

杭州湾潮滩沉积物黏土矿物空间差异与物源指示

席雅娟 师育新 戴雪荣 刘朝 吴紫阳

(华东师范大学地理科学学院 上海 200241)

摘要 通过对杭州湾潮滩沉积物中主要黏土矿物成分及组合类型的研究,分析了杭州湾潮滩沉积物黏土矿物的空间分布特征。借助聚类分析等手段,同时结合杭州湾水动力特征,探讨了研究区黏土矿物的来源和成因。研究结果表明,杭州湾潮滩表层沉积物主要为黏土质粉砂,其余为砂质粉砂。本区沉积物黏土矿物成分复杂,主要为伊利石,其次是高岭石和绿泥石;还有少量蒙皂石和蛭石及1.4 nm 过渡矿物。根据其相对含量可分为3种组合类型:Ⅰ型为伊利石—高岭石—绿泥石—蛭石类—蒙皂石型,Ⅱ型为伊利石—绿泥石—高岭石—蒙皂石—蛭石类型,Ⅲ型为伊利石—高岭石—绿泥石—蒙皂石—蛭石类型。在空间上,北岸的蒙皂石和绿泥石平均含量高于南岸,而伊利石、高岭石和蛭石(含1.4 nm 过渡矿物)平均含量则低于南岸。高潮滩和中潮滩黏土矿物对比,除了蒙皂石含量高潮滩大于中潮滩外,其他矿物含量均无明显规律。表层沉积物黏土矿物的分布特征与水动力条件和物质来源密切相关,杭州湾北岸乍浦以东潮滩受潮流和长江沿岸流影响明显,沉积物主要为长江和东海源的;南岸由于曹娥江和甬江两条河流的注入,流域物质所占比例明显比北岸高。柱状岩芯样品中各黏土矿物含量自下而上的变化则反映了物源区风化强度的波动特征。

关键词 杭州湾 潮滩沉积物 黏土矿物 物源

第一作者简介 席雅娟 女 1991年出生 硕士 自然地理学 E-mail: juanyx_2013@126.com

通讯作者 师育新 女 副教授 E-mail: yxshi@geo.ecnu.edu.cn

中图分类号 P736.21 **文献标识码** A

0 引言

杭州湾是钱塘江河口区的口外海滨部分,是我国东部沿海地区陆地和海洋相互作用较为强烈的一个区域。作为世界著名的强侵蚀型河口,杭州湾的沉积作用和泥沙来源都较长江、黄河和珠江等堆积型河口更为复杂,而对钱塘江河口区沉积作用和物源的研究程度却比后者低。许多学者对杭州湾潮滩表层沉积物粒度分布及沉积动力环境做了较为深入的研究^[1-8],也有学者通过特征矿物及组合、元素地球化学及主要组合分析等^[9-11]方法来识别杭州湾泥沙来源和运移途径,取得了许多进展。但由于杭州湾独特的地理环境和复杂的水动力条件,给物源判断带来一定的困难。黏土矿物是组成细颗粒沉积物的主要矿物成分,作为母岩风化作用的产物,它们广泛分布于地表,是河流细颗粒沉积物的主要来源。因此河流沉积物中黏土矿物的研究被广泛应用于流域风化作用表征和追踪物源^[12-15]。杭州湾沉积物多为粉砂质沉积,中部富含黏土^[10],含有丰富的黏土矿物。本文通

过对杭州湾潮滩沉积物中主要黏土矿物成分及组合类型的研究,分析了杭州湾黏土矿物的空间分布特征,借助聚类分析等手段,同时结合杭州湾水动力特征,探讨了黏土矿物的来源。这将有助于加深对杭州湾潮滩沉积物物质来源、沉积动力等问题的认识。

1 研究区概况

杭州湾位于钱塘江入海口,西起浙江省海盐县澉浦镇和余姚、慈溪交界处的西三闸断面,东至芦潮港—宁波镇海连线,与舟山、北仑港海域为邻^[5](图1)。本文的研究范围北岸西起尖山附近,向东经澉浦、海盐、乍浦、金山直至芦潮港南;南岸西起上虞区沥海镇,向东经庵东至宁波镇海。杭州湾地质构造上处于西北部印支褶皱带与东南部中生代闽浙火山岩带交接部位,并有走向东西的萧山—镇海断裂和走向北东的萧山—奉贤断裂夹峙,第四纪全区发育海相、湖沼相沉积,全新统上部海相粉砂质黏土组成平原海岸,局部地段由火山岩、花岗斑岩构成基岩海岸。

受特殊的地形及地理位置影响,杭州湾及其邻近

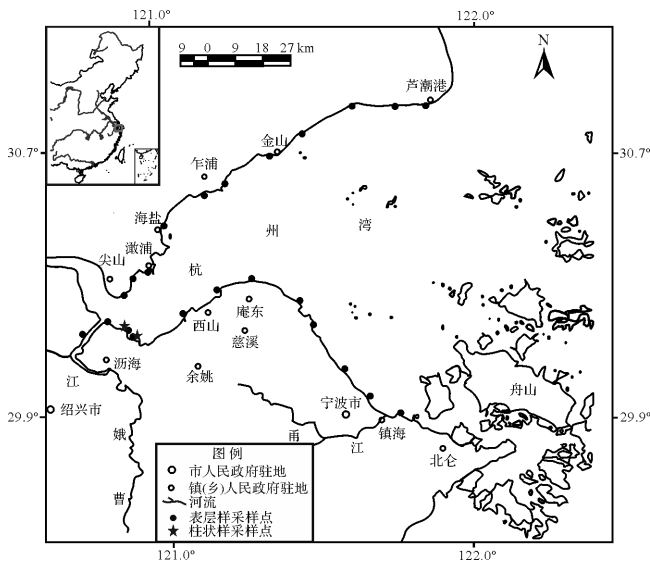


图1 研究区及采样点分布图

Fig.1 Study area and distribution of sampling sites

海域水力条件多元化,包括钱塘江径流、涨落往复潮流,还有长江沿岸流及余流等,但以潮流作用为主,属强潮型河口海湾。一日4次的涨、落潮受杭州湾地貌影响显著,湾口向内随着宽度变窄,水深逐渐变浅,潮波内托,潮位逐步抬高,高低潮相差较大,澉浦最大潮差可达8.93 m。由于北岸水下深槽逼岸,南岸水浅滩宽,使得南岸高潮位低于北岸,低潮位高于北岸,潮差比北岸小。杭州湾潮流属往复流,北岸涨潮流为南西向,南岸为北西方向,落潮时北岸流向为北东向,南岸为南东方向,海口外潮流进入杭州湾后合流的主流线沿北岸运移。潮波传播速度由于北岸水深、岛屿少,速度比南岸快,与潮差增大同步加速,乍浦附近是涨、落潮速度最快地区。杭州湾北岸涨潮流速大于落潮流速,南岸湾口处落潮流速大于涨潮流速^[16-17]。已有研究显示^[18],杭州湾泥沙搬运、沉积的主要动力是潮流,波浪在泥沙搬运中起着次要作用。

2 材料与方法

2.1 野外采样

根据研究区地形地貌特征、物质来源及搬运的水动力条件,于2013年11月在杭州湾北岸和南岸采集了42个样品,其中潮滩表层沉积物样37个(高潮滩沉积物21个、中潮滩沉积物16个)、柱状沉积物样品5个(图1)。同时在钱塘江8个主要支流(入干流)的河口区(各1个)和长江河口(7个)采集沉积物样品,以便探讨杭州湾潮滩表层沉积物的来源。

2.2 实验分析

(1) 粒度分析:称取样品0.06~0.1 g,置于100 mL烧杯中;先加入足量的浓度为30%的 H_2O_2 除去有机质,然后加入10 mL浓度为2%的稀盐酸除去碳酸钙,再加入10 mL浓度为2%的六偏磷酸钠,超震15 min分散,静置12 h后于测试前再次超震分散。测试仪器为LS13320型激光粒度仪,量程范围0.017~2 000 μm ,分析误差为 $\pm 0.5\%$ 。

(2) 黏土矿物分析:将采集来的样品自然风干后,称取10 g,先用过氧化氢除去其中的有机质,再根据Stocks沉降规律,从沉积物中提取出粒径小于2 μm 的黏土粒级部分,分别制成自然定向片(N)、乙二醇饱和片(EG)、钾饱和片(K)和高温加热片(H),测试仪器为PANalytical(原Philips)X'Pert.Pro MPD型X射线衍射仪。实验条件为:CuK α 辐射,电压40 kV,电流30 mA,扫描范围 $3^\circ \sim 35^\circ$,扫描速度 $0.057^\circ/s$ 。

黏土矿物鉴定和解释主要依据4种测试条件获得的XRD图谱的综合对比分析^[19-20](图2)。如图2b所示,自然图谱中主要有1.42 nm、1.0 nm、0.7 nm、0.5 nm、0.47 nm、0.358 nm、0.353 nm和0.33 nm几种衍射峰,同自然曲线相比较,经过550 $^\circ C$ 加热2 h后,1.4 nm衍射峰减弱、1.0 nm衍射峰增强,并出现1.2 nm峰,表明有绿泥石和蛭石及1.4 nm过渡矿物的存在;同时,0.7 nm、0.358 nm衍射峰几乎消失,指示高岭石的存在。钾饱和曲线和乙二醇曲线相比,1.0 nm衍射峰和1.4 nm衍射峰变化不明显,说明蛭石较少。乙二醇曲线同自然曲线相比较,出现1.7 nm衍射峰,而1.4 nm衍射峰减弱,指示蒙皂石的存在。

由于在自然片衍射图谱上,绿泥石、蛭石和1.4 nm过渡矿物(绿泥石和蛭石的间层矿物)均具有1.4 nm衍射峰,所以将它们统称为1.4 nm矿物。对于伊利石、高岭石、蒙皂石和1.4 nm矿物(绿泥石和蛭石类)的半定量分析,采用Biscaye(1965)的方法,使用乙二醇饱和片上(001)晶面衍射峰的面积比,蒙皂石采用1.7 nm衍射峰,伊利石采用1.0 nm衍射峰,1.4 nm矿物+高岭石使用0.7 nm衍射峰,权重系数分别为1,4,2。高岭石和1.4 nm矿物的分离是使用0.358 nm和0.353 nm衍射峰的面积比^[21]。然后根据高温片和乙二醇片上1.4 nm峰的变化对绿泥石以及蛭石和1.4 nm过渡矿物含量进行了估算。其中蛭石和1.4 nm过渡矿物目前暂无法分开定量,所以在以下有关的分析中把它们归为蛭石类。

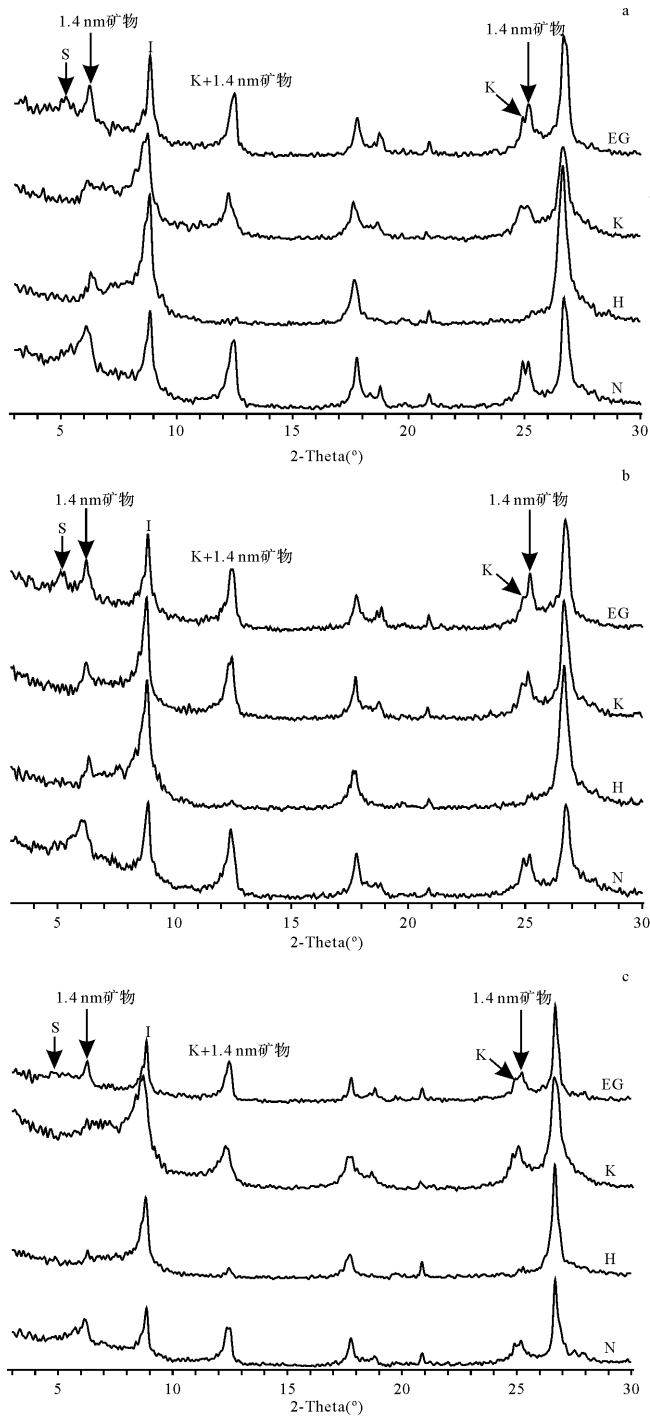


图 2 杭州湾潮滩沉积物典型黏土矿物衍射图谱 (S, I, K 分别代表蒙皂石、伊利石、高岭石)

Fig.2 Different XRD patterns of clay minerals of intertidal sediments in Hangzhou Bay (S, I, K, representing Smectite, Illite, Kaolinite, respectively)

3 结果与讨论

3.1 杭州湾潮滩表层沉积物粒度特征

粒度分析结果显示,杭州湾潮滩表层沉积物以粉

砂(4~63 μm)为主,其次是黏土(<4 μm),砂(>63 μm)含量较低(表 1)。属于黏土质粉砂(占 91.9%)和砂质粉砂(占 8.1%)。无论南岸还是北岸,中潮滩沉积物与高潮滩相比,黏土含量降低,粉砂和砂含量升高,平均粒径和中值粒径增大(表 1)。

表 1 杭州湾潮滩表层沉积物粒度组成

Table 1 Grain-size composition of surficial intertidal sediments in Hangzhou Bay

采样位置		黏土	粉砂	砂	平均粒径	中值粒径
		/%	/%	/%	/μm	/μm
北岸	高潮滩	25.56	67.30	7.14	9.82	10.60
	中潮滩	16.83	68.44	14.73	18.58	19.64
	平均	21.93	67.80	10.30	12.87	14.18
南岸	高潮滩	24.55	71.35	4.10	11.13	14.18
	中潮滩	18.48	76.08	5.44	14.78	19.92
	平均	22.28	73.12	4.60	12.34	16.18
杭州湾平均		22.07	69.98	7.96	12.69	14.99

3.2 杭州湾潮滩表层沉积物黏土矿物组合特征

黏土矿物(<2 μm 部分)XRD 图谱分析结果显示,所有样品中都含有伊利石(I)、高岭石(K)、绿泥石(Ch)、蛭石(V)及 1.4nm 过渡矿物(HIV)和蒙皂石(S)。半定量结果显示(表 2):杭州湾潮滩表层沉积物中,伊利石含量为 59.4%~69.8%,平均 65.7%;高岭石含量为 9.3%~21.8%,平均 13.6%;绿泥石 5.6%~20.3%,平均值 11.9%;蛭石(包含 1.4 nm 过渡矿物)含量较低,除个别样品外均小于 10.0%,平均仅 3.8%。蒙皂石最大值 11.4%,平均 5.1%。

研究区黏土矿物依据相对含量由高到低,可以划分为以下三种组合类型: I 型(图 2a):伊利石—高岭石—绿泥石—蛭石类—蒙皂石; II 型(图 2b):伊利石—绿泥石—高岭石—蒙皂石—蛭石类; III 型(图 2c):伊利石—高岭石—绿泥石—蒙皂石—蛭石类。其中杭州湾潮滩表层沉积物出现 I 型组合 14 例, II 型组合 11 例, III 型组合 12 例(表 2)。

3.3 南、北岸潮滩表层沉积物黏土矿物空间分布特征及成因探讨

在含量上,北岸沉积物的蒙皂石和绿泥石平均含量高于南岸,而伊利石、高岭石和蛭石(含 1.4 nm 过渡矿物)平均含量低于南岸(表 2)。

在组合类型上,北岸沉积物 3 种组合类型数量相当, I、II、III 型组合分别为 6 例、8 例和 7 例。南岸沉积物以 I 型组合为主,为 8 例;其次是 III 型组合 5 例; II 型组合为 3 例。

表2 杭州湾潮滩表层沉积物样品黏土矿物组合特征

Table 2 The features of clay mineral assemblages of surficial intertidal sediments in Hangzhou Bay

采样位置	样品号	地理坐标	<2 μm /%	黏土矿物含量 /%					组合 类型	1.4 nm	I/K	
				S	I	K	V+HIV	Ch				
北岸高潮滩	HL01a	30°18.439'N 120°49.172'E	13.4	5.1	67.1	16.8	5.5	5.6	I	11.0	4.0	
	HL02a	30°19.840'N 120°51.252'E	14.4	5.2	67.2	12.1	7.2	8.3	I	15.4	5.5	
	HL03a	30°22.383'N 120°54.200'E	17.1	9.0	63.1	11.4	4.6	11.9	II	16.6	5.6	
	HL04a	30°30.335'N 120°56.873'E	17.3	6.4	67.2	11.0	4.9	10.5	III	15.4	6.1	
	HL05a	30°38.137'N 121° 9.554'E	15.8	4.7	66.8	13.6	4.7	10.2	I	14.9	4.9	
	HL06a	30°40.033'N 121°14.619'E	22.2	1.1	68.4	14.0	3.8	12.7	I	16.5	4.9	
	HL07a	30°42.244'N 121°20.114'E	19.5	3.9	67.2	14.0	3.4	11.5	III	14.9	4.8	
	HL08a	30°46.213'N 121°25.730'E	14.0	10.7	62.6	13.2	2.1	11.3	III	13.4	5.8	
	HL09a	30°50.288'N 121°36.871'E	11.5	6.7	65.1	12.9	0.0	15.4	II	15.4	5.0	
	HL10a	30°51.006'N 121°44.044'E	13.8	4.4	66.8	12.4	0.0	16.4	II	16.4	5.4	
	HL11a	30°50.861'N 121°50.382'E	15.5	3.3	69.3	12.0	0.0	15.4	II	15.4	5.8	
北岸中潮滩	HL01b	30°18.439'N 120°49.172'E	8.1	5.2	65.7	17.7	5.2	6.2	I	11.4	3.7	
	HL02b	30°19.840'N 120°51.252'E	8.0	4.1	65.3	13.4	7.9	9.3	I	17.2	4.9	
	HL03b	30°22.383'N 120°54.200'E	10.8	1.3	67.9	9.3	1.1	20.3	II	21.4	7.3	
	HL04b	30°30.335'N 120°56.873'E	13.4	5.1	62.8	15.0	4.4	12.8	III	17.2	4.2	
	HL06b	30°40.033'N 121°14.619'E	9.1	4.3	63.2	14.0	3.0	15.4	II	19.7	4.5	
	HL07b	30°42.244'N 121°20.114'E	3.9	11.4	59.4	12.8	4.9	11.5	III	16.3	4.7	
	HL08b	30°46.213'N 121°25.730'E	14.1	3.3	61.7	21.8	2.1	11.1	III	13.2	2.8	
	HL09b	30°50.288'N 121°36.871'E	15.3	5.4	62.8	12.9	1.4	17.6	II	18.9	4.9	
	HL10b	30°51.006'N 121°44.044'E	12.4	8.3	65.5	12.1	1.1	13.1	II	14.2	5.4	
	HL11b	30°50.861'N 121°50.382'E	11.6	2.7	69.3	13.4	1.7	12.9	III	14.6	5.2	
	南岸高潮滩	HR01a	30°13.523'N 120°45.204'E	7.7	5.3	65.1	12.3	8.1	9.2	I	17.3	5.3
HR03a		30°12.403'N 120°54.545'E	7.4	5.4	63.9	16.0	6.4	8.3	I	14.7	4.0	
HR04a		30°16.783'N 121°02.039'E	10.3	4.1	66.8	14.8	4.2	10.1	I	14.3	4.5	
HR05a		30°20.106'N 121°06.551'E	7.8	5.4	66.8	13.1	3.7	11.0	III	14.7	5.1	
HR06a		30°22.130'N 121°15.428'E	12.7	8.8	64.0	12.7	0.3	14.1	II	14.4	5.0	
HR07a		30°17.649'N 121°26.389'E	13.9	7.4	62.8	14.6	2.4	12.8	III	15.2	4.3	
HR08a		30°13.178'N 121°31.081'E	22.9	3.9	66.1	14.2	1.7	14.1	III	15.8	4.7	
HR09a		30°06.655'N 121°35.738'E	24.3	4.2	69.7	11.0	3.5	11.5	II	15.0	6.3	
HR10a		30°02.335'N 121°39.948'E	15.9	7.3	66.2	13.2	2.2	11.1	III	13.3	5.0	
HR11a		29°58.265'N 121°46.615'E	16.0	8.1	66.2	12.1	0.0	13.7	II	13.7	5.5	
南岸中潮滩		HR01b	30°13.523'N 120°45.204'E	6.1	0.0	66.5	13.3	10.0	10.2	I	20.1	5.0
	HR02b	30°12.673'N 120°52.614'E	8.0	3.0	65.3	16.3	7.3	8.1	I	15.4	4.0	
	HR03b	30°12.403'N 120°54.545'E	6.6	2.0	69.8	12.8	6.6	8.9	I	15.4	5.4	
	HR05b	30°20.106'N 121°06.551'E	7.0	3.2	68.1	14.4	4.5	9.8	I	14.3	4.7	
	HR09b	30°06.655'N 121°35.738'E	20.4	0.0	67.0	14.4	4.4	14.1	I	18.9	4.7	
	HR11b	29°58.265'N 121°46.615'E	18.5	6.8	62.8	14.3	2.4	13.7	III	16.1	4.4	
	北岸	高潮滩平均		15.9	5.7	66.4	12.8	3.3	11.7		15.0	5.3
		中潮滩平均		10.7	5.0	64.4	14.2	3.5	12.9		16.4	4.8
		平均		13.3	5.4	65.4	13.5	3.4	12.3		14.6	5.2
	南岸	高潮滩平均		13.9	6.0	65.8	13.4	3.3	11.6		14.8	5.0
		中潮滩平均		11.1	2.5	66.6	14.2	5.9	10.8		16.7	4.7
平均			12.5	4.7	66.1	13.7	4.3	11.3		15.5	4.9	
杭州湾平均			12.9	5.1	65.7	13.6	3.8	11.9		16.1	4.4	

表 3 钱塘江流域、长江口及东海近岸表层沉积物黏土矿物的相对含量 (%)

Table 3 Relative content of clay minerals in surfacial sediments in Qiantang river basin, Yangtze river mouth and nearshore region of East China Sea

位置	采样点	S	I	K	Ch	V+HIV	I/K	来源
钱塘江流域	新安江口	0.5	67.2	16.0	6.2	10.1	3.5	本文
	兰江口	1.9	65.9	13.5	5.8	12.8	4.9	
	分水江口	1.5	61.3	21.0	6.7	9.4	2.9	
	渚渚江口	2.2	67.2	11.9	8.0	10.8	5.6	
	胡源江口	6.0	67.3	10.5	7.7	8.5	6.4	
	钱江陵园	2.7	56.1	19.7	7.2	14.4	2.8	
	浦阳江口	4.2	58.7	16.6	11.4	9.1	3.5	
东海近岸表层	曹娥江口	11.0	59.3	14.0	7.6	8.1	4.2	朱凤冠等,1984
	5259	6.5	72.4	10.6	10.6		6.8	
	5168	6.3	72.1	11	10.7		6.6	
	6652	5.5	71.9	11	11.3		6.5	
	DEB5	1	73	10	16		7.3	
长江口	DEB6	0	83	7	10		11.9	林承坤,1992 本文
		6.4	76.2	8.7	8.7		8.8	
	yz01	6.3	63.7	13.7	16.2			
	yz02	3.9	66.5	11.4	18.2			
	yz03	5.5	65.6	13.6	15.3			
	yz04	3.6	63.7	15.0	17.6			
	yz05	10.1	61.6	13.4	15.0			
	yz06	9.0	61.7	14.1	15.2			
	yz07	6.6	62.0	14.4	17.1			
		6.6	70.8	9.4	13.2		12.1	
长江下游		10	65	14	11		4.6	杨作升,1988
	N2	3.8	66.6	14.9	14.7		4.5	徐琳,2008
	N3	1.7	68.3	12.4	17.6		5.5	
长江口平均		1.8	66.1	15.3	16.8		4.3	何梦颖等,2011
长江口平均		4.6	69.3	14.2	11.9		4.5	师育新等,2010

杭州湾上游承接钱塘江来水,还有曹娥江和南部甬江的注入;北侧与长江口相邻,长江径流所挟带的物质由于柯氏力作用沿东滩岸线由北向南输运,并沿岸向西偏南运移,对杭州湾的形成和演化起着重要作用;东侧注入东海,受控于强烈的潮流作用;沉积物具有多元化的来源。为了分析杭州湾黏土矿物的成因和来源,将钱塘江主要支流沉积物、长江口沉积物、东海陆架沉积物作为潜在物源,与研究区沉积物黏土矿物进行对比分析。选择高岭石、伊利石+蒙皂石、1.4 nm 矿物(绿泥石+蛭石+1.4 nm 过渡矿物)这三种组分,将杭州湾沉积物及其上述潜在物源的黏土矿物成分(表 2 和表 3 全部数据)做三角图进行对比(图 3),结果显示,3 种潜在物源的黏土矿物在该图上可明显的区分开来,这充分说明黏土矿物对物源的指示意义。由图 3 看出,杭州湾样品分布介于钱塘江和长江口以及东海陆架三种沉积物之间,其中大部分与长江口沉积物分布区相近。

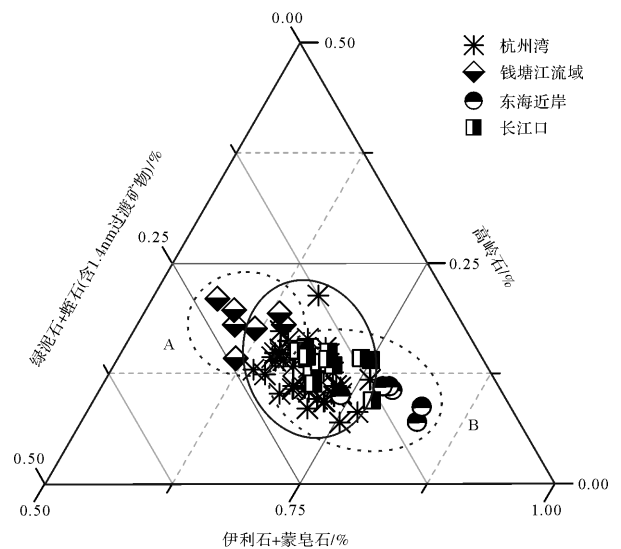


图 3 杭州湾潮滩表层沉积物黏土矿物组成与钱塘江流域支流口、长江口、东海近岸黏土矿物组成的对比
Fig.3 Comparison among clay mineral assemblages of surficial sediments in tidal flat of Hangzhou Bay and those in upstream river mouth of Qiantang river Basin, Yangtze river mouth and nearshore region of East China Sea

接着利用数学统计方法对杭州湾潮滩沉积物黏土矿物的数值特征作进一步分析。采用四种主要黏土矿物相对含量(为便于与前人数据比较,将绿泥石和蛭石以及 1.4 nm 过渡矿物统一算作 1.4 nm 矿物),以各沉积物样品为样本对研究区沉积物分类,分类方法采取快速聚类分析。

在对研究区沉积物样品进行分类前,先对表 3 所列的沉积物的四种黏土矿物相对含量进行探索性分析,以求找到一种相对恰当的分析方案。比较多次统计的结果,最终选择以四种黏土矿物相对含量为因变量,进行快速聚类分析。结果显示所有钱塘江流域支流沉积物归为一类(A类),而长江口和东海近岸沉积物除个别样品外均归为一类(B类)。

然后将杭州湾黏土矿物样品(表 2)与其潜在物源样品(表 3)共同进行快速聚类分析。结果显示,研究区沉积物样本被分别归入上述 A 和 B 两种类别之中。其中,A类沉积物以伊利石—高岭石—绿泥石—

蛭石类—蒙皂石型组合为主,是钱塘江流域源的物质,它们在研究区主要分布在杭州湾南岸潮滩,占 81%,北岸中潮滩也有分布。B类沉积物主要为伊利石—绿泥石—高岭石—蒙皂石—蛭石类型和伊利石—高岭石—绿泥石—蒙皂石—蛭石类型黏土矿物组合,是长江口和东海源的物质,它们在研究区分布较广,占研究区全部样品的 60.6%,其中大部分在北岸,占 84.2%,其余在南岸高潮滩。将各样品黏土矿物聚类结果标在图 4 上,可以看出,北岸从乍浦以东向海部分的区域全部为 B 类;乍浦以西至尖山附近,高潮滩全部是 B 类,中潮滩主要为 A 类,而南岸则以 A 类为主。

杭州湾沉积物的来源受钱塘江径流,东海涨、落潮流,长江沿岸流的共同影响(图 4)。对杭州湾沉积物的已有研究显示^[1,4],杭州湾海域来沙的主要来源,一部分是长江入海的悬浮泥沙随涨潮流直接进入杭州湾,另一部分则是长江口外水下三角洲堆积的泥

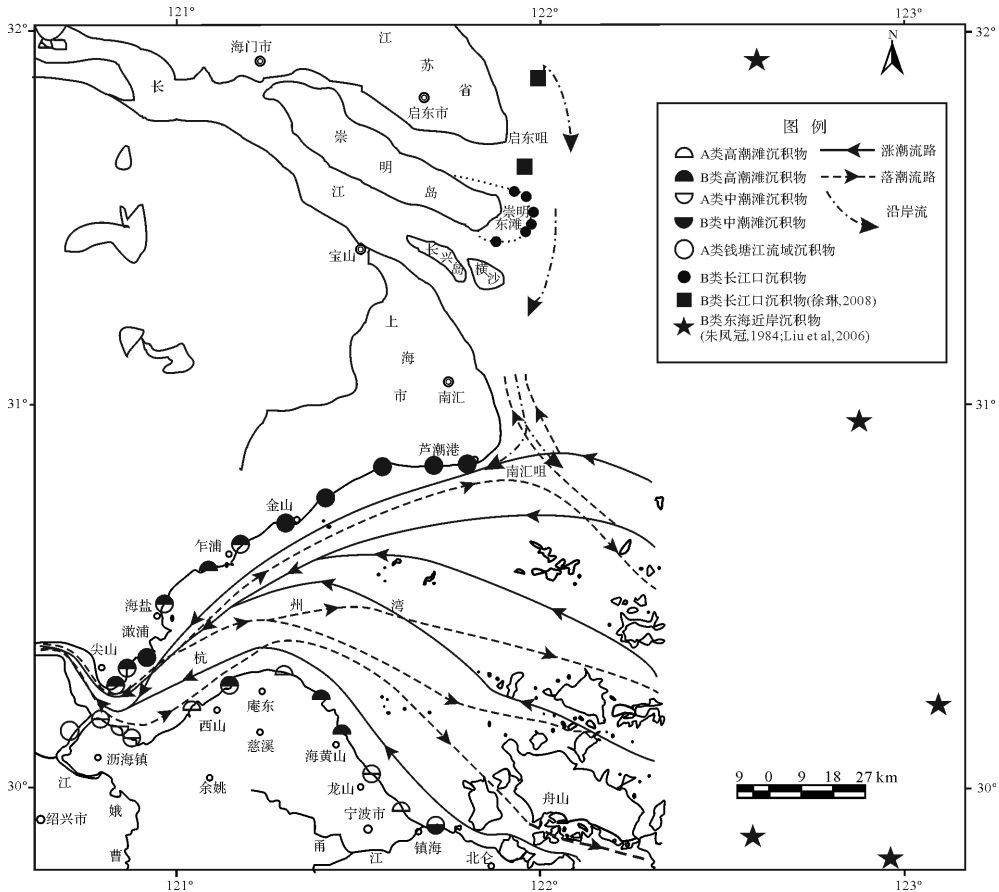


图 4 杭州湾潮滩表层沉积物以及长江口、东海近岸黏土矿物聚类分析结果图 (类别 A.类钱塘江河流沉积物;类别 B.类长江口、东海近岸沉积物)

Fig.4 The results of cluster analysis of surficial intertidal sediments of Hangzhou Bay (Type A, Qiantang Basin-like sediments; Type B, Yangtze river mouth and nearshore regions of East China Sea-like sediments)

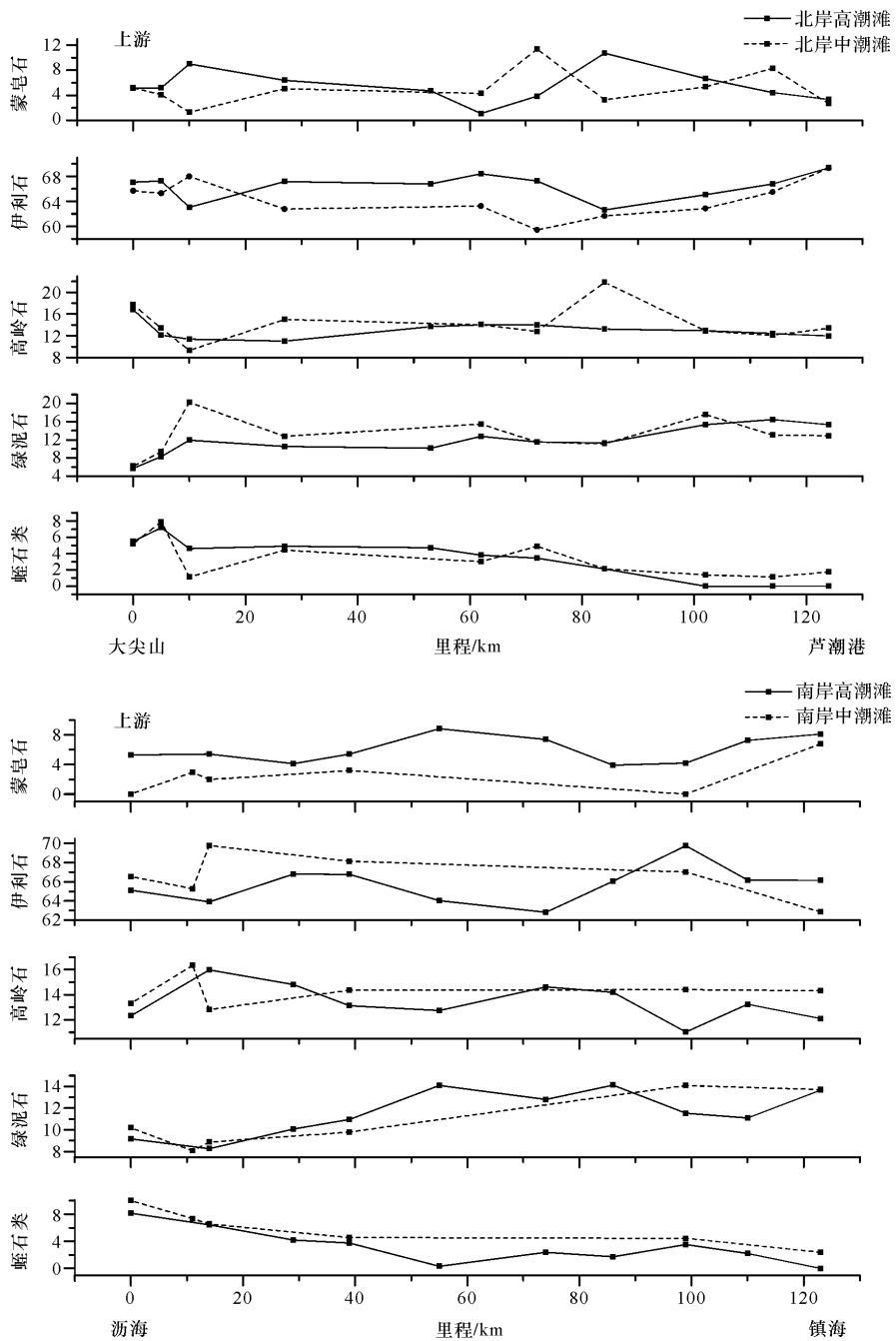


图 5 杭州湾高潮滩与中潮滩沉积物各黏土矿物对比

Fig.5 The comparison of clay mineral content between high intertidal sediments and middle intertidal sediments in Hangzhou Bay

沙,被掀动后随潮流进入杭州湾。本区涨潮流向基本上与落潮流向相反,从总体上看,湾内涨潮主流偏北,落潮主流偏南,湾顶附近有一近似于“∞”形的流路。由于强劲的长江沿岸流,乍浦以下的杭州湾及其北侧海域流场受长江径流影响明显,钱塘江径流则对乍浦以上的部分杭州湾水域流场有所影响^[5]。王昆山等^[10]通过杭州湾表层沉积物碎屑矿物分布和组合分区分析认为,长江径流所挟带的物质由于柯氏力作用

沿东滩岸线由北向南输运,并沿岸向西偏南运移,一直到杭州湾中部,俱为长江物质,向南到达杭州湾中部的崎岖列岛南部出现与钱塘江物质混合的现象。董永发^[22]通过对钱塘江河口区沉积物的重矿物分析,认为口外海滨的沉积物主要来自长江口。结合图 3 中杭州湾沉积物与长江口沉积物相似的结果以及杭州湾水动力特征,我们认为杭州湾 B 类(长江和东海源的)黏土矿物主要是长江输入东海的沉积物随

涨潮流和长江沿岸流带入的,特别是北岸乍浦以下的区域(图4),基本上都是长江源的,反映了长江泥沙扩散对杭州湾的影响。而南岸潮滩沉积物黏土矿物则既有A类(钱塘江流域源的),又有B类(长江和东海源的),而且A类多于B类。这是由于曹娥江和甬江两条河流直接注入杭州湾而带来的流域泥沙的影响。由此看出,杭州湾黏土矿物特征主要受物源和水动力条件的制约。

3.4 高潮滩与中潮滩表层沉积物黏土矿物组成特征及影响因素

高潮滩和中潮滩黏土矿物组成的对比显示(表2、图5)。除了蒙皂石含量高潮滩大于中潮滩外,其他矿物含量均无明显规律。

已有研究显示,不同粒径的沉积物其黏土矿物聚集程度不同。据古布斯^[23]在研究亚马逊河入海的各种黏土矿物粒径时指出,不同黏土矿物有一个主要粒径分布范围。蒙皂石的粒径最小从0.9 μm到0.1 μm,平均粒径约0.4 μm;高岭石具有中等粒径,从10~0.4 μm,平均在1~2 μm之间;伊利石在这三种矿物中分布最广,从砂级到0.4 μm,平均约2~4 μm。另外,有

研究表明^[23]绿泥石富集于大于2 μm 粒级中。

根据粒度分析结果,对<2 μm 粒级中各黏土矿物主要分布粒级的含量进行统计(表4)发现0.1~0.9 μm和0.4 μm(蒙皂石主要分布粒径)的含量高潮滩大于中潮滩,这与蒙皂石含量高潮滩大于中潮滩相一致,符合沉积分异的规律。而其他矿物所对应的粒级含量均无明显规律,也与黏土矿物含量变化相一致,看不出沉积分异的影响。因此,研究区沉积物的黏土矿物与粒度变化组成之间没有明显的关系。这可能与杭州湾特殊的地貌、复杂的水动力条件和多源的物质来源有关。

表4 杭州湾高、中潮滩沉积物特定粒级组成

Table 4 Certain grain size composition of high and middle intertidal sediments in Hangzhou Bay

采样位置	0.1~0.9	0.4	0.4~2	1~2	< 2
	μm/%	μm/%	μm/%	μm/%	μm/%
北岸 高潮滩	7.48	2.57	13.13	7.01	15.9
北岸 中潮滩	5.32	2.00	8.67	4.64	10.7
南岸 高潮滩	6.90	2.16	12.69	7.02	13.9
南岸 中潮滩	5.39	1.98	9.19	5.07	11.1

表5 杭州湾潮滩柱状样品黏土矿物组合特征

Table 5 Features of clay mineral assemblages of vertical section sediments of tidal flat in Hangzhou Bay

样品号	采样深度 /cm	黏土矿物含量/%					组合类型	I/K
		S	I	K	V+HIV	Ch		
HR02b	0	3.0	65.3	16.3	7.3	8.1	I	4.0
HR02m	15	4.7	66.9	10.7	5.7	11.9	II	6.3
HR02l	25	5.1	67.5	8.3	11.7	7.4	II	8.1
HR03b	0	2.0	69.8	12.8	6.6	8.9	I	5.4
HR03h	5	2.9	60.7	14.2	8.5	13.7	I	4.3
HR03m	15	3.1	64.4	12.8	7.4	12.2	I	5.0
HR03l	25	3.8	65.6	11.5	7.3	11.8	II	5.7

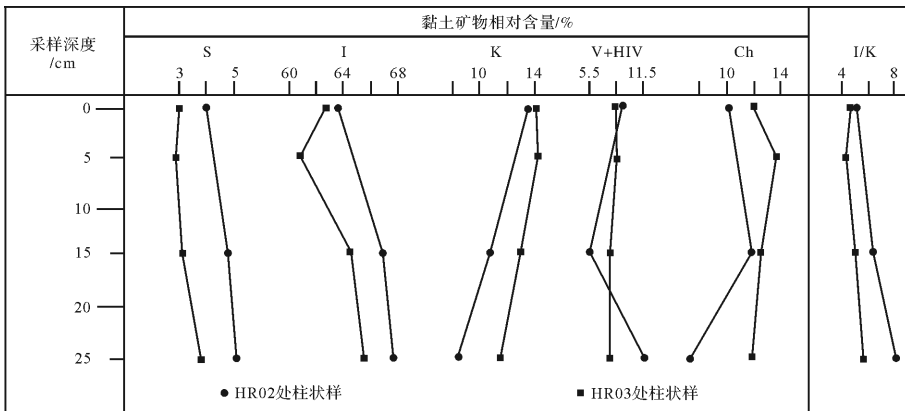


图6 杭州湾潮滩沉积物黏土矿物垂向变化曲线

Fig.6 The vertical variation curve of clay minerals of intertidal sediments in Hangzhou Bay

3.5 杭州湾潮滩沉积物黏土矿物的垂向变化

为了了解黏土矿物的垂向变化,在 HR02(上虞市滨海大道)和 HR03(嘉兴市海盐县)两个采样点采集了不同深度的剖面样品,并与表层样进行了对比。结果见表5和图6。

由表5和图6看出,自下而上,高岭石含量呈增加趋势,伊利石和蒙皂石含量呈减小趋势。伊利石和高岭石的比值自下而上呈减小的趋势。已有研究表明,沉积盆地中的黏土矿物主要是碎屑成因的,在物源区及其母岩不变的前提下,主要受源区风化作用的影响^[24-32]。因此,杭州湾潮滩沉积物黏土矿物垂向变化显示,物源区的风化作用有增强的趋势,间接反映了源区气候的变化。

4 结论

(1) 杭州湾潮滩表层沉积物主要为黏土质粉砂(占91.9%)和部分砂质粉砂(占8.1%),其黏土矿物成分比较复杂,主要有伊利石(平均65.7%),其次是高岭石(平均13.6%)和绿泥石(平均11.9%);还有少量蒙皂石(平均5.1%)和蛭石及其1.4nm过渡矿物(平均3.8%)。根据其含量和分布变化可分为3种组合类型:Ⅰ型为伊利石—高岭石—绿泥石—蛭石类—蒙皂石型,Ⅱ型为伊利石—绿泥石—高岭石—蒙皂石—蛭石类型,Ⅲ型为伊利石—高岭石—绿泥石—蒙皂石—蛭石类型。

(2) 在空间分布上,南岸和北岸表层样品存在一定差异。北岸潮滩沉积物中的蒙皂石和绿泥石平均含量高于南岸;而伊利石、高岭石、蛭石(含1.4nm过渡矿物)平均含量低于南岸。黏土矿物组合类型及分布特征表明,杭州湾潮滩沉积物的来源主要有两类:一类是钱塘江支流和南岸甬江带来的流域陆源侵蚀物质;另一类是湾口以外的海域物质,主要是长江口输出的泥沙随涨潮流进入杭州湾。加上强劲的长江沿岸流的影响,北岸乍浦以东的区域,沉积物主要为长江源的。南岸由于曹娥江和甬江两条河流的注入,使得径流带来的流域侵蚀物质所占比例明显比北岸高。受沉积分异的影响,高潮滩中蒙皂石含量高于中潮滩。黏土矿物在垂直方向上的变化,则反映了物源区风化强度的波动特征。

致谢 沈铭能高级实验师在实验过程中给予了帮助;研究生揭小娟、赵钦、郑洁等参与了部分采样与实验分析,在此一并致谢。

参考文献 (References)

- 1 赵建春,戴志军,李九发,等. 强潮海湾近岸表层沉积物时空分布特征及水动力响应——以杭州湾北岸为例[J]. 沉积学报, 2008, 26(6): 1043-1051. [Zhao Jianchun, Dai Zhijun, Li Jiufa, et al. Study on the characteristics of temporal and spatial changes in properties of surface sediment on near-shore seabed of strong-tide bay: A case from the north bank of Hangzhou Bay in Shanghai[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(6): 1043-1051.]
- 2 夏小明,杨辉,李炎,等. 长江口—杭州湾毗连海区的现代沉积速率[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 130-135. [Xia Xiaoming, Yang Hui, Li Yan, et al. Modern sedimentation rates in the contiguous sea area of Changjiang Estuary and Hangzhou Bay[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 130-135.]
- 3 王华强,高抒. 杭州湾北岸高潮滩沉积与沿岸物质运输趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(6): 25-30. [Wang Huaqiang, Gao Shu. Tidal flat sediment characteristics and transport trends along the northern bank of Hangzhou Bay[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(6): 25-30.]
- 4 曹沛奎,谷国传,董永发,等. 杭州湾泥沙运移的基本特征[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 1985(3): 75-84. [Cao Peikui, Gu Guozhuan, Dong Yongfa, et al. Basic characteristics of sediment transport in Hangzhou Bay[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 1985(3): 75-84.]
- 5 倪勇强,耿兆铨,朱军政. 杭州湾水动力特性研讨[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(4): 439-445. [Ni Yongqiang, Geng Zhaoquan, Zhu Junzheng. Study on characteristics of hydrodynamics in Hangzhou Bay[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003, 18(4): 439-445.]
- 6 Xie Dongfeng, Gao Shu, Wang Zhengbing, et al. Numerical modeling of tidal currents, sediment transport and morphological evolution in Hangzhou Bay, China[J]. International Journal of Sediment Research, 2013, 28(3): 316-328.
- 7 Qiao Shuna, Pan Delu, He Xianqiang, et al. Numerical study of the influence of Donghai Bridge on sediment transport in the mouth of Hangzhou Bay[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10(Part A): 408-413.
- 8 Xie Dongfeng, Wang Zhengbing, Gao Shu, et al. Modeling the tidal channel morphodynamics in a macro-tidal embayment, Hangzhou Bay, China[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(15): 1757-1767.
- 9 张桂甲,李从先. 末次冰期以来钱塘江河口湾充填的物质来源[J]. 科学通报, 1997, 42(16): 1741-1744. [Zhang Guijia, Li Congxian. Sources of sediments filling the Qiantangjiang estuary incised valley since the Last Glaciation[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(16): 1741-1744.]
- 10 王昆山,金乘福,石学法,等. 杭州湾表层沉积物碎屑矿物分布及物质来源[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(1): 95-104. [Wang Kunshan, Jin Bingfu, Shi Xuefa, et al. Distribution and provenance of the surface sediment of the Hangzhou Bay deduced from detrital minerals[J]. Advances in Marine Science, 2013, 31(1): 95-104.]
- 11 鲍根德. 杭州湾及其邻近陆架区沉积物中有机碳、氮、磷和硅的地球化学[J]. 台湾海峡, 1988, 7(4): 366-375. [Bao Gende. Geo-

- chemistry of organic carbon, nitrogen, phosphorus and silicon in surface sediment from Hangzhou Estuary and its adjacent continental shelf [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1988, 7(4): 366-375.]
- 12 时英民,李坤业,杨惠兰,等. 东海 DC-2 孔岩芯黏土矿物组合及其分布特征[J]. *海洋科学*, 1988(2): 13-19. [Shi Yingmin, Li Kunye, Yang Huilan, et al. Clay mineral assemblage and their distribution characteristic in sediments in Core DC-2 from the East China Sea [J]. *Marine Sciences*, 1988(2): 13-19.]
- 13 Park Y A, Khim B K. Clay minerals of the recent fine-grained sediments on the Korean continental shelves [J]. *Continental Shelf Research*, 1990, 10(12): 1179-1191.
- 14 范德江,杨作升,毛登,等. 长江与黄河沉积物中黏土矿物及地化成分的组成[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(4): 7-12. [Fan Dejiang, Yang Zuosheng, Mao Deng, et al. Clay minerals and geochemistry of the sediments from the Yangtze and Yellow rivers [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(4): 7-12.]
- 15 周晓静,高抒,贾建军. 长江黏土矿物示踪标记稳定性的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 2003, 34(6): 683-692. [Zhou Xiaojing, Gao Shu, Jia Jianjun. Preliminary evaluation of the stability of Changjiang clay minerals as fingerprints for material source tracing [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(6): 683-692.]
- 16 杨金中,李志中,赵玉灵. 杭州湾南北两岸岸线变迁遥感动态调查[J]. *国土资源遥感*, 2002, 14(1): 23-28. [Yang Jinzhong, Li Zhizhong, Zhao Yuling. The remote sensing dynamic monitoring of Hangzhouwan banks [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2002, 14(1): 23-28.]
- 17 陈吉余,陈沈良,丁平兴,等. 长江口南汇咀近岸水域泥沙输移途径[J]. *长江流域资源与环境*, 2001, 10(2): 166-172. [Chen Jiyu, Chen Shenliang, Ding Pingxing, et al. Sediment transport along the Nanhui submerged spit of the Yangtze estuary [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2001, 10(2): 166-172.]
- 18 Su Jilan, Wang Kangshan. Changjiang river plume and suspended sediment transport in Hangzhou Bay [J]. *Continental Shelf Research*, 1989, 9(1): 93-111.
- 19 南京大学地质系矿物岩石学教研室. 粉晶 X 射线物相分析 [M]. 北京:地质出版社, 1980: 180-197. [The Mineral Lithology Staff Room of Department Geology of Nanjiug University. *Material Phase Analysis of Crystalpowder in X-ray* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980: 180-197.]
- 20 赵杏媛,张有瑜. 粘土矿物与粘土矿物分析 [M]. 北京:海洋出版社, 1990: 106-153. [Zhao Xingyuan, Zhang Youyu. *Clay Mineral and Analysis of Clay Mineral* [M]. Beijing: China Ocean Press, 1990: 106-153.]
- 21 Holtzapffel T. Les minéraux argileux: préparation, analyse diffractométrique et détermination [J]. *Société Géologique Du Nord Publication*, 1985, 12: 1-136.
- 22 董永发. 杭州湾底质的粒度特征和泥沙来源 [J]. *上海地质*, 1991(3): 44-51. [Dong Yongfa. Grain size features of bed material and sedimentary source in the Hangzhou Bay [J]. *Shanghai Geology*, 1991(3): 44-51.]
- 23 吕全荣. 长江口细颗粒沉积物的矿物特征和沉积分异 [J]. *上海地质*, 1992(3): 18-25. [Lv Quanrong. Mineral characteristics of fine-grain sediment and its sedimentary differentiation in Changjiang Estuary [J]. *Shanghai Geology*, 1992(3): 18-25.]
- 24 洪汉烈. 黏土矿物古气候意义研究的现状与展望 [J]. *地质科技情报*, 2010, 29(1): 1-8. [Hong Hanlie. A review on paleoclimate interpretation of clay minerals [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(1): 1-8.]
- 25 师育新,戴雪荣,宋之光,等. 我国不同气候带黄土中黏土矿物组合特征分析 [J]. *沉积学报*, 2005, 23(4): 690-695. [Shi Yuxin, Dai Xuerong, Song Zhiguang, et al. Characteristics of clay mineral assemblages and their spatial distribution of Chinese loess in different climatic zones [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(4): 690-695.]
- 26 朱凤冠. 长江、黄河等径流物质对东海陆架沉积物的影响 [J]. *海洋实践*, 1984(4): 20-45. [Zhu Fengguan. The impact of the Yangtze River and Yellow River and other substances of run-off on the sediment of East China Sea [J]. *Marine Practice*, 1984(4): 20-45.]
- 27 Liu J P, Li A C, Xu K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf cliniform deposit in the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(17/18): 2141-2156.
- 28 林承坤. 长江口及其邻近海域粘性泥沙的数量与输移 [J]. *地理学报*, 1992, 47(2): 108-118. [Lin Chengkun. The amount and transport of cohesive sediments in the Changjiang River estuary and its near sea [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1992, 47(2): 108-118.]
- 29 何梦颖,郑洪波,黄湘通,等. 长江流域沉积物黏土矿物组合特征及物源指示意义 [J]. *沉积学报*, 2011, 29(3): 544-551. [He Mengying, Zheng Hongbo, Huang Xiangtong, et al. Clay mineral assemblages in the Yangtze drainage and provenance implications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(3): 544-551.]
- 30 杨作升. 黄河、长江、珠江沉积物中粘土的矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系 [J]. *海洋与湖沼*, 1988, 19(4): 336-346. [Yang Zuosheng. Mineralogical assemblages and chemical characteristics of clays from sediments of the Huanghe, Changjiang, Zhujiang rivers and their relationship to the climate environment in their sediment source areas [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1988, 19(4): 336-346.]
- 31 徐琳. 长江口及邻近海域表层沉积物组成和来源研究 [D]. 青岛:中国海洋大学, 2008. [Xu Lin. A study on the composition and provenance of the surface sediments in Yangtze River Estuary and its adjacent sea area [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.]
- 32 师育新,戴雪荣,付苗苗,等. 澄湖 SC7 孔沉积物粘土矿物特征及其古地理意义 [J]. *沉积学报*, 2010, 28(2): 339-345. [Shi Yuxin, Dai Xuerong, Fu Miaomiao, et al. Clay mineral characteristics of SC7 core sediments from Chenghu lake (Suzhou) and their paleogeographic significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(2): 339-345.]

Spatial Difference and Provenance of Clay Minerals as Tracers of Intertidal Sediments in Hangzhou Bay

XI YaJuan SHI YuXin DAI XueRong LIU Zhao WU ZiYang

(School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Intertidal sediments in Hangzhou Bay were collected and analyzed by XRD. The clay minerals distribution characteristics and the source and origin of clay minerals in the study area were discussed by means of cluster analysis, combined with the hydrodynamic characteristics of the Hangzhou Bay. The results showed that surficial sediments in the tidal flat of Hangzhou Bay were mainly clayey silt and the others were sandy silt. The complex composition of clay minerals in the study area were mainly illite, kaolinite and chlorite, as well as a few smectite and vermiculite and 1.4nm transitional mineral. According to each clay mineral's content, it could be divided into three kinds of combinations: type I of illite - kaolinite - chlorite - vermiculite - smectite, type II of illite - chlorite - kaolinite - smectite - vermiculite, type III of illite - kaolinite - chlorite - smectite - vermiculite. On the spatial distribution, the average contents of smectite and chlorite in the northern shore were higher than which of the southern shore; while the average contents of illite and kaolinite and vermiculite (containing 1.4nm transitional minerals) in the northern shore were lower than which of the southern shore. Smectite in surficial sediments in high tidal flat was greater than in the central tidal flat, and the other clay minerals had no obvious difference. The clay minerals distribution characteristics are closely related to the hydrodynamic and material source. The intertidal sediments in eastern areas of Zhapu in north shore were significantly affected by the tide and Yangtze River coastal current, the sediments were mainly from Yangtze River and the East China Sea. As a result of the input of Caoe River and Yong River, the proportion of deposits from Qiantang River basin of sediments in the southern shore was obviously higher than which of the northern shore. The changes of each clay mineral's content from bottom to top in vertical section sediments reflected the fluctuation of weathering intensity in the source area.

Key words: Hangzhou Bay; intertidal sediments; clay minerals; provenance