曹娥江下游XYC孔粒度特征及沉积记录

朱丽东, 王 俊, 裴豪杰, 叶 玮, 李凤全, 莫东坡, 林海意

(浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江 金华 321004)

摘 要:基于曹娥江下游星一村钻孔(XYC)1717个沉积物样品的粒度分析,探讨钱塘江南岸地区全新世沉积环境记录。初步结论如下:①基于粒度组成,XYC孔沉积物分为粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂、粘土质粉砂等4种岩性,自下而上分为9个单元,组成多个粒度粗细变化旋回。其中,第1、4两层为粉砂质砂,砂含量高于粉砂,粘粒含量10%~15%,分选差,动力条件复杂;第3、5两层属砂质粉砂,粉砂为主但含量不超过70%,砂含量20%以上,粘粒含量低;第2、7、9三层为粉砂,粉砂含量超过70%,粘粒、砂含量均低于20%;第6、8两层为粘土质粉砂,粉砂含量高于70%,粘粒含量20%以上。②基于C-M图最大搬运能和平均搬运能强弱及其变化幅度分析,初步识别出4种沉积相,自下而上依次为河流相、潮坪相、浅海相、湖沼相。第1、2两层为高能且不稳定的水动力搬运环境,属河流相沉积;第3~7层,最大搬运能减弱,搬运动力与上虞近海滩涂样品SYTT相似,为潮坪相沉积;第8~9层,搬运动能低且变幅小,属低能静水沉积环境;第8层下段为浅海相,该层上段至第9层为湖沼相。③粒度纵向变化表明,粘粒含量自下而上波动增加;砂含量自下而上波动减少,平均粒径向上变细、分选性向上变好。XYC孔记录了该地区9690~5131 cal.a BP时段海面上升,达到高海面继而又海退的过程。研究结果有利于进一步探索钱塘江流域的古环境演变特征。

关键词:曹娥江下游;粒度;沉积相;沉积环境变化

1 引言

粒度是解译沉积动力与搬运条件、沉积物物质来源、沉积环境变化乃至沉积之后风化成土信息的重要环境指标,广泛应用于古环境和现代环境研究。中国北方黄土研究中,粒度成功揭示其风成成因,并沿冬季风主导风向形成粒度的空间分选性,由荒漠戈壁提供物源,渐次形成砂黄土—黄土—粘黄土沉积体系,黄土—古土壤序列中粒度粗细变化还明确指示古冬季风的强弱(刘东生, 1985)。中国南方红土研究中,粒度一方面为红土多元成因提供证据(胡雪峰等, 2005; 李凤全等, 2010),另一方面还能有效地指示其物源及风化信息(熊尚发等, 2001; 杨立辉等, 2008; 朱丽东等, 2014)。在河流、湖泊、滨海、海洋等沉积环境中,粒度能很好地指示水动力

条件和区域环境变化,如海洋环境中沉积物净搬运方向上某种粒径趋势出现的概率远高于其他方向(高抒等, 1998);潮滩环境中,粒度的偏态、中值粒径、分选系数可以作为判别单颗粒沉积与絮凝沉积的依据(蒋国俊, 1995);滨海地区,砂($>62.5\ \mu\text{m}$)含量以及粘土($<2\ \mu\text{m}$)在泥质成分(粉砂+粘土)中的含量能有效区分沉积环境变化(Flemming, 2000; 陈小英等, 2006);河湖沉积中,粒度为重要环境代用指标,用于识别洪水事件(史威等, 2012),入湖陆源物质量变化(侯新花等, 2006),湖区有效湿度乃至风沙强度(吕雁斌等, 2011)等。因此,特定沉积环境对应特定的粒度组成和参数特征(Shepard, 1954; Friedman, 1979)。

浙江平原杭州湾南岸地区,地势低平,河湖密集,晚第四纪以来海面波动频繁,冲积、洪积、湖积、

收稿日期:2016-09;修订日期:2016-12。

基金项目:国家自然科学基金项目(41371206, 41572345) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41371206, No.41572345]。

作者简介:朱丽东(1965-),女,浙江新昌人,博士,教授,主要从事自然地理和环境变化研究,E-mail: zhulidong@zjnu.cn。

引用格式:朱丽东, 王俊, 裴豪杰, 等. 2017. 曹娥江下游XYC孔粒度特征及沉积记录[J]. 地理科学进展, 36(4): 454-465. [Zhu L D, Wang J, Pei H J, et al. 2017. Grain-size and sedimentary records of the XYC Core in the downstream of the Cao'e River[J]. Progress in Geography, 36(4): 454-465.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.04.007

海积等类型的第四系沉积广泛发育,海陆交互信息丰富,是开展全新世环境变化研究的理想场所。本文基于浙江省东北部宁绍平原中部、曹娥江下游星一村钻孔(XYC)的沉积物粒度分析,探讨XYC孔所记录的沉积环境变化,为研究宁绍平原全新世沉积环境演变、重建地区古环境提供依据。

2 研究区概况

宁绍平原是浙江东北部杭州湾南岸的一片东西向狭长的海岸平原,其南依龙门山、会稽山、四明山、天台山,北邻钱塘江岸,地势低平北倾,西起萧山,东至东海海滨,由萧绍平原、上虞平原、南沙平原、三北平原、宁波平原构成,西北隔钱塘江与杭嘉湖平原相望,总面积4824 km²。区内海拔一般10 m以下,地下水位浅而稳定,属亚热带海洋性季风气候。平原北部滨海沙堤区是由潮流挟带的泥沙堆积而成,今临山、泗门、周巷、浒山、鸣鹤场、蟹浦一线曾建有大古塘(北宋庆历七年即1047年所建);沙堤区外侧是逐年外扩的北新塘,最外一条已距大古塘23 km;沙堤区内侧属潟湖—湖沼平原,海拔5~7 m,宋以来的地方史籍中有记载的湖泊多达217个(陈桥驿等, 1984),这里水网稠密,钱塘江、浦阳江、曹娥江、甬江等河流流经之地的两岸,还有肥沃的冲积平原。前人研究表明,全新世以来宁绍平原经历了潟湖—浅海—潟湖—湖沼的演变(Liu et al, 2014),沉积厚度10~25 m或50~60 m不等,沉积类型众多,沉积地层及相变即使在宁绍平原内部也存在差异(吴立等, 2012)。

曹娥江发源于磐安县尚湖镇大盘山长坞,自南而北流经新昌县、嵊州市、上虞区、柯桥区,在绍兴三江口以下的新三江闸下游经曹娥江大坝注入杭州湾,干流全长197 km,流域面积6046 km²,干流花山站及支流小舜江汤浦镇以下为感潮河段,受径流和潮流共同作用,河床冲淤变化剧烈,出口江道频繁摆动(钱塘江志编纂委员会, 1998),1970年来,因围涂工程出口江道已向东北方向延伸约15 km。曹娥江流域属亚热带季风气候,多年平均降水量1500 mm,年内有3个雨季:春雨季(3-4月)降水占全年的18%,梅雨季(5-7月初)降水占全年的35%,台风雨季(8月底-9月初)则占全年降水的15%;曹娥江径流呈双峰型,梅雨季径流总量大而洪峰流量小,台风季常伴暴雨,径流总量小而洪峰流量大,易发

洪水(潘存鸿等, 2000; 冯利华等, 2005)。上虞区东邻余姚市,南接嵊州市,西连柯桥区、越城区,北濒钱塘江河口,滨海岸线45 km,后备海涂资源共178.7 km²。

3 材料与方法

XYC沉积钻孔(120°53'14.1"E, 30°02'49.4"N)位于浙北杭州湾南岸宁绍平原中部曹娥江下游星一村附近,隶属绍兴市上虞区(图1)。钻孔孔径10 cm,岩芯长34.34 m,取芯率为95%。室内将岩芯对剖为二,在切面上细致观察并记录沉积物颜色、质地、塑性、微层理、锈纹锈斑、结核体、肉眼可见的粗粒物质等岩性特征和夹有的植物碎屑、贝壳、螺等生物化石信息,岩性特征如表1。按2 cm的间隔采样,共获得分析样品1717个。

根据在美国BETA实验室获得的4个植物碎屑样品的AMS¹⁴C年龄,经calib Rev 7.0.4软件校正,深度2.76、8.74、26.72、31.74 m处4个样品的AMS¹⁴C校正年龄分别为5284~5329、7440~7570、9009~9137、9524~9622 cal.a BP(表2)。

XYC孔1717个样品的粒度测试由浙江师范大学地理过程实验室完成。取0.2~0.5 g样品放入烧杯,加入2:1 H₂O₂ 10~15 ml,浸泡12 h以去除样品中的有机质,待有机质充分氧化后上电热板加热煮沸20 min,分解多余H₂O₂,之后加2:1 HCl 5 ml去除样品中的无机碳酸盐,然后冷却,将纯水注满烧杯静置24 h,抽取烧杯上部清液,以0.05 mol/L的Na(PO₃)₆溶液10 ml作分散剂,摇匀并超声振荡15 min,样品充分分散后上机待测。测试仪器为英国Malvern公司生产的MasterSizer 2000 激光粒度分析仪,测量范围0.02~2000 μm,重复测量误差低于2%。

图1 研究区及采样点位置图

Fig.1 Study area and location of sample sites

表1 XYC钻孔岩性特征

Tab.1 Lithology characteristics of the XYC Core		
分层及深度	岩性特征描述	
⑩(0~2.20 m)	厚约 2.20 m, 灰黄色, 质地松散, 不粘; 有大量植物根系, 表层堆有生活垃圾, 人为扰动较大	
⑨(2.22~4.22 m)	厚约 2.02 m, 灰黄色至灰黑色, 含水量高, 粘, 见微层理; 在 2.22~2.72 m 处有铁锈色斑点, 在 2.72~3.18 m 处含少量黑色碳斑; 在 3.18~4.22 m 处有大量碳化植物碎屑; 含 2 个厚度分别为 10 cm 和 38 cm 的泥炭层	
⑧(4.24~13.32 m)	厚约 9 m, 灰黑色和青灰色为主, 质地紧实, 粘; 4.24~4.60 m 可见碳化植物碎屑; 含植物残体及黑斑; 在 6.40~11.00 m 处可见少量气孔; 在 11.00~13.32 m 处有可见贝壳碎屑	
⑦(13.34~19.04 m)	厚约 5.72 m, 青灰色, 质地较软, 较粘; 含较多气孔、少量贝壳碎屑和黑色斑点	
⑥(19.06~22.60 m)	厚约 3.56 m, 青灰色, 质地较软, 较粘; 含较多气孔和少量贝壳碎屑; 可见少量粉砂透镜体; 偶见灰黄色淤泥呈团块状	
⑤(22.62~23.08 m)	厚约 0.48 m, 灰色, 质地略松散; 含少量气孔和黑斑; 见极少量贝壳碎屑	
④(23.10~25.30 m)	厚约 2.22 m, 灰色, 质地略松散; 24.22~25.18 m 出现较多完整贝壳, 并见黑色斑块; 含少量砾石, 偶见植物碎屑	
③(25.32~27.72 m)	厚约 2.42 m, 青灰色, 质地较粘; 25.32~26.42 m 处有黑斑, 27.28~27.72 m 处含少量气孔; 含少量贝壳碎片	
②(27.74~32.08 m)	厚约 4.36 m, 青灰色, 略松散; 含少量气孔; 在 27.74~28.82 m 处含黑斑和极少量贝壳碎屑, 28.82~29.64 m 处局部可见少量灰黄色钙结核, 29.64~32.08 m 处有黑斑; 可见粉砂透镜体, 偶见植物碎屑	
①(32.10~34.34 m)	厚约 2.26 m, 灰黄色为主, 松散; 以砂为主, 表面具锈色, 含较多肉眼可见的、磨圆度较高的砾石	

表2 XYC孔AMS¹⁴C测年结果
Tab.2 AMS¹⁴C Age of the XYC Core

样品编号及深度	¹⁴ C 年龄/a BP	校正年代/cal.a BP
XYC-3-028(2.76 m)	4600±30	5284~5329
XYC-10-039(9.78 m)	6620±40	7440~7570
XYC-26-026(26.72 m)	8150±30	9009~9137
XYC-30-053(31.74 m)	8600±30	9524~9622

4 XYC孔沉积物粒度特征

4.1 粒度组成

XYC孔所有样品的粒度测试结果表明,粉砂(4~63 μm)含量介于19.20%~91.29%之间,平均含量69.65%,其中,88.35%的样品粉砂含量高于50%,仅2.97%的样品粉砂含量低于30%,粉砂粒组变异系数较小,为20.86%;粘粒(<4 μm)含量介于4.02%~

42.96%之间,平均值18.69%,36.40%的样品的粘粒含量超过20%,但含量高于30%的样品仅有9.44%,粘粒粒组变异系数值略高,为39.35%;砂(>63 μm)含量变化于0.00%~74.86%之间,平均含量仅11.66%,其中53.35%的样品砂含量不足5%,19.57%的样品砂含量高于20%,砂粒组分的变异系数大,可达143.34%。此外,绝大多数样品粗粉砂(10~63 μm)含量高于细粉砂(4~10 μm),两者比值介于1.01~20.69之间,但有9.14%的样品两者比值低于1(变化于0.37~0.98之间);从粉砂与粘粒含量的比值看,所有样品粉粘比值介于1.31~14.76之间,平均4.30。可见,XYC孔沉积物以粉砂为优势粒级,且绝大部分样品以粗粉砂含量较高,而样品间粘粒和砂组分含量的差异比较明显。按粒度三角图,结合沉积物命名的定量依据(Sahu, 1964; Doeglas, 1968)对样品进行归类,大致可划分为4种沉积类型(图2),分别是粉砂质砂(I)、砂质粉砂(II)、粉砂(III)、粘土质粉砂(IV)。其中,粉砂质砂(I)分布在钻孔下部23.10~25.30 m及31.10~34.34 m等2个深度段;砂质粉砂(II)主要分布于钻孔22.62~23.08 m及25.32~27.72 m处;粉砂(III)主要出现在2.22~4.22、13.34~19.04、27.74~32.08 m等3个层段;粘土质粉砂(IV)则分布于4.24~13.32 m和19.06~22.6 m等2个深度段。显然,4类沉积在钻孔中随深度交替分布。

鉴于粉砂质砂(I)、砂质粉砂(II)、粉砂(III)、粘土质粉砂(IV)随深度间隔分布的特征,结合岩性描述,XYC孔可以被划分为10个岩性段,自下而上分别为:①灰黄色粉砂质砂—②青灰色粉砂—③灰色砂质粉砂—④灰色粉砂质砂—⑤青灰色砂质粉砂—⑥灰黑色粘土质粉砂—⑦青灰色粉砂—⑧灰黑色

图2 XYC孔沉积物粒度三角图及沉积类型
Fig.2 Clay-silt-sand triangular plot and sedimentary types of the XYC Core

粘土质粉砂—⑨灰黄色粉砂—⑩人工填土,各层段粒度组成如表3所示。第1、4两层(粉砂质砂),砂含量最高,均值可达45.56%、47.87%;粉砂含量次之,均值40.53%、39.30%;粘粒含量偏低,均值为11.59%和15.14%。第2、7、9三层(粉砂)和第6、8层(粘土质粉砂)粉砂含量最高,均值为71.17%~85.06%;砂含量偏低,各层均值为0.66%~11.31%;相比之下,第6、8两层粘粒含量超过20%,第2、7、9三层则不足20%。第3、5两层(砂质粉砂)仍以粉砂为主,但均值不超过70%;砂含量高于20%(两层均值21.81%、21.34%);粘粒含量则低于20%(两层均值为10.87%、16.84%)。从(10~63 μm)/(4~10 μm)比

值和(10~63 μm)/(<4 μm)比值看,第9层(粉砂)、第3层(砂质粉砂)两层最高,分别为5.85、6.14和5.51、5.39;第8、6两层(粘土质粉砂)最低,均值分别为1.24、1.85和1.99、2.34。

4.2 粒度频率分布

图3为XYC钻孔粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂、粘土质粉砂等4类样品在不同深度段上的典型粒度频率曲线。

粉砂质砂(第1、4层,图3a、3b),粒度频率分布呈双峰或多峰型,主峰尖窄,次峰宽缓,主众数峰出现于1~2 φ(500~250 μm)或3~4 φ(125~62.5 μm),次众数峰位于6~6.5 φ(16~11 μm)附近。第1层大部样

表3 XYC孔不同岩性段粒度组成及参数特征

Tab.3 Sediments grain-size composition and parameters of different lithology segments of the XYC Core

岩性深度/m	项目	<4 μm)/%	(4~63 μm)/%	>63 μm)/%	(4~10 μm)/%	(10~63 μm)/%	粗细粉砂比	粉粘比
							(10~63 μm)/(4~10 μm)	(10~63 μm)/(<4 μm)
⑩填土层 0.00~2.20	最小	4.02	33.51	0.52	2.22	30.87	2.81	2.84
	最大	20.34	90.10	62.47	20.60	85.61	20.68	14.08
	平均	10.55	83.88	5.57	8.08	75.79	10.73	7.58
⑨粉砂层 2.22~4.22	最小	7.06	56.43	0.00	5.75	27.56	0.85	0.64
	最大	42.96	91.29	7.95	35.26	85.36	14.73	12.10
	平均	13.66	85.06	1.28	15.02	70.04	5.80	6.14
⑧粘土质粉砂 4.24~13.32	最小	15.10	57.83	0.00	17.37	16.60	0.37	0.43
	最大	40.69	83.96	15.03	44.43	65.02	3.74	4.31
	平均	27.34	72.01	0.66	33.26	38.75	1.24	1.58
⑦粉砂 13.34~19.04	最小	7.14	34.12	1.06	7.29	21.56	1.20	1.44
	最大	27.07	80.87	54.46	32.67	66.57	5.89	6.02
	平均	16.70	71.99	11.31	20.44	51.55	2.66	3.21
⑥粘土质粉砂 19.06~22.60	最小	10.46	30.91	0.63	10.87	19.25	1.10	1.25
	最大	29.05	84.55	57.64	33.40	58.13	4.86	4.81
	平均	20.93	71.17	7.91	24.65	46.52	1.99	2.34
⑤砂质粉砂 22.62~23.08	最小	9.15	42.90	10.10	9.73	31.93	1.88	1.94
	最大	20.72	72.34	47.95	22.49	52.14	3.97	3.62
	平均	16.84	61.82	21.34	17.52	44.30	2.58	2.67
④粉砂质砂 23.10~25.30	最小	6.05	25.33	20.49	6.64	18.06	1.63	1.66
	最大	16.94	68.77	66.84	18.73	58.45	5.66	5.44
	平均	11.59	40.53	47.87	11.84	28.69	2.48	2.53
③砂质粉砂 25.32~27.72	最小	6.85	45.03	0.00	6.38	32.86	2.33	2.76
	最大	17.90	88.91	44.65	23.07	77.26	10.95	10.67
	平均	10.87	67.32	21.81	10.83	56.48	5.51	5.39
②粉砂 27.74~32.08	最小	7.15	33.17	0.00	6.72	22.99	1.49	1.71
	最大	23.78	88.36	25.67	30.91	76.47	10.21	9.60
	平均	17.88	78.78	3.34	21.84	56.94	2.84	3.31
①粉砂质砂 32.10~34.34	最小	8.20	16.20	1.36	5.82	10.39	1.34	0.90
	最大	31.78	74.92	74.86	26.49	60.62	6.73	5.86
	平均	15.14	39.30	45.56	11.63	27.67	2.40	1.95

图3 XYC孔不同层段典型样品粒度频率曲线

Fig.3 Typical frequency distribution curves of different segments of the XYC Core

品第一众数粒径 1.5ϕ ($354 \mu\text{m}$), 第二众数粒径 6.0ϕ ($16 \mu\text{m}$); 少部分样品主次众数峰位置相反, 6.0ϕ ($16 \mu\text{m}$) 处为主众数峰, 1.5ϕ ($354 \mu\text{m}$) 附近为次众数峰。第4层样品主众数峰位于 3.3ϕ ($102 \mu\text{m}$), 次众数峰 6.3ϕ ($12.5 \mu\text{m}$)。此外, 频率分布曲线上 8ϕ ($4 \mu\text{m}$)、 10.5ϕ ($0.7 \mu\text{m}$) 附近具拐点。第1、4两粉砂质砂层相比, 第1层粒度更粗, 分选更差, 动力条件更为复杂。

砂质粉砂(第3、5层, 图3c、3d), 粒度频率曲线呈单峰。第3层, 粒度分布为尖窄单峰, 众数粒径 $4.5 \sim 5 \phi$ ($44 \sim 31 \mu\text{m}$), 粗粒端 $1 \sim 2 \phi$ ($500 \sim 250 \mu\text{m}$) 附近略见粗尾(图3c); 第5层, 粒度分布呈宽缓单峰(图3d), 众数峰位置可在 $3.5 \sim 6.5 \phi$ ($88 \sim 11 \mu\text{m}$) 间变化, 频率曲线向细粒端有明显拐点。

粉砂(第2、7、9层, 图3e、3f、3g), 粒度分布呈单峰正偏型, 众数粒径总体变化于 $4 \sim 6.5 \phi$ ($62.5 \sim 11 \mu\text{m}$) 之间。第2、7、9三层相比, 细节上略有差异: 峰态以第9层最尖窄, 第7层相对宽缓; 第2层众数粒径峰位于 $5 \sim 6.5 \phi$ ($31 \sim 11 \mu\text{m}$) 间, 第9层集中于 $5.5 \sim 6 \phi$ ($22 \sim 16 \mu\text{m}$), 第7层位于 $4 \sim 4.5 \phi$ ($62 \sim 44 \mu\text{m}$) 处或位于 $6 \sim 6.5 \phi$ ($16 \sim 11 \mu\text{m}$) 处。

粘土质粉砂(第6、8层, 图3h), 粒度分布基本呈单峰带细尾型, 峰型较粉砂略宽缓, 众数粒径 $6 \sim 7 \phi$ ($16 \sim 8 \mu\text{m}$), 10ϕ ($1 \mu\text{m}$) 处有明显拐点。

4.3 粒度参数

表4是依据 Folk-Ward 图解法求得的XYC孔各层段沉积物样品的粒度参数均值。整体看, 1717个样品的平均粒径变化于 $2.46 \sim 7.80 \phi$ ($182 \sim 4.5 \mu\text{m}$) 之间, 均值 6.16ϕ ($14 \mu\text{m}$), 分选系数变化于 $1.05 \sim 3.45$ 之间, 均值 1.73 , 偏态值介于 $-0.25 \sim 0.79$, 均值 0.26 , 峰态值为 $0.60 \sim 2.16$ 之间, 均值 1.07 。各层段数值看, 粉砂质砂(第1、4层), 平均粒径(M_{ϕ})最粗(4.56ϕ ($42 \mu\text{m}$)、 4.78ϕ ($36.5 \mu\text{m}$)), 分选很差(σ 值 2.68 、 2.18), 极正偏态(SK_{ϕ} 值 0.35 、 0.43), 宽平峰态(K_{ϕ} 值 0.83 、 0.88); 砂质粉砂(第3、5层)平均粒径 5.30ϕ ($25 \mu\text{m}$)、 5.80ϕ ($18 \mu\text{m}$), 分选差或很差(1.77 、 2.07), 偏态正偏或极正偏(0.37 、 0.18), 峰态中等或尖窄(0.91 、 0.91); 粉砂(第2、7、9层)和粘土质粉砂(第6、8层)分选相对较好, σ 值 $1.41 \sim 1.80$ 之间, 正偏或极正偏, SK_{ϕ} 值 $0.12 \sim 0.35$, 峰态中等或尖窄, K_{ϕ} 值 $0.99 \sim 1.28$, 以第9层分选最好。粒度指数特征看, 上四分位数(Q_3)粒径值第8层最细, 8.04ϕ ($4 \mu\text{m}$), 下四分位数(Q_1)

表4 XYC孔不同层段粒度参数(均值)
Tab.4 Grain-size parameters(mean value) of different segments of the XYC Core

岩性/深度/m	M_{ϕ}/ϕ	σ	SK_{ϕ}	K_{ϕ}	Q_3/ϕ	Md/ϕ	Q_1/ϕ	Q_3-Q_1
⑩填土 0.00~2.20	5.49	1.40	0.42	1.45	6.12	5.21	4.61	1.51
⑨粉砂 2.22~4.22	6.09	1.41	0.35	1.28	6.80	5.85	5.18	1.62
⑧粘土质粉砂 4.24~13.32	7.13	1.46	0.20	1.07	8.04	6.99	6.14	1.90
⑦粉砂 13.34~19.04	6.10	1.80	0.18	0.99	7.30	5.94	4.82	2.48
⑥粘土质粉砂 19.06~22.60	6.46	1.80	0.12	1.01	7.66	6.37	5.21	2.45
⑤砂质粉砂 22.62~23.08	5.80	2.07	0.18	0.91	7.26	5.61	4.25	3.02
④粉砂质砂 23.10~25.30	4.78	2.18	0.43	0.88	6.41	4.16	3.15	3.26
③砂质粉砂 25.32~27.72	5.30	1.77	0.37	1.21	6.21	4.93	4.12	2.09
②粉砂 27.74~32.08	6.40	1.63	0.27	1.10	7.39	6.16	5.30	2.08
①粉砂质砂 32.10~34.34	4.56	2.68	0.35	0.83	6.67	3.91	2.41	4.26
全剖面	6.16	1.73	0.26	1.07	7.26	5.92	4.95	2.31

注:表中 Q_3 、 Md 、 Q_1 为粒度指数特征值,分别代表粒度累计含量75%、50%、25%时的粒径值(ϕ 值)

和中值(Md)粒径值第1层最粗,分别为2.41 ϕ (188 μm)和3.91 ϕ (66.5 μm),四分位距值(Q_3-Q_1)以第1层最大(4.26 ϕ (52 μm)),第9层最小(1.62 ϕ (325 μm),填土层除外)。可见,不同层段样品中位数两侧粗细颗粒的累积速率、粒度分布的离散程度等存有差异。就同类岩性粒度指数特征值看,也不完全一致,可能意味着同岩性内沉积环境仍具不稳定性。

5 沉积相与沉积环境变化

5.1 C-M图与沉积相

C-M图是沉积样品的C值(粒度累积曲线上累计百分含量1%处对应的粒径 μm 值)和M值(粒度累积曲线上累计百分含量50%处对应的粒径 μm 值,即粒度中值)组成的双对数坐标散点图,反映搬运介质的能量条件、搬运方式等(Passega, 1957)。C值通常与样品中最粗颗粒的粒径相当,代表水动力搬运的最大能量,M值则代表水动力搬运的平均能量。图4是XYC孔第1~9层样品及一些对比样品的C-M图,其中,对比样品BMH采自上虞白马湖(据《水经注》记载,白马湖创自东汉,一直存续至今,可将其沉积物样品作为典型湖泊样品的代表。BMH剖面厚1.30 m,黑灰至灰褐色粘土质粉砂),CER采自曹娥江江道边滩(作为XYC孔中河漫滩沉积的参照样品),SYTT为上虞近海滩涂样品(采自上虞港附近,作为潮滩相沉积的参照样品),YQW采自温州乐清湾(乐清湾为一个半封闭海湾,虽受到海水的影响,但其动力条件很弱,视为浅海沉积的参照样品,YQW孔深1.0 m,自下而上为黑褐至灰

褐色粘土质粉砂,软塑状)。上述4类样品可分别代表典型的湖沼、河漫滩、潮滩、浅海沉积样品。

从图4可知,第1、2两层样品,沉积动能强且不稳定,判别为河流相沉积。其中,第1层样品的C值最大,基本集聚在200~800 μm 间,大部样品>300 μm ,M值的变化幅度较宽,7~300 μm 之间,以10~200 μm 普遍,体现出最大搬运能量高,平均搬运能量不稳定的特点;第2层样品,C值的变化范围较大,从40 μm 至700 μm ,相对集中在40~200 μm ,M值相对集中,基本分布在9~30 μm 之间,且大部分样品集中在10~20 μm ,平均搬运能量与曹娥江边滩沉积样品CER和白马湖湖岸沉积样品BMH较为一致,但最大搬运动能强于CER、BMH,进一步比较第2层、CER、BMH样品的粒度概率累计特征,第2层沉积特征与CER接近。如图5所示,BMH为单

图4 XYC孔粒度C-M图
Fig.4 C-M graph of grain-size of the XYC Core

图5 XYC孔第2层样品与CER、BMH对比样品的粒度概率累计曲线

Fig.5 Probability accumulation curves of layer 2 of the XYC Core, CER and BMH

一的三段式,粗截点位于4~5 ϕ (62~31 μm),细截点位置10.5 ϕ (0.7 μm),不含推移组分,极少量跃移组分(<1%),悬移组分占绝对优势(95%以上)。与BMH相比,第2层和CER则由三段式和五段式混合而成,表明部分样品中含有推移组分,含量1%~10%不等,跃移组分含量变化于10%~60%之间,悬移组分30%~60%,但第2层与第1层相比,表现为平均搬运能相对稳定,最大动能却不够稳定的特征,第2层为漫滩相。

C-M图中,第8、9两层样品的水动力条件最弱,且最大搬运能和平均搬运能都比较稳定,推测为静水沉积环境。第8层样品的C值低于80 μm ,个别大于100 μm ,M值基本不超过10 μm ,与乐清湾YQW对比样品的分布区较为一致,加之该层下段9.22~13.32 m,尤其是11.04~13.32 m之间频繁出现螺、蚬等生物壳体及残片,推测为浅海相沉积。然而,第8层9.22 m向上,螺、蚬等贝壳类生物残体渐渐减少,取而代之的是不断增加的碳化植物碎屑,尤其是8.68~9.00、6.88~7.86、5.24~6.40、4.24~4.62 m等层段含大量植物碎屑,可能意味着浅海相转为湖沼相;第9层样品的C值与第8层接近,但M值(10~30 μm)略大于第8层,尤其接近BMH样品,加之第9层内2.74~2.84、3.20~3.58 m处发育有两个黑色泥炭层等辅助岩性标志,仍可判为湖沼相。

C-M图中,红线与蓝线之间的区域,C值80~300 μm 之间,最大搬运能量明显弱于河流,强于浅海、湖沼,M值分两组,或7~30 μm 之间,或30~100 μm 之间,表明搬运能的稳定性还不够好,但与对比样品SYTT投影区一致,推测为潮坪相沉积,受潮汐波浪动力影响,最大和平均搬运能均存在一定的不稳定性,C、M值偏高,可视为低潮坪相,反之则视为高潮坪相。相比,第3、4两层样品的M值(主要分布在30~100 μm)较第5、6、7三层样品的M值(7~30 μm)略高,故前者为低潮坪相,后者属高潮坪相。

5.2 沉积相记录的沉积环境变化

XYC孔主要粒级及粒度参数的纵向变化如图6所示。从趋势上看,粘粒含量自下而上波动增加,3处明显的高值峰段,对应于第2、6、8三层,粘粒含量分别变化于7.15%~23.78%、10.46%~29.05%、15.10%~40.69%,第8层多数样品粘粒含量超过30%。砂含量相反自下而上波动减少,峰值(填土层除外)出现在第1、4两层,砂含量分别变化于1.36%~74.86%、20.49%~66.84%,第8、9层段,砂含量很低且无明显波动。粉砂含量除了第1、4两层为低值外(填土层除外),其他各层差异不大,以第9层略高。粉砂粒组进一步划分出细粉砂(4~8 μm)、中粉砂(8~32 μm)、粗粉砂(32~63 μm)3个组段后,可以发现:细粉砂纵向变化与粘粒变化较为一致,中、粗粉砂变化与砂含量变化较为一致,即细粉砂含量自下而上波动增加,3个峰值与粘粒含量3个高值一一对应;中、粗粉砂含量自下而上波动减少,至第8层上段最低,之后又有升高。综合来看,第1~7层段较第8~9层段波幅大、波动明显,平均粒径自下而上波动变细趋势明显,分选性自下而上变好。

图6 XYC孔粒度纵向变化

Fig.6 Vertical variation of grain-size of the XYC Core

基于粒度分析及纵向变化,初步识别出XYC孔全新世以来可能经历的4种沉积相及相应的沉积环境变化阶段,即图6所示的A、B、C、D等4个阶段。4个阶段年代的确定采用节点控制(表2),内插外推的方法,但由于不同层段的沉积速率存在较大差异,内插外推时应采用不同沉积速率。2.76~8.74 m之间为粉砂和粘土质粉砂,几乎不含砂,是整个钻孔中沉积物平均粒径最细的部分,期间平均沉积速率0.3194 cm/a,依据粒度和岩性特征,向上至2.20 m处以及向下至13.32 m处可按此沉积速率外推,得到2.20 m和13.32 m处年代分别为5131 cal a.BP和8613 cal a.BP; 13.32~26.72 m之间砂含量明显增加,以13.32 m和26.72 m处的年代为控制节点,则该段平均沉积速率为2.9130 cm/a,按此沉积速率外推至27.72 m处的年代为9107 cal a.BP; 27.72~31.74 m间以粉砂为主,沉积速率为0.8626 cm/a,以此推算至32.08 m处的年代为9612 cal a.BP; 32.08~34.34 m为砂质粉砂,因含砂量增加,更为接近13.32~27.72 m间沉积速率,按沉积速率2.9130 cm/a外推,得到钻孔底部34.34 m处的年代为9690 cal a.BP。最终初步获得钻孔年代框架,即XYC孔第1~9层属全新世9690~5131 cal a.BP之间的沉积,则A、B、C、D等4个阶段的沉积年代分别为9690~9107、9107~8613、8613~7330、7330~5131 cal a.BP。

阶段A(第1、2层),年代约9690~9107 cal a.BP。以砂或粉砂为主,粒度下粗上细,推移组分含量不稳定,变化于0%~70%之间,有大量跃移组分和一定量的悬移组分,第1层中可见有磨圆度较好的2 mm以上的砾,第2层中悬移组分可超过60%。C值代表的最大搬运能力很强且变化幅度很大,M值变幅所指的平均水动力搬运能量也不够稳定,颗粒分选很差或差,代表河流沉积环境。根据中国科学院南京地质古生物研究所对XYC孔部分样品有孔虫的鉴定结果,该阶段不受海水影响。A阶段可能对应于早全新世气候转暖,降水增加,陆地河流径流增大,河流沉积广泛发育的时期,此时河流水动力和河流水位存在不稳定性,第2层中发现的较多灰白色钙胶结团块,就是该时期河流水位发生经常性升降的产物(潘峰等, 2011)。

阶段B(第3~7层),年代约9107~8613 cal a.BP。以粉砂为主,粒度粗细波动明显(图6),显示了砂和粘粒含量的消长变化,其中,第3、4、5层粘粒含量偏低,砂含量偏高,第6、7层粘粒含量增加,砂含量减

少。从水动力搬运运动能看,C值和M值仍有较大的变化幅度,但最大搬运运动能小于阶段A。该层段内见有可在咸淡水环境下生长的蛤、蚬、螺等生物壳体及其残片,以及指示潮间带环境的毕克卷转虫变种(*Ammonia beccarii* vars.)有孔虫,表明该阶段钱塘江南岸可能发生了海侵,受潮汐和波浪作用影响,沉积动能仍有较大变幅,颗粒分选性也很差,应属潮坪带沉积环境。与邻近地区TJS-1、TJS-2、FX-1、FX-2等钻孔粒度资料(赵亚楠等, 2015)相比,也有较好的相似性。由表5可知,XYC孔B阶段第3、4、5层粒度特征与低潮滩相似,第6、7两层则与中、高潮滩相似,表明了该地区海面上升的过程。

C阶段(第8层下段),其年代约为8613~7330 cal a.BP。以粉砂、粘粒为主,平均粒径变细,不含推移组分,跃移组分含量仅1%~5%,几乎由悬移组分构成,C值小,数值变幅也小,最大搬运运动能弱;M值小,数值变幅亦小,平均搬运运动能较为稳定,属远洋悬浮区静水低能环境,颗粒分选性也是孔柱中最好的一段,鉴于段内仍可见生物壳体及其碎屑,并与前人在杭州湾地区(张桂甲等, 1996; 林春明, 1997; Hori et al, 2001; 王建华等, 2006; 李艳丽, 2010; 骆丁, 2011)和长江三角洲地区(王昕, 2011; 徐涛玉, 2013)钻孔沉积物记录相比,其粒度、岩性与浅海相沉积相似。偏正常盐度的有孔虫类型异地希望虫(*Elphidium advenum*)出现,表明此时受海水影响逐渐增大。这意味着C阶段可能对应于该地区全新世高海面,与前人在周边地区的研究结果具有一致性(薛春汀, 2002; 朱诚等, 2003; 史威等, 2008)。

D阶段(第8层上段~第9层),年代约为7330~5131 cal a.BP。粉砂和粘粒为主,并互为消长,钻孔第8层上段粘粒含量较第8层下段明显增加,至第9层又趋减少;相反,自第8层上段至第9层,粉砂含量则趋于增加。从水动力条件看,仍以高悬移组分为特征,第8层上段不含或几乎不含跃移组分(1%左右),第9层跃移组分增至10%左右,且悬移段粒度累计特征较C阶段复杂,即与浅海环境相比,动力条件的不稳定性有所加强。结合D段沉积物内常夹碳化植物碎屑,第9层内还有2个厚度分别为10 cm和38 cm的泥炭层,有孔虫类型转为近岸半咸水种江苏小希望虫(*Elphidiella kiangsuensis*)等标志,表明沉积区水体相对较浅和低盐,可能指示该阶段海水逐渐退去,堆积作用增强,在低洼处形成

表5 XYC孔第3~7层沉积物与邻近钻孔潮滩相沉积粒度特征比较

Tab.5 Comparison of grain-size features between layer 3 to layer 7 of the XYC Core and tide-flat sedimentation of adjacent cores

钻孔名称	层或沉积类型	参数	(<4 μm)/%	(4~8 μm)/%	(8~32 μm)/%	(32~63 μm)/%	(>63 μm)/%
XYC	⑦	变化范围	7.14~21.07	5.23~23.54	16.36~51.97	4.00~31.72	1.06~54.46
		均值	16.70	14.54	40.04	17.55	11.31
	⑥	变化范围	10.46~29.05	7.77~24.48	18.56~55.05	3.89~28.95	0.63~57.64
		均值	20.93	17.77	40.53	12.86	7.91
	⑤	变化范围	9.15~20.72	6.81~16.51	21.16~41.07	12.08~23.44	10.10~47.95
		均值	16.84	12.72	32.04	17.07	21.34
	④	变化范围	6.05~16.94	4.68~13.59	10.18~37.51	8.90~9.23	20.49~66.84
		均值	11.59	8.62	19.20	12.72	47.87
	③	变化范围	6.85~17.90	4.82~19.26	16.61~57.65	5.66~38.67	0.00~44.65
		均值	10.87	9.26	33.17	25.96	21.81
TJS-1	低潮滩	变化范围	8.60~15.40	4.20~7.10	21.80~38.00	19.00~40.50	16.30~32.10
		均值	12.30	5.70	28.90	28.80	24.40
TJS-2	高潮滩	变化范围	19.30~28.40	13.30~19.80	37.00~44.10	7.90~16.30	4.70~13.70
		均值	24.70	15.20	40.00	12.60	7.50
FX-1	中潮滩	变化范围	15.20~33.80	8.00~16.70	34.70~45.30	9.70~29.10	2.70~12.60
		均值	21.40	11.00	39.50	21.10	7.00
FX-2	中潮滩	变化范围	13.40~29.00	5.60~14.80	33.20~46.10	11.90~34.50	2.60~13.80
		均值	19.20	9.20	41.00	24.20	6.30

湖沼相沉积的过程。D阶段由浅海环境向泻湖—湖沼环境转化,这与前人在宁绍平原地区埋藏泥炭层与中全新世海面变化的研究成果较为一致(史威等, 2008)。

综上所述,XYC孔自下而上经历了河流相—潮坪相—浅海相—湖沼相等沉积相变化过程,沉积相变化初步记录了该地区全新世以来海平面升高,达到高海面之后又海退的过程。

6 结论与讨论

6.1 结论

本文对XYC孔1717个样品进行粒度测试,重点分析粒度及其所指示的水搬运动能特征,结合岩芯观察及典型层段有孔虫等生物信息,探讨该钻孔全新世沉积环境演变特征。初步得到如下结论:

(1) 钱塘江南岸曹娥江下游XYC钻孔沉积物粒度分析结果表明,钻孔沉积物主要以粉砂为主,平均含量69.65%,砂和粘粒消长变化,可划分为粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂、粘土质粉砂等4种岩性,它们在钻孔中交错分布,体现多个粗细变化旋回。

(2) 基于C-M图,根据样品间最大搬运动能和

平均搬运动能的强弱及其变化幅度的差异,再结合钻孔记录中的信息以及与河流边滩沉积、滩涂沉积、浅海沉积、湖沼沉积等典型样品的比对,初步识别出4种沉积相,自下而上依次为河流相、潮坪相、浅海相、湖沼相。

(3) XYC钻孔粒度纵向变化表明,粘粒含量自下而上波动增加,砂含量自下而上波动减少,整体呈现自下而上平均粒径波动变细、分选性变好的趋势。结合自下而上河流相—潮坪相—浅海相—湖沼相的沉积相变化过程,XYC孔记录了该地区约9690~5131 cal a.BP之间的沉积环境演变,显示出全新世以来海面上升,达到高海面继而又海退的过程,与前人在长三角地区的研究结论基本一致。

6.2 讨论

XYC孔记录的沉积相变化信息较好地反映了9690~5131cal a.BP期间该地区海陆交互作用的特征,先是河流沉积动力为主(9690~9107 cal a.BP),继而海面上升(9107~7330 cal a.BP),杭州湾南岸曹娥江下游一带发生海侵,7330 cal a.BP之后海退并转为湖沼静水沉积环境。关于中国东部沿海地区全新世海侵和高海面问题的认识,学术界尚有不同看法,有些学者主张高海面出现于7000 a BP之后(杨

怀仁等, 1984; 赵希涛等, 1994); 另一些学者(朱诚等, 2003; 史威等, 2008; 张瑞虎等, 2011)认为, 高海面出现于7000 a BP之前, XYC孔的研究结论与后者较为一致。另外, XYC孔13.32~27.72 m之间沉积速率很高, 平均为2.9 cm/a, 这可能是海平面升高及曹娥江下游江道淤积加快的结果, 而且海侵过程可能是快速的, 有待于后续研究进一步证实。

致谢: 中国科学院南京地质古生物研究所的李保华老师在XYC钻孔有孔虫分析和沉积环境分析中提供了宝贵帮助, 在此表示真挚的感谢。

参考文献(References)

- 陈桥驿, 吕以春, 乐祖谋. 1984. 论历史时期宁绍平原的湖泊演变[J]. 地理研究, 3(3): 29-43. [Chen Q Y, Lv Y C, Yue Z M. 1984. On the lacustrine fluctuation in the regions of Ningbo-Shaoxing Plain in historical periods[J]. Geographical Research, 3(3): 29-43.]
- 陈小英, 陈沈良, 刘勇胜. 2006. 黄河三角洲滨海区沉积物的分异特征与规律[J]. 沉积学报, 24(5): 714-721. [Chen X Y, Chen S L, Liu Y S. 2006. Sediment differentiation along nearshore zone of the Yellow River Delta[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 24(5): 714-721.]
- 冯利华, 鲍毅新. 2005. 曹娥江出口江道的演变与整治[J]. 水科学进展, 16(1): 52-55. [Feng L H, Bao Y X. 2005. Evolvement of water outlet of Cao'e River and its dredging [J]. Advances in Water Science, 16(1): 52-55.]
- 高抒, Collins M. 1998. 沉积物粒径趋势与海洋沉积动力学[J]. 中国科学基金, (4): 241-246. [Gao S, Collins M. 1998. The use of grain size trends in marine sediment dynamics [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, (4): 241-246.]
- 侯新花, 吴艳宏, 杨丽原. 2006. 全新世镜泊湖粒度特征记录的该地区古降水变化历史[J]. 湖泊科学, 18(6): 605-614. [Hou X H, Wu Y H, Yang L Y. 2006. The Paleo-Precipitation history recorded by the characteristics of grain-size of Lake Jingpo during Holocene[J]. Journal of Lake Sciences, 18(6): 605-614.]
- 胡雪峰, 朱煜, 沈铭能. 2005. 南方网纹红土多元成因的粒度证据[J]. 科学通报, 50(9): 918-925. [Hu X F, Zhu Y, Shen M N. 2005. Grain-size evidence for multiple origins of the reticulate red clay in southern China[J]. Chinese Science Bulletin, 50(9): 918-925.]
- 蒋国俊. 1995. 潮滩悬沙粒度参数的动力沉积学意义[J]. 海洋与湖沼, 26(1): 90-97. [Jiang G J. 1995. The dynamic sedimentological meaning of grain-size parameters of tidal flat suspended sediments[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 26(1): 90-97.]
- 李凤全, 叶玮, 朱丽东, 等. 2010. 第四纪网纹红土的类型与网纹化作用[J]. 沉积学报, 28(2): 346-355. [Li F Q, Ye W, Zhu L D, et al. 2010. The types and formation of quaternary plinthitic red earth[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 28(2): 346-355.]
- 李艳丽. 2010. 晚第四纪以来钱塘江下切河谷充填物特征及古环境演化[D]. 南京: 南京大学: 29-37. [Li Y L. 2010. Characteristics of fill and palaeoenvironment evolution since the late Quaternary in the Qiantang River incised valley[D]. Nanjing, China: Nanjing University: 29-37.]
- 林春明. 1997. 杭州湾地区15000a以来层序地层学初步研究[J]. 地质评论, 43(3): 273-280. [Lin C M. 1997. Sequence stratigraphic study on the Hangzhou Bay since 15000 a B. P.[J]. Geological Review, 43(3): 273-280.]
- 刘东生. 1985. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社. [Liu D S. 1985. Loess and environment[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 骆丁. 2011. 浙江宁波地区第四系特征及岩相古地理研究[D]. 成都: 成都理工大学: 38. [Luo D. 2011. Quaternary Characteristics and lithofacies paleogeography of Ningbo area in ZheJiang[D]. Chengdu, China: Chengdu University of Technology: 38.]
- 吕雁斌, 赵家驹, 黄伟, 等. 2011. 新疆巴里坤湖粒度组分分解及其环境指示意义[J]. 沉积学报, 29(1): 134-142. [Lv Y B, Zhao J J, Huang W, et al. 2011. Decomposition of the grain-size component and its climate implication from lake Barkol, Xinjiang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 29(1): 134-142.]
- 潘存鸿, 蔡军, 施祖蓉, 等. 2000. 曹娥江径流特性及其对河口冲淤的影响[J]. 浙江大学学报: 理学版, 27(6): 671-676. [Pan C H, Cai J, Shi Z R, et al. 2000. Runoff characteristics of Cao'e River and its effect on processes of the estuary[J]. Journal of Zhejiang University: Sciences Edition, 27(6): 671-676.]
- 潘峰, 林春明, 李艳丽, 等. 2011. 钱塘江南岸SE2孔晚第四纪以来沉积物粒度特征及环境演化[J]. 古地理论, 13(2): 236-244. [Pan F, Lin C M, Li Y L, et al. 2011. Sediments grain-size characteristics and environmental evolution of Core SE2 in southern bank of Qiantang River since the Late Quaternary[J]. Journal of Palaeogeography, 13(2): 236-244.]
- 钱塘江志编纂委员会. 1998. 钱塘江志[M]. 北京: 方志出版社. [Qiantang jiang zhi bian zuan wei yuan hui. 1998. Qiantang Jiang Zhi[M]. Beijing, China: Fang Zhi Chu Ban She.]

- 史威, 陈炜. 2012. 古今洪水沉积粒度参数的对比分析[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 31(5): 78-85. [Shi W, Chen W. 2012. Contrastive analysis on grain size parameters of ancient and modern flood deposits[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Edition, 31(5): 78-85.]
- 史威, 马春梅, 焦锋, 等. 2008. 宁绍平原史前遗址、埋藏泥炭与中全新世海面变化[J]. 海洋学报, 30(4): 169-175. [Shi W, Ma C M, Jiao F, et al. 2008. Archaeological sites, buried peat and fluctuation of sea-level in Holocene in the Ningshao Plain in Zhejiang Province, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 30(4): 169-175.]
- 王建华, 周洋, 郑卓, 等. 2006. 杭州湾晚第四纪沉积与古环境演变[J]. 古地理学报, 8(4): 551-558. [Wang J H, Zhou Y, Zheng Z, et al. 2006. Late Quaternary sediments and paleoenvironmental evolution in Hangzhou Bay[J]. Journal of Palaeogeography, 8(4): 551-558.]
- 王昕. 2011. 冰后期以来长江水下三角洲地区沉积作用及沉积环境演化[D]. 青岛: 中国科学院大学: 95-101. [Wang X. 2011. Post-glacial sediment environment evolution of the sub-aqueous Yangtze Delta[D]. Qingdao, China: University of Chinese Academy of Sciences: 95-101.]
- 吴立, 朱诚, 郑朝贵, 等. 2012. 全新世以来浙江地区史前文化对环境变化的响应[J]. 地理学报, 67(7): 903-916. [Wu L, Zhu C, Zheng C G, et al. 2012. Response of prehistoric culture to climatic environmental changes since Holocene in Zhejiang, East China[J]. Acta Geographica Sinica, 67(7): 903-916.]
- 熊尚发, 丁仲礼, 刘东生. 2001. 南方红土元素迁移特征及其古环境意义[J]. 土壤学报, 38(1): 25-31. [Xiong S F, Ding Z L, Liu D S. 2001. Mass balance geochemistry of the red earth in southern China and its environmental implications [J]. Acta Pedologica Sinica, 38(1): 25-31.]
- 徐涛玉. 2013. 全新世以来长江三角洲高分辨率层序地层学研究[D]. 青岛: 中国科学院大学 24-32. [Xu T Y. 2013. The study of high resolution sequence stratigraphy of Holocene in the Yangtze River delta area[D]. Qingdao, China: University of Chinese Academy of Sciences: 24-32.]
- 薛春汀. 2002. 对我国沿海全新世海面变化研究的讨论[J]. 海洋学报, 24(4): 58-67. [Xue C T. 2002. Holocene sea-level change along China coast[J]. Acta Oceanologica Sinica, 24(4): 58-67.]
- 杨怀仁, 谢志仁. 1984. 中国东部近20000年来的气候波动与海面升降运动[J]. 海洋与湖沼, 15(1):1-13. [Yang H R, Xie Z R. 1984. Sea-level changes along the east coast of China over the last 20000 years[J]. Oceanologia ET Limnologia Sinica, 15(1): 1-13.]
- 杨立辉, 叶玮, 朱丽东, 等. 2008. 第四纪加积型红土与黄土的风成相似性探讨[J]. 干旱区地理, 31(3): 341-347. [Yang L H, Ye W, Zhu L D, et al. 2008. Aeolian-genesis comparability of aggraded red earth in South China with loess in North China[J]. Arid Land Geography, 31(3): 341-347.]
- 张桂甲, 李从先. 1996. 冰后期钱塘江河口湾地区的海陆相互作用[J]. 海洋通报, 15(2): 43-49. [Zhang G J, Li C X. 1996. Land-ocean interaction in Qiantangjiang estuarine area since last glaciation[J]. Marine Science Bulletin, 15(2): 43-49.]
- 张瑞虎, 谢建磊, 刘韬, 等. 2011. 长江口水下三角洲沉积物记录的古环境演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 31(1): 1-10. [Zhang R H, Xie J L, Liu T, et al. 2011. Palaeoenvironmental evolution of subaqueous Yangtze Delta inferred from sedimentary records[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 31(1):1-10.]
- 赵希涛, 唐领余, 沈才明, 等. 1994. 江苏建湖庆丰剖面全新世气候变迁和海平面变化[J]. 海洋学报, 16(1): 78-88. [Zhao X T, Tang L Y, Shen C M, et al. 1994. Jiangsu Jianhu Qingfeng poumian Quanxinshi qihou bianqian he haipingmian bianhua[J]. Acta Oceanologica Sinica, 16(1): 78-88.]
- 赵亚楠, 王张华, 吴绪旭, 等. 2015. 长江口现代潮滩沉积物粒度特征及其在沉积相识别中的应用[J]. 古地理学报, 17(3): 405-416. [Zhao Y N, Wang Z H, Wu X X, et al. 2015. Grain size distribution of modern tidal flat sediments at the Yangtze river mouth and its application to identification of sedimentary facies[J]. Journal of Palaeogeography, 17(3): 405-416.]
- 朱诚, 郑朝贵, 马春梅, 等. 2003. 对长江三角洲和宁绍平原一万年来高海面问题的新认识[J]. 科学通报, 48(23): 2428-2438. [Zhu C, Zheng C G, Ma C M, et al. 2003. On the Holocene sea-level highstand along the Yangtze Delta and Ningshao Plain, East China[J]. Chinese Science Bulletin, 48(24): 2428-2438.]
- 朱丽东, 谷喜吉, 叶玮, 等. 2014. 洞庭湖周边地区第四纪红土粒度特征及环境意义[J]. 地理科学进展, 33(1): 13-22. [Zhu L D, Gu X J, Ye W, et al. 2014. Grain-size features of Quaternary red earth in Dongting Lake Area and their paleoenvironmental significance[J]. Progress in Geography, 33(1): 13-22.]
- Doeglas D J. 1968. Grain-size indices, classification and environment[J]. Sedimentology, 10(2): 83-100.
- Flemming B W. 2000. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams

- [J]. *Continental Shelf Research*, 20(10-11): 1125-1137.
- Friedman G M. 1979. Address of retiring President of the International Association of Sedimentologists: Differences in size distributions of populations of particles among sands from various origins[J]. *Sedimentology*, 26(1): 3-22.
- Hori K, Saito Y, Zhao Q H, et al. 2001. Sedimentary facies of the tide-dominated paleo-Changjiang (Yangtze) estuary during the last transgression[J]. *Marine Geology*, 177(3-4): 331-351.
- Liu R, Qin J G, Mei X. 2014. Sedimentary environment changes of the Ningshao Plain since the later stage of the Late Pleistocene: Evidence from palynology and stable organic carbon isotopes[J]. *Quaternary International*, 333: 188-197.
- Passega R. 1957. Texture as characteristic of clastic deposition [J]. *AAPG Bulletin*, 41(9): 1952-1984.
- Sahu B K. 1964. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 34(1): 73-83.
- Shepard F P. 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 24(3): 151-158.

Grain-size and sedimentary records of the XYC Core in the downstream of the Cao'e River

ZHU Lidong, WANG Jun, PEI Haojie, YE Wei, LI Fengquan, MO Dongpo, LIN Haiyi

(College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, Zhejiang, China)

Abstract: Based on the analysis of grain-size constitution and distribution curves of the XYC core in the downstream of the Cao'e River—the central section of the Ningshao plain, we arrived at the following conclusions: (1) According to the grain-size constitution, the sediments of the XYC Core can be divided into four lithologies: silty sand, sandy silt, silt, and clayey silt. They distribute along the core alternately. The core is divided into 9 layers and they compose multiple grain-size combinations. The 9 layers are marked as layer 1 to layer 9 from the bottom to the top. Among them, layer 1 and layer 4 are silty sand, and the percentage of clay is 10%~15%, which is poorly sorted and the dynamics is complicated. Layer 3 and layer 5 are sandy silt, the percentage of silt is no more than 70%, and clay is more than 20%. The percentage of clay is low. Layer 2, layer 7, and layer 9 are silt, the percentage of silt is more than 70%, and clay and sand are less than 20%. Layer 6 and layer 8 are clayey silt, the percentage of silt is more than 70%, and clay is more than 20%. The percentage of sand is very low. (2) According to the C-M graph of the max and the mean values and the analysis of its variation, there were four types of deposits from the bottom to the top: fluvial, tidal flat, shallow marine, and lakes and marshes. For layer 1 and layer 2, the hydrology was high energy and unstable, which indicates a fluvial environment; for layer 3 to layer 7, the max hydrology weakened, but the mean hydrology was strong and the range was still wide, and the hydrology was similar to the SYTT tidal flat samples. It referred to a tidal flat environment; for layer 8 and layer 9, the hydrology was weak and stable, which indicates still water environment. Based on the grain-size and biology information, it can be concluded that the under part of layer 8 belonged to shallow marine environment, but the upper part and layer 9 belonged to lakes and marshes environment. (3) Vertical variation of grain-size indicates that clay increased from the bottom to the top with fluctuation, while sand declined. The average grain diameter is decreasing and the sorting coefficient is higher. The sediments change from the bottom to the top reveals that the XYC Core and its adjacent area experienced sea level rise, and then water level decreased during 9690~5131 cal.a BP. The results of the study are helpful for identifying the paleoenvironmental evolution characteristics of the Qiantang River Basin.

Key words: downstream of the Cao'e River; grain-size; sediment; environmental change of deposit