在涨潮动力作用下，为周边潮滩淤积提供大量泥沙物源。

表4 长江北支水沙的全潮通量值
Tab. 4 The flow and sediment flux at the north branch of Yangtze River

潮型	水沙通量	青龙港断面			连兴港断面		
		涨潮	落潮	净输	涨潮	落潮	净输
大潮	水通量(10^8 m^3)	4.80	5.42	0.62	19.59	18.09	-1.50
	沙通量(10^4 t)	60.10	58.41	-1.69	293.7	221.20	-72.50
中潮	水通量(10^8 m^3)	2.46	4.90	2.44	14.81	13.23	-1.58
	沙通量(10^4 t)	22.07	39.20	16.13	165.00	107.00	-58.00
小潮	水通量(10^8 m^3)	0.97	0.27	-0.70	8.64	6.84	-1.80
	沙通量(10^4 t)	2.55	7.38	4.83	29.27	15.45	-13.82

注：表格数据引用胡静等^[66]；“-”值表示输向上游，也称“水沙倒灌”。

在洪水作用以及北支上口河床弯曲作用下，北支河槽动力发生了变化，涨潮动力占主导作用，携带的口外泥沙扩散倒灌成为主要的物质来源，所占比重较大。这并不否认北支对物源的贡献，虽然长江北支由河控通道转变为潮控通道，不断缩窄淤浅，但是实际上北支仍分流了部分泥沙，这也是启东嘴潮滩的物质来源之一，只不过所占比重较小。由于受到研究条件的限制，在野外调查时只采集了一个岩芯，且在现场按5 cm间隔分样，采样间距较大，定量估算的结果可能会出现偏差。但是在综合考虑长江北支水道萎缩的时间节点和沉积动力的阶段性变化，与物源变化的定性认识基本吻合。

5 结论

长江口启东嘴潮滩采集的岩芯沉积物 QDZ-1 记录了物质来源及变化的环境信息。地球化学元素标准化处理后,与源区有很好的可比性,根据富集系数得到研究区沉积物受到长江和南黄海的影响,与南黄海物质的关系更为密切。与南黄海物质接近的元素占 56.3%;与长江物质接近的元素占 37.5%。分 3 个阶段定量估算了物质来源及变化,在 1930 前沉积物主要来自长江的入海输沙,贡献率为 68.1%,在 1930-1972 年间为 38.5%,到 1972 年后减少到 17.5%。苏北沿岸流携带向南输运的南黄海物质,贡献率逐渐增加,在 1930 年前为 27.1%,在 1930-1972 年间为 55.6%,到 1972 年后增加到 75.9%,成为启东嘴潮滩主要物质来源。

参考文献(References)

- [1] Hansom J D. Coastal sensitivity to environmental change: A view from the beach. *Catena*, 2001, 42(2): 291-305.
- [2] Belfiore S. The growth of integrated coastal management and the role of indicators in integrated coastal management: Introduction to the special issue. *Ocean & Coastal Management*, 2003, 46(3): 225-234.
- [3] Newton A, Icely J. Land Ocean Interactions in the Coastal Zone, LOICZ: Lessons from Banda Aceh, Atlantis, and Canute. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 77(2): 181-184.
- [4] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. *Global and Planetary Change*, 2003, 39(1): 111-126.
- [5] Walling D E. Human impact on land-ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology*, 2006, 79(3/4): 192-216.
- [6] Syvitski J P M. Supply and flux of sediment along hydrological pathways: Research for the 21st century. *Global and Planetary Change*, 2003, 39(1-2): 1-11.
- [7] Abd- El Monsef H, Smith S E, Darwish K. Impacts of the Aswan High Dam after 50 years. *Water Resources Management*, 2015, 29(6): 1873-1885.
- [8] Ghoneim E, Mashaly J, Gamble D, et al. Nile Delta exhibited a spatial reversal in the rates of shoreline retreat on the Rosetta promontory comparing pre-and post-beach protection. *Geomorphology*, 2015, 228 (1): 1-14.
- [9] Li Jingying, Zhang Jing. Natural controls of sediment yield in the major rivers in China. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 33(4): 77-85. [李晶莹, 张经. 中国主要河流的输沙量及其影响因素. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33 (4): 77-85.]
- [10] Dai Shibao, Yang Shilun, Gao Ang, et al. Trend of sediment flux of main rivers in China in the past 50 years. *Journal of Sediment Research*, 2007(2): 49-58. [戴仕宝, 杨世伦, 郜昂, 等. 近 50 年来中国主要河流入海泥沙变化. *泥沙研究*, 2007(2): 49-58.]
- [11] Liu Cheng, Wang Zhaoyin, Sui Jueyi. Analysis on variation of seagoing water and sediment load in main rivers of Chin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(12): 1444-1452. [刘成, 王兆印, 隋觉义. 我国主要入海河流水沙变化分析. *水利学报*, 2007, 38(12): 1444-1452.]
- [12] Dai Z J, Fagherazzi S, Mei X F, et al. Decline in suspended sediment concentration delivered by the Changjiang (Yangtze) River into the East China Sea between 1956 and 2013. *Geomorphology*, 2016, 268(1): 123-132.
- [13] Dai Z J, Chu A, Stive M, et al. Is the Three Georges Dam the cause the extremely low suspended sediment discharge into the Yangtze (Changjiang) Estuary behind the 2006? *Hydrological Sciences Journal*, 2011, 56(7): 1280-1288.
- [14] Wan Y Y, Gu F F, Wu H L, et al. Hydrodynamic evolutions at the Yangtze Estuary from 1998 to 2009. *Applied Ocean Research*, 2014, 47(9): 291-302.
- [15] Yang Shilun, Zhu Jun, Li Ming. Evolutional trend of the coastal wetland in Shanghai response to decrease of sediment supply from the Changjiang River. *Journal of Marine Sciences*, 2009, 27(2): 7-15. [杨世伦, Zhu Jun, 李明. 长江入海泥沙的变化趋势与上海滩涂资源的可持续利用. *海洋学研究*, 2009, 27(2): 7-15.]
- [16] Yang S L, Belkin I M, Belkina A I, et al. Delta response to decline in sediment supply from the Yangtze River: Evidence of the recent four decades and expectations for the next half-century. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, 57(4): 689-699.

- [17] Li Congxian, Yang Shouye, Fan Daidu. The change in Changjiang suspended load and its impact on the delta after completion of Three-Gorges dam. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(5): 17-22. [李从先, 杨守业, 范代读. 三峡大坝建成后长江输沙量的减少及其对长江三角洲的影响. 第四纪研究, 2004, 24(5): 17-22.]
- [18] Yang S L, Milliman J, Li P, et al. 50,000 dams later: erosion of the Yangtze River and its delta. *Global and Planetary Change*, 2011, 75(1): 14-20.
- [19] Dai Z J, Liu J T. Impacts of large dams on downstream fluvial sedimentation: An example of the Three Gorges Dam (TGD) on the Changjiang (Yangtze River). *Journal of Hydrology*, 2013, 480(4): 10-18.
- [20] Dai Z J, Fagherazzi S, Mei X F, et al. Linking the infilling of the North Branch in the Changjiang (Yangtze) Estuary to anthropogenic activities from 1958 to 2013. *Marine Geology*, 2016, 379(1): 1-12.
- [21] Yun Caixing, Cai Mengyi, Wang Baoquan. An analysis of the diffusion of suspended sediment discharged from the Changjiang River. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1981, 12(5): 391-401. [恽才兴, 蔡孟裔, 王宝全. 利用卫星像片分析长江入海悬浮泥沙扩散问题. 海洋与湖沼, 1981, 12(5): 391-401.]
- [22] Shi Liren, Wei Te, Shen Huishu. The diffusion of seaward sediments from Yangtze River and the source of depositing sediments in the north branch. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1985, 2(2): 8-19. [史立人, 魏特, 沈惠淑. 长江入海泥沙扩散与北支淤积泥沙来源. 长江水利水电科学研究院院报, 1985, 2(2): 8-19.]
- [23] Dai Z J, Du J Z, Chu A, et al. Sediment characteristics in the North Branch of the Yangtze Estuary based on radioisotope tracers. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 62(8): 1629-1634.
- [24] Cai Aizhi. Diffusion of sediments of the Changjiang River discharging into the sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 1982, 14(1): 78-87. [蔡爱智. 长江入海泥沙的扩散. 海洋学报, 1982, 4(1): 78-88.]
- [25] Chen Baochong. The change of the general form and the transport of the water, load and salt in the north-branch of the Changjiang River mouth. *Scientia Geographica Sinica*, 1993, 13(4): 346-352. [陈宝冲. 长江口北支河势的变化与水、沙、盐的输移. 地理科学, 1993, 13(4): 346-352.]
- [26] Xie L, Zhang Z K, Zhang Y F. Sedimentation and morphological changes at Yuantuojiang Point, estuary of the North Branch, Changjiang River. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 32(2): 24-34.
- [27] Yang Ou, Liu Cangzi. Analysis on sediment transport patterns and sediment sources of north branch of Changjiang estuary. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2002, 33(2): 79-84. [杨欧, 刘苍字. 长江口北支沉积物粒径趋势及泥沙来源研究. 水利学报, 2002, 33(2): 79-84.]
- [28] Zhou Kaisheng, Meng Yi, Liu Cangzi, et al. Analysis of the source of tidal sandy sediments in the north branch of Changjiang River Estuary. *Journal of Hainan Normal University (Natural Science)*, 2007, 20(3): 277-282. [周开胜, 孟翊, 刘苍字, 等. 长江口北支潮流沙体沉积物来源分析. 海南师范大学(自然科学版), 2007, 20(3): 277-282.]
- [29] He Qixiang. *Marine Sedimentary Geology in China*. Beijing: China Ocean Press, 2006: 46-47, 115-121. [何起祥. 中国海洋沉积地质学. 北京: 海洋出版社, 2006: 46-47, 115-121.]
- [30] Xu Yajun, Du Yuansheng, Yang Jianghai. Prospects of sediment provenance analysis. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(3): 26-32. [徐亚军, 杜远生, 杨江海. 沉积物物源分析研究进展. 地质科技情报, 2007, 26(3): 26-32.]
- [31] Zhao Hongge, Liu Chixiang. Approaches and prospects of provenance analysis. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 409-415. [赵红格, 刘池洋. 物源分析方法及研究进展. 沉积学报, 2003, 21(3): 409-415.]
- [32] Yang Renchao, Li Jinbu, Fan Aiping, et al. Research progress and development tendency of provenance analysis on terrigenous sedimentary rocks. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(1): 99-107. [杨仁超, 李进步, 樊爱萍, 等. 陆源沉积岩物源分析研究进展与发展趋势. 沉积学报, 2013, 31(1): 99-107.]
- [33] Dymond J. Ferromanganese nodules from MNAOP sites, H, S and R- control of mineralogical and chemical composition by multiple accretionary processes. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(5): 931-949.
- [34] Leinen M. The origin of palaeochemical signature in north pacific pelagic clays: Parting experiments. *Geochemical et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(2): 305-319.
- [35] Renner RM. A constrained least-squares subroutine for adjusting negative estimated concentrations to zero. *Computer and Geosciences*, 1993, 19(9): 1351-1360.
- [36] Fan Dejiang, Sun Xiaogong, Yang Zuosheng, et al. A mathematical model on the quantitative provenance identification: Take the identification of the surface sediment sources from ECS as example. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1): 30-33. [范德江, 孙效功, 杨作升, 等. 沉积物物源定量识别的非线性规划模型: 以东海陆架北部表层沉积物物源识别为例. 沉积学报, 2002, 20(1): 30-33.]
- [37] Du Dewen, Meng Xianwei, Wu Jinlong, et al. Parting method of end-members from submarine sediment by

- geochemistry data: Algorithm of optimum oblique composition factor analysis for parting end-members from submarine sediments. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21(4): 70-77. [杜德文, 孟宪伟, 吴金龙, 等. 基于地球化学参数的海底沉积物端元定量判别方法研究-分离沉积物端元的最优斜交成分因子算法. *海洋学报*, 1999, 21(4): 70-77.]
- [38] Du Dewen, Meng Xianwei, Wang Yongji, et al. Method of estimating sedimentary end-members and its application to Okinawa trough region. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(5): 532-539. [杜德文, 孟宪伟, 王永吉, 等. 沉积物物源组成的定量判别方法及其在冲绳海槽的应用. *海洋与湖沼*, 1999, 30(5): 532-539.]
- [39] Du Dewen, Meng Xianwei, Han Yibing. Method of parting end-numbers and its consistency from oceanic sediments. *Geological Review*, 2000, 46(Suppl.1): 254-260. [杜德文, 孟宪伟, 韩贻兵. 沉积物物源组成的定量估计方法. *地质评论*, 2000, 46(Suppl.1): 254-260.]
- [40] Zhang Zhenke, Xie Li, Cong Ning, et al. Recent morphological changes of tidal flat at Yuantuojiang Point, estuary of the north branch of the Yangtze River. *Geographical Research*, 2010, 29(5): 909-916. [张振克, 谢丽, 从宁, 等. 近期长江北支口门圆陀角附近潮滩地貌动态变化. *地理研究*, 2010, 29(5): 909-916.]
- [41] Zhang Zhenke, Li Yanming, Meng Hongming, et al. Grain size and its environmental significance of the core from the tidal flat at Yuantuojiang point, Jiangsu Province. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 690-694. [张振克, 李彦明, 孟红明, 等. 江苏圆陀角附近潮滩沉积岩心粒度变化及其环境意义. *第四纪研究*, 2008, 28(4): 690-694.]
- [42] Gao Jianfeng, Lu Jianjun, Lai Mingyuan, et al. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICPMS. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2003, 39(6): 844-850. [高剑峰, 陆建军, 赖鸣远, 等. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析. *南京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39(6): 844-850.]
- [43] Sutherland R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 2000, 39(6): 611-627.
- [44] Chi Qinghua, Wu Mingcai. *A Handbook for Geochemical Element Abundance Data*. Beijing: Geological Press, 2007: 98-115. [迟清华, 鄢明才. *应用地球化学元素丰度数据手册*. 北京: 地质出版, 2007: 98-115.]
- [45] Zhao Zhenhua. *The Principle of Microelement Geochemistry*. Beijing: Science Press, 1997: 194-206. [赵振华. *微量元素地球化学原理*. 北京: 科学出版社, 1997: 194-206.]
- [46] Wei Jiangang, Chen Yuwei, Li Xianhua, et al. Immobile trace element records of sediments of core NS93-5: Implication for terrestrial input variation. *Geochimica*, 2001, 46(3): 208-215. [韦刚健, 陈毓蔚, 李献华, 等. NS93-5 钻孔沉积物不活泼微量元素记录与陆源输入变化探讨. *地球化学*, 2001, 46(3): 208-215.]
- [47] Jing Bingfu, Lin Zhenhong, Ji Fuwu. Interpretation of element geochemical records of marine sedimentary environment and provenance. *Advances in Marine Science*, 2003, 21(1): 99-106. [金秉福, 林振宏, 季福武. 海洋沉积环境和物源的元素地球化学记录释读. *海洋科学进展*, 2003, 21(1): 99-106.]
- [48] Zhao Yiyang, Wu Mingcai, Li Anchun, et al. Geochemistry of muds along the coast of china and their significance. *Geology in China*, 2002, 29(2): 181-185. [赵一阳, 鄢明才, 李安春, 等. 中国近海沿岸泥的地球化学特征及其指示意义. *中国地质*, 2002, 29(2): 181-185.]
- [49] Zhao Y Y, Park Y A, Qin Y S, et al. Material source for the eastern Yellow Sea mud: Evidence of mineralogy and geochemistry from China-Korea joint investigations. *The Yellow Sea*, 2001, 7(1): 22-26.
- [50] Wang Ying. *Radiation Sand Ridges in Continental Shelf of the Yellow Sea*. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 433. [王颖. *黄海陆架辐射沙脊群*. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 433.]
- [51] Yang Shouye, Li Congxian. Characteristic element compositions of the Yangtze and the Yellow river sediments and their geological background. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(2): 19-26. [杨守业, 李从先. 长江与黄河沉积物元素组成及地质背景. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(2): 19-26.]
- [52] Xu Gang. Analysis of sedimentary characteristics and provenance of surficial sediments on the west south Yellow Sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010: 41, 89. [徐刚. 南黄海西部陆架区底质沉积物沉积特征与物源分析 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010: 41, 89.]
- [53] Zhang Yunfeng. Sedimentary characteristics and sediment source of tidal flat under the influence of human activities at Qidong Foreland, the Yangtze Estuary [D]. Nanjing: Nanjing University, 2015: 38-42. [张云峰. 现代人类活动影响下长江口启东嘴潮滩沉积特征与物质来源变化[D]. 南京: 南京大学, 2015: 38-42.]
- [54] Shen Huanting, Mao Zhichang, Zhu Jianrong. *Saltwater Intrusion in the Changjiang Estuary*. Beijing: China Ocean Press, 2003. [沈煊庭, 茅志昌, 朱建荣. *长江河口盐水入侵*. 北京: 海洋出版社, 2003.]
- [55] Zhang Jingyi, Huang Zhiliang, Hu Zhenyun. Effect of the reclamation project on the north branch of Yangtze River estuary. *The Ocean Engineering*, 2007, 25(2): 72-77. [张静怡, 黄志良, 胡震云. 围涂对长江口北支河势影响分析. *海洋工程*, 2007, 25(2): 72-77.]

- [56] Liu Xi, Yang Lijun, Xu Junjie, et al. The evolution of the north branch of Yangtze River Estuary characterized by being narrower and shallower. *Shanghai Geology*, 2010, 31(3): 35-40. [刘曦, 杨丽君, 徐俊杰, 等. 长江口北支水道萎缩淤浅分析. *上海地质*, 2010, 31(3): 35-40.]
- [57] Li S H, Yun C X. Coastal current systems and the movement and expansion of suspended sediment from Changjiang River Estuary. *Marine Science Bulletin*, 2006, 8(1): 22-33.
- [58] Wei Qinsheng, Yu Zhigang, Ran Xiangbin. Characteristics of the western coastal current of the Yellow Sea and its impacts on material transportation. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(2): 145-156. [韦钦胜, 于志刚, 冉祥滨, 等. 黄海西部沿岸流系特征分析及其对物质输运的影响. *地球科学进展*, 2011, 26(2): 145-156.]
- [59] Liao Qiyu, Guo Binghuo, Liu Zanpei. Analysis of direction change mechanism of the Changjiang River diluted water in summer. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohaisas*, 2001, 19(3): 19-25. [廖启煜, 郭炳火, 刘赞沛. 夏季长江冲淡水转向机制分析. *黄渤海海洋*, 2001, 19(3): 19-25.]
- [60] Lin Kui, Tang Yuxiang, Guo Binghuo. An analysis on observational surface and upper layer current in the Huanghai Sea and the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(2): 9-19. [林葵, 汤毓祥, 郭炳火. 黄海、东海表、上层实测流分析. *海洋学报*, 2002, 24(2): 9-19.]
- [61] Zhang Weiyang, Zhang Xiaoyu, Jin Haiyan, et al. Dynamic sedimentary environment and the provenance characteristics in Yangtze River Estuary-Hangzhou Bay and its adjacent waters. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 640-650. [章伟艳, 张霄宇, 金海燕, 等. 长江口—杭州湾及其邻近海域沉积动力环境及物源分析. *地理学报*, 2013, 68(5): 640-650.]
- [62] Zhou Liangyong, Chen Bin, Liu Jian, et al. Observation of currents and suspended sediment concentration off northern Jiangsu coast, China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009(6): 21-28. [周良勇, 陈斌, 刘健, 等. 江苏废黄河口外夏季悬浮泥沙运动. *海洋地质与第四纪地质*, 2009(6): 21-28.]
- [63] Wu Shuliang, Cai Zejian. Remote sensing analysis of evolution of coastal sandbanks and tidal channels in Jiangsu. *Marine Geology Letters*, 2002, 18(6): 1-5. [吴曙亮, 蔡则健. 江苏省沿海沙洲及潮汐水道演变的遥感分析. *海洋地质动态*, 2002, 18(6): 1-5.]
- [64] Chen Kefeng, Lu Peidong, Wang Yanhong, et al. Hydrodynamic mechanism of evolvement trends in radial sandbank of South Yellow Sea, China. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 267-273. [陈可锋, 陆培东, 王艳红, 等. 南黄海辐射沙洲趋势性演变的动力机制分析. *水科学进展*, 2010, 21(2): 267-273.]
- [65] Meng Yi, Cheng Jiang. The atrophy of the estuarine north branch of the Yangtze River (Changjiang River). *Marine Geology Letters*, 2005, 21(1): 1-10. [孟翊, 程江. 长江口北支入海河段的衰退机制. *海洋地质动态*, 2005, 21(1): 1-10.]
- [66] Hu Jing, Chen Shenliang, Gu Guochuan. An approach to water and sediment diversion ratios and transports in the Changjiang river estuary area. *Coastal Engineering*, 2007, 26(2): 1-10. [胡静, 陈沈良, 谷国传. 长江河口泥沙分流和输移的探讨. *海岸工程*, 2007, 26(2): 1-10.]
- [67] Dai S B, Lu X X. Sediment load change in the Yangtze River (Changjiang): A review. *Geomorphology*, 2014, 215(1): 60-73.
- [68] Wang R S, Yang S L, Luo X X, et al. Morphological evolution and human activities impacts at the mouth area of the North Branch, Yangtze Estuary, during the recent three decades. *Ferroelectrics*, 2015, 335 (1): 113-118.

The sediment sources and quantitative evaluation of tidal flat at Qidong foreland, the Yangtze Estuary in recent 100 years

ZHANG Yunfeng¹, ZHANG Zhenke², REN Hang², GAO Lei³, DING Haiyan¹

(1. Research Institute of Jiangsu Coastal Development, Yancheng Teachers University, Yancheng 224007, Jiangsu, China; 2. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Nanjing Institute of Geography & Limnology, CAS, Nanjing 210008, China)

Abstract: The transport of sediment by rivers to the oceans plays an important role in coastal stabilization. The Qidong foreland is located on the junction between Yangtze Estuary and Jiangsu coast, where strong land-ocean interactions are highly sensitive to environmental changes. In order to examine sediment sources and change, QDZ-1 core sediments were collected at Qidong foreland tidal flat. And the content of micro-elements was analyzed by ICP-MS, further, the source-indicating significance of micro-elements was discussed based on distribution and enrichment coefficient. The result showed that sediment sources derive from the Yangtze River and the south Yellow Sea. In addition, sediment sources were quantitatively evaluated by estimation of sedimentary end-members. The result showed that sediment sources could be divided into three stages. The sediment flew mainly from the sediment transport of the Yangtze River into the sea, with the contribution rate being 68.1%. Then, the contribution rate gradually decreased with the decline of the North Branch, down to 38.5% during the period of 1930-1972, and to 17.5% after 1972. Meanwhile, the suspended sediments from southern Yellow Sea moved mainly to the south by strong tide and Subei coastal current, and the contribution rate was 27.1% before 1930. Subsequently, the contribution rate gradually increased, up to 55.6% during the period of 1930-1972, and to 75.9% after 1972. The sediment sources of Qidong foreland tide flat mainly transformed from the Yangtze sediment to the south Yellow Sea sediment. The changes in stages of sediment source were consistent with the decline of the North Branch.

Keywords: Yangtze estuary; Qidong foreland tide flat; sediment sources; environmental significance; quantitative evaluation