

# 江苏南通地区晚第四纪下切河谷沉积与环境演变

林春明<sup>1</sup> 张霞<sup>1</sup> 邓程文<sup>1</sup> 王红<sup>2</sup> 冯旭东<sup>1</sup> 刘芮岑<sup>1</sup>

(1.内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室 南京大学地球科学与工程学院 南京 210046;

2.中国地质调查局青岛海洋地质研究所 山东青岛 266071)

**摘要** 采用层序地层学基本原理,以海平面升降旋回为主线,根据钻井岩芯、古生物、测年和分析化验等资料,探讨了江苏南通地区晚第四纪地层层序、层序界面、沉积特征及沉积环境的演变。结果表明,研究区晚第四纪发育三期下切河谷,形成了三套沉积层序,自下而上三个层序的地质时代分别相当于晚第四纪早期、晚第四纪中期和晚第四纪晚期。由于后期河流的强烈下切破坏,早期沉积层序往往被剥蚀殆尽,仅残留下部的河床相粗粒沉积,造成不同期河床相的叠置;相对而言,晚第四纪晚期形成的下切河谷沉积层序以不同的沉积相组合被保存下来,自下而上划分为河床、河漫滩、河口湾、浅海和三角洲5种沉积相类型,表现为一个较完整的沉积层序。晚第四纪晚期下切河谷底界面,是末次冰期海面下降,河流下切形成的侵蚀面,与河间地古土壤层顶面的沉积间断面同属一个地史期的产物,一起构成区域不整合面,界面上下岩性突变,其上的冰后期地层属同一个海平面变化旋回,可互相对比,因而具有年代地层学意义。三期下切河谷层序的套叠结构表明,晚第四纪以来,研究区存在三次“低海面—海侵—高海面—海退”周期性海面变化。

**关键词** 晚第四纪地层 沉积特征 层序界面 下切河谷 江苏南通

**第一作者简介** 林春明 男 1964年出生 博士 教授 沉积学和石油地质学教学与研究 E-mail: cmlin@nju.edu.cn

**通讯作者** 张霞 女 助理研究员 E-mail: zhangxiananjing@163.com

**中图分类号** P534.63 **文献标识码** A

## 0 引言

下切河谷(incised valley)一词最早由 Fisk 提出,用于描述密西西比河三角洲第四纪晚期下切河谷的特征<sup>[1]</sup>。一般是指因海平面下降、河流向盆地扩展并侵蚀下伏地层的下切河流体系,在海平面上升时期被充填的长条状地形,以区域性的地层不整合面为底界<sup>[2]</sup>。从前寒武纪到现代,各个地质时期都有下切河谷形成,下切机制多与海平面升降有关<sup>[2-3]</sup>。近年来,许多作者研究了从晚第四纪低海平面到现代的下切河谷及其沉积充填过程<sup>[4]</sup>。最早报道晚第四纪以来下切河谷存在的是密西西比河地区,下切河谷的宽度最大达 80 km,深逾 120 m<sup>[1]</sup>,然后有法国的 Gironde、Rhône、Charente 和 Leyre 河<sup>[5-6]</sup>,美国东海岸的 James 河<sup>[7]</sup>,加拿大 Salmon 河<sup>[8]</sup>等相继报道了晚第四纪下切河谷的存在。我国晚第四纪以来下切河谷

的研究起步较晚,主要从上世纪 80 年代开始,相继在长江及东海大陆架<sup>[9-12]</sup>、钱塘江<sup>[13-15]</sup>、珠江<sup>[16]</sup>等河口三角洲地区发现了晚第四纪下切河谷。由此可见,晚第四纪下切河谷的研究得到人们越来越多的重视,是当前第四纪地质学、层序地层学和过去全球变化研究的热点和重要内容。随着 20 世纪 80 年代初层序地层学的兴起,对下切河谷的研究也日渐深入。下切河谷和河口湾在近海沉积物的层序地层学解释方面有重要作用,下切河谷的关键界面、充填物沉积特征是建立年代地层格架的主要钥匙,也是层序地层学的焦点问题,它们一旦被认识,便可更好地理解浅海及非海相沉积环境的地层成因和分布。利用下切河谷充填物陆相和海相界限的变化,以及精确的测年分析可以确定古海平面位置,建立较为准确的海平面变化曲线,河谷的切割深度和沉积特征是研究海平面变化的最好素材。另外,下切河谷也常常是油气及金、铅、锌

收稿日期:2015-09-14;收修改稿日期:2015-11-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41572112,41402092);江苏省自然科学基金项目(BK20140604);南京大学“内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室”自主研究基金项目(ZZKT-201321);中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室开放课题(PRP/open-1306) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41572112, 41402092; Natural Science Foundation of Jiangsu Province, No. BK20140604; independent research foundation of State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, No. ZZKT-201321; Open Fund of State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, No. PRP/open-1306]

等的富集场所,是勘探的重要目标<sup>[17]</sup>。因此,对下切河谷的进一步研究有着重要的理论和现实意义。

本文根据钻井岩芯、古生物、测年和分析化验等资料,探讨了江苏南通地区晚第四纪地层结构、下切河谷层序、层序界面的确定、沉积特征及沉积环境的演变。

### 1 研究方法

#### 1.1 岩芯观察与样品采集

本次我们在江苏南通地区海门市南海路南侧利用旋转钻井进行了 ZK02 孔全取芯工作(图 1)。ZK02 孔地面标高 2.3 m,钻孔总进尺 128 m,获得无扰动岩芯 111 m,取芯率 87%。岩芯观察、取样时,首先将岩芯沿纵向剖开,一半作为档案资料留存,一半用于沉积物颜色、岩性、沉积构造、上下层接触关系等的描述、拍照和各类分析化验样品的采集。自孔深 0.12 m 至 128.00 m 分别采集了 50 个粒度、50 个有孔虫、4 个测年样品。

#### 1.2 粒度分析及参数计算

对于粒径小于 2 000 μm 的组分,采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪测试其粒度组成,该仪器粒径分析范围为 0.02~2 000 μm,粒径分辨率为 0.1 φ。具体分析流程<sup>[18]</sup>为:①取 3~5 g 样品放入烧杯中,加入适量浓度为 0.1 mol/L 的盐酸,浸泡至不产生气泡为止,以去除样品中的碳酸盐;②用吸管轻轻吸出上层反应废液,在烧杯中加满蒸馏水,静置 24 小时,直至所有颗粒沉降下来、溶液清亮为止;③用吸管将上层清液吸出,在烧杯中加入适量浓度为 10% 的双氧水,去除样品中的有机质,不断搅动待反应充分后静置 24 小时直到气泡不再产生为止;④小心去除上层反应废液,给烧杯中加满蒸馏水,静置至溶液清亮;⑤用吸管将上层清液吸出,在烧杯中加入适量浓度为 0.5 mol/L 的六偏磷酸钠溶液浸泡 24 h,使样品颗粒彼此分散;⑥用清水将仪器清洗 3~5 遍,洗净仪器内的残留样品;⑦在仪器专用烧杯中注入清水,开启激光粒度仪测量背景值;⑧将适量

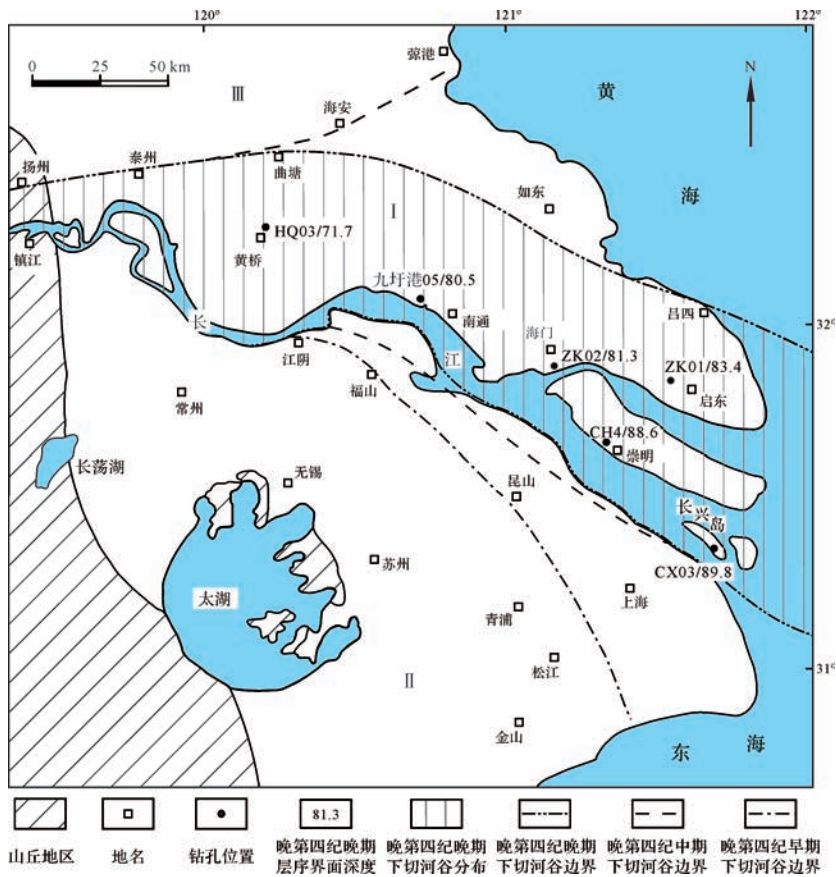


图 1 长江三角洲分区和晚第四纪晚期下切河谷分布图(修改自参考文献[10])

I.三角洲主体,II.三角洲南翼,III.三角洲北翼

Fig.1 Subdivision of the Changjiang River delta area and distribution of the late stage of Late Quaternary incised-valley (modified from reference[10])

预处理后的样品加入测量烧杯,用进样器自带的超声波振荡样品3分钟,以形成高分散的颗粒悬浊液供测定;⑨对样品进行测量,同一样品重复测量多次,挑选重合度最高的曲线以0.25 φ间距输出0.02~2 000 μm粒径区间的沉积物百分含量。

对粒径大于2 000 μm的组分,采用筛析法进行粒度分析。取70 g样品放入烧杯中,加入适量浓度为0.5 mol/L的六偏磷酸钠溶液,用玻璃棒搅拌并静置24小时后,用1 φ间隔的多个标准筛进行筛分,然后对各粒级样品烘干、称重,并计算各粒级组分沉积物的百分含量。该实验在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室完成。

粒度参数的计算利用GRADISTAT程序<sup>[19]</sup>。平均粒径和分选系数的计算公式如下:

$$M_z = \frac{\sum fm}{100} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum f(m - M_z)^2}{100}} \quad (2)$$

式中, $f$ 为每组粒级的频率百分数; $m$ 为对应粒级的中值粒径。粒度和分选系数分级分别参考Udden-Wentworth标准和Folk-Ward分级方案<sup>[18]</sup>。

### 1.3 有孔虫分析

所有有孔虫鉴定样品的处理均采用微体古生物学定量分析标准方法。将沉积物湿样置于温度为60℃的烘箱内烘干后,称取适量干样浸泡于自来水中2~3天,然后以250目铜筛冲洗掉其中的细粒组份,将剩余粗组份湿样置于60℃烘箱内烘干、称重。最后用100目铜筛(孔径154 μm)对粗组份进行干筛,并对大于154 μm组份中的有孔虫进行挑选和鉴定<sup>[18]</sup>。有孔虫的分类鉴定标准参考汪品先等<sup>[20]</sup>,郑守仪和傅钊先<sup>[21]</sup>的属种描述。

### 1.4 测年分析

本次ZK02孔沉积物定年采用加速器质谱放射性同位素碳测年(AMS<sup>14</sup>C)方法,是用以确定原先存活的动物和植物年龄的一种方法,与<sup>14</sup>C常规的测年方法相比,AMS<sup>14</sup>C定年所需样品量小、工作效率高,适用的样品品种丰富,是晚更新世以来地层定年最常用、最可信测年方法之一,其适用测年范围主要为200~50 000年有机物质的年代。本次AMS<sup>14</sup>C定年材料选取贝壳和木屑,由美国BETA实验室完成测试,以1950年为计时零年,<sup>14</sup>C半衰期取5568年,为了与前人测年数据对比,ZK02孔测年采用的是惯用

年龄。

## 2 实验结果

### 2.1 沉积特征

通过对ZK02孔岩芯沉积物颜色、岩性、沉积构造等特征的详细观察,结合粒度分析结果,将取芯井段岩芯自上而下划分为18层(图2),岩性描述如下:

(1) 0.00~0.12 m,棕黄色耕作土,含植物根系。

(2) 0.12~3.20 m,上部0.82 m为灰黄色黏土,见铁质浸染和白云母碎片;下部2.20 m为灰色黏土夹粉砂薄层,黏土含量约为80%,2.50 m处见氧化斑现象。

(3) 3.20~8.10 m,灰色粉砂质细砂与灰绿色砂质粉砂互层,夹黏土薄层。粉砂质细砂为主,约占60%,含较多白云母碎片,平行层理发育,砂质粉砂约占35%,黏土单层厚度约4~10 mm,7.75 m处夹炭屑薄层。

(4) 8.10~16.00 m,为灰黄色砂质粉砂夹灰色黏土薄层,平行层理、波状砂纹层理发育。顶部0.30 m为深灰色黏土夹粉砂条带,8.40~8.90 m和11.20~11.70 m砂泥层因生物扰动强烈而变形。8.50~8.70 m、9.24 m、9.31 m、14.30 m、14.55 m、15.20 m等多处夹炭屑薄层,单层厚度约5~10 mm,局部夹碳屑斑点,直径约4 mm。

(5) 16.00~21.40 m,灰褐色黏土与灰色粉砂质细砂薄互层,黏土层单层厚度约1~4 cm,18~19 m段砂质含量明显升高,19.30 m处夹砂质脉体,厚度约50 mm,主要成分为细砂,20.80 m处夹约10 mm厚的炭屑。

(6) 21.40~23.00 m,上部1.10 m为青灰色细砂夹黏土薄层和条带,细砂中见较多极为破碎的贝壳碎片,偶见完整者,大小约5 mm×2 mm;下部0.50 m为灰色砂质粉砂夹黏土薄层和条带,粒度变细,砂质主要为细砂。

(7) 23.00~36.00 m,上部9.38 m为深灰色淤泥质黏土,夹灰白、灰色细砂、粉砂薄层和团块,富含有机质,26.30 m、26.75~27.00 m、30.50~30.75 m、31.75~32.00 m处夹细砂,其中含较多极为破碎的贝壳碎片,偶见完整者,大小约5 mm×3 mm,壁厚约1 mm。下部3.62 m为深灰色黏土与粉砂互层,局部夹细砂,富含有机质,发育波状-水平层理。

(8) 36.00~44.10 m,上部1.70 m为灰色粉砂质砂,夹泥质条带和团块,发育块状层理。下部6.20 m

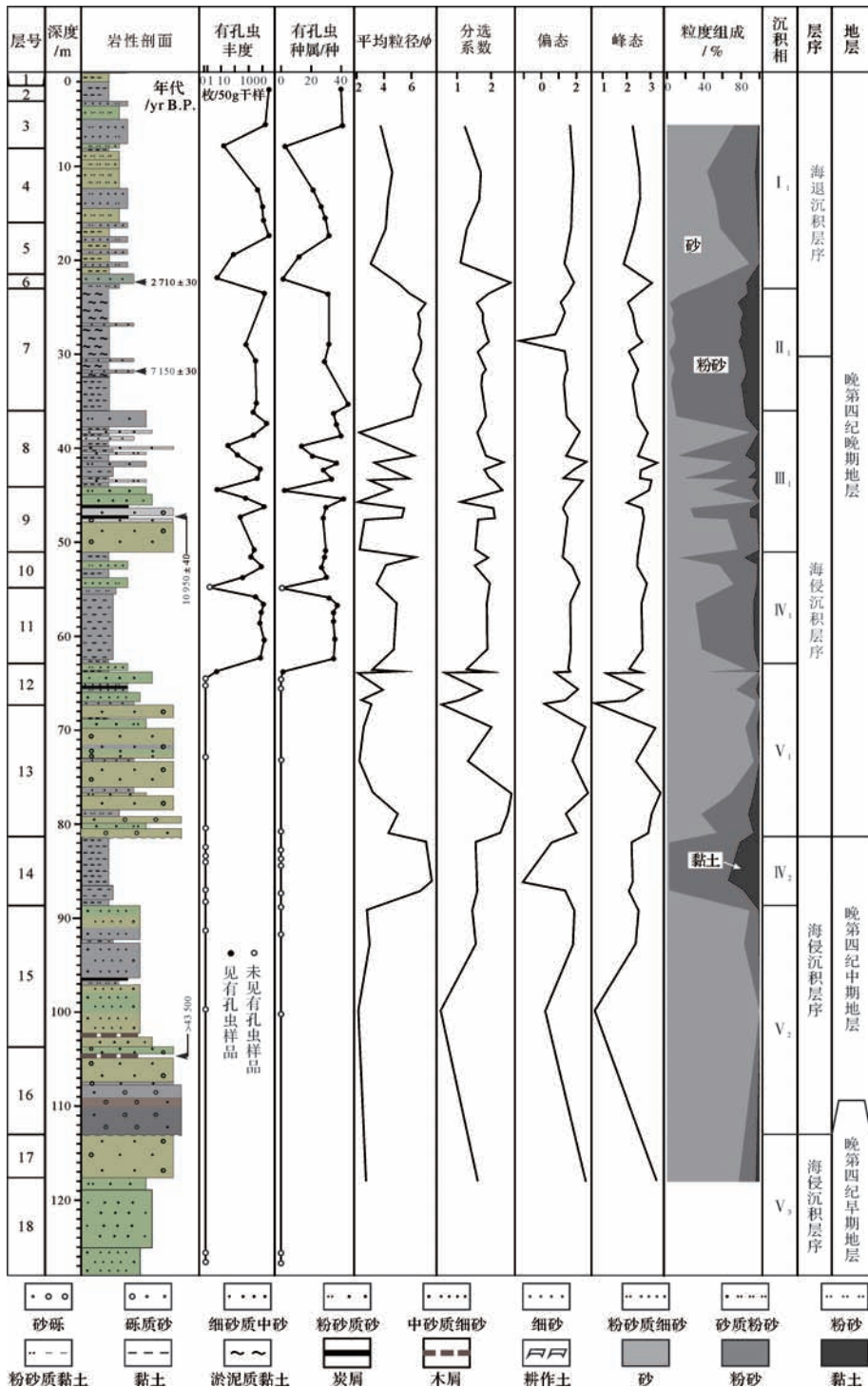


图2 江苏省南通地区 ZK02 孔综合柱状图

a. 晚第四纪早期地层: V<sub>3</sub>—河床相; b. 晚第四纪中期地层: V<sub>2</sub>—河床相, IV<sub>2</sub>—河漫滩相; c. 晚第四纪晚期地层: V<sub>1</sub>—河床相, IV<sub>1</sub>—河漫滩相, III<sub>1</sub>—河口湾相, II<sub>1</sub>—浅海相, I<sub>1</sub>—三角洲相

Fig.2 The columnar section of ZK02 borehole in the Nantong area of Jiangsu Province, China

主要为灰色黏土,夹薄层灰白、灰色含砾粗砂、细砂质中砂、粉砂质砂、细砂等,黏土富含有机质,可与细砂、粉砂互层,发育波状—水平层理、块状层理、平行层理。

(9) 44.10~51.05 m,上部 2.15 m 为青灰色细砂质中砂和粉砂质砂,夹泥质条带和团块,见铁质浸染现象。下部 4.80 m 为灰黄、灰白色砾质粗砂,砾石含量约 10%~15%,砾径约 2~10 mm,次圆状,分选较

好。46.25~47.85 m 段有较多炭屑薄层和斑点,炭屑薄层可达 160 mm 厚,偶见较完整贝壳,大小约 5 mm × 10 mm,壁厚约 2 mm。

(10) 51.05~54.85 m,本层为两个上细下粗的旋回,上部旋回上部 0.95 m 为灰色黏土夹细砂、粉砂薄层和条带,黏土单层厚度约 10~30 mm,细砂、粉砂约 2~12 mm 厚,发育韵律层理;下部 0.85 m 为青灰色粉砂质细砂,局部夹砾质粉砂团块。下部旋回上部 0.95 m 为灰色黏土夹细砂、粉砂薄层或团块;下部 1.05 m 为青灰色粉砂质细砂,53.80~54.00 m 见铁锰浸染现象。

(11) 54.85~62.90 m,灰色粉砂质黏土夹灰白色粉砂薄层,发育水平层理。黏土含量约占 70%,粉砂单层厚度约 2~20 mm。

(12) 62.90~67.35 m,由青灰色细砂质中砂、中砂质细砂、粉砂质细砂等构成,局部夹少量薄层炭屑和灰黄色泥质条带或团块,65.30 m 处炭屑层厚约 10 cm,发育块状层理、平行层理。

(13) 67.35~81.30 m,灰黄、青灰、灰色砾质粗砂、含砾粗砂、砾质细砂、细砂、粉砂质砂、砂质粉砂等,以砾质粗砂为主,砾石多为次棱角一次圆状,分选一般或较差,块状层理和平行层理发育。整体构成多个下粗上细的正旋回,旋回上部为粉砂质砂、细砂等,下部为砾质粗砂、砾质砂等,旋回底界上下岩性突变,为流水冲刷面。

(14) 81.30~88.65 m,深灰色黏土、粉砂质黏土、黏土质粉砂,可见零星贝壳碎片分布,84.80~84.50 m 黏土因有机质含量升高而显黑色。

(15) 88.65~103.70 m,主要为灰、青灰色中砂质细砂,少量细砂质中砂、砂质粉砂等,发育块状层理、平行层理和交错层理,含较多白云母碎片。89.64 m、92.47 m、95.25 m 处分别发育 8 cm、3 cm、5 cm 厚的粉砂质黏土,96.68~97.10 m 为灰色砂质粉砂,96.25~96.40 m 段常夹 3~10 mm 厚炭屑,102.50 m 处夹 17 cm 灰黑色木屑层。

(16) 103.70~113.00 m,黑灰、青灰、灰褐色砂砾石、砾质粗砂。砂砾石和砾质粗砂层砾径一般 2~10 mm 不等,少数可达 15~30 mm,磨圆度为次棱角状、次圆状,分选较差—中等,自下而上,砾石砾径变小,含量减少。104.80 m 处见贝壳碎片,偶见完整者,大小约 12 mm×10 mm。104.45~104.60 m 为灰褐、灰黑色木屑层,木屑呈块状,易剥成片状。

(17) 113.00~117.60 m,灰、灰黄色砾质粗砂、砾

质细砂,局部夹黏土层。砾石粒径一般为 2~5 mm,泥砾粒径最大可达 35 mm,磨圆度为次棱角一次圆状,分选性差。

(18) 117.60~128.00 m,青灰色细砂质中砂、中砂质细砂、粉砂质砂等,120.00~121.50 m 段含少量泥质团块和条带,126.28~126.34 m 为灰黄色黏土层,含白云母碎片。

## 2.2 有孔虫特征

对 ZK02 孔 1.71~126.60 m 段共 50 个沉积物样品做了有孔虫分析,孔深 63.70 m 以下 13 个样品中未见到有孔虫壳体,63.70 m 以上地层除 54.80 m 样品未见有孔虫外,其余样品都见到有孔虫壳体,62.30 m 以浅地层开始大量出现有孔虫,但有的层段有孔虫数量很少(图 2)。

沉积物中的有孔虫类型以底栖有孔虫为主,丰度从数百枚/50 g 干样到数万枚/50 g 干样不等,平均约为 5 438 枚/50 g 干样。底栖有孔虫类型较丰富,单个样品从仅含 1 种到最多 45 种不等,以 30~40 种居多。孔深 63.70 m 以上沉积物样品中共发现 71 种底栖有孔虫,以 *Ammonia beccarii* (Linné) vars.、*Elphidium magellanicum* Heron-Allen et Earland、*Epistominella naraensis* (Kuwano)、*Cribronion vitreum* Wang、*Bolivina robusta* Brady、*Florilus decorus* (Cushman et McCulloch)、*Protelphidium tuberculatum* (d'Orbigny)、*Bulimina marginata* d'Orbigny、*Elphidium nakanokawaense* Shirai、*Nonionella atlanticus* (Cushman)、*Brizalina striatula* (Cushman)、*Astronion tasmanensis* Carter 等为优势种。

浮游有孔虫数量很少,不足有孔虫总量的 1%,且壳体细小,均为幼壳。

## 3 讨论

### 3.1 晚第四纪地层结构与层序界面

#### 3.1.1 地层结构及其控制因素

长江三角洲处在构造沉降带,新构造运动在山区表现为局部上升,在沿海平原区主要表现为缓慢沉降运动,年沉降率以 1~2 mm 居多<sup>[22]</sup>。持续的构造沉降使之接受大量的河流沉积物,形成厚 200~300 m 的第四纪松散沉积层,上部 100~150 m 为陆、海相交互沉积层,以下为河流相沉积层<sup>[10]</sup>。中国沿海地区经历了多次海侵<sup>[23]</sup>,钻井岩芯、测年等资料表明(表 1),长江三角洲晚第四纪形成了三个下切河谷层序,自下而上三个层序的地质时代分别相当于晚第四纪

早期、中期和晚期<sup>[24]</sup>,晚第四纪早期地层主要是距今125 000~60 000 yr B.P.期间沉积的,中期地层主要是距今60 000~25 000 yr B.P.期间沉积的,晚期地层为距今25 000 yr B.P.以来形成的。三期向东南延展的下切河谷具有明显继承性,河谷主体位置逐渐南移,规模也渐次变小,早期下切河谷十分宽广,宽度超过150 km,深度80~140 m;中期下切河谷宽55~80 km,深度70~120 m;晚期下切河谷宽20~70 km,深度30~100 m(图1)<sup>[10,24]</sup>。早期形成的下切河谷层序往往被后期河谷的下切所破坏,仅残留下部的河床相粗粒沉积,造成河床相的叠置,每个侵蚀面的上、下则出现年龄的突变<sup>[25]</sup>;相对而言,晚第四纪晚期(末次冰期以来)形成的下切河谷层序以不同的沉积相组合被保存下来(图2)。下切河谷的形成主要经历了深切、充填和埋藏三个演化阶段<sup>[15]</sup>,三期下切河谷层序的套叠结构表明,晚第四纪以来,研究区存在三次“低海面—海侵—高海面—海退”周期性海面变化。海平面下降时期是下切河谷的形成阶段,海平面上升期是下切河谷的充填阶段,下切河谷主要由河流侵蚀作用形成,并受基岩地质、气候、植被、构造运动和河道作用控制<sup>[10,15]</sup>。研究表明,下切河谷充填具有复杂性,其沉积物可以从非海相经由河口湾相,一直变化为开阔海相<sup>[4]</sup>。河口湾相叠加在河流相之上,河流相通常是盛冰期之后的海侵期下切河谷充填物(图2)。下切河谷及其相关河口湾的沉积演化主要受沉积物供给、水动力条件、气候和海平面变化控制<sup>[15,26-28]</sup>。下切河谷多分布在现代河口三角洲、陆架浅缓坡海洋沉积环境中,河口湾沉积是下切河谷系统的主要组成部分,是下切河谷体系被海淹没部分,接受来自陆地和海域的沉积物,含潮汐、波浪和河流影响的沉积相,湾顶是潮汐沉积物分布的上限,湾口是海岸沉积相分布的下限<sup>[2]</sup>。河口湾仅形成于在相对海平面上升期(即海侵期),一般是海侵过程中,海水溢出下切河谷形成海湾,之后随着沉积物堆积,海湾收缩而成,因此,河口湾在地质上是短暂的<sup>[2]</sup>,它是下切河谷充填的延续。加积使得河口湾遭受充填和破坏,河口湾变成三角洲。一旦河口湾沉积保存下来,就提供了海岸线和环境变化的重要信息。海侵河口湾沉积,一般在垂向剖面底部为河道砂,中部为河—海泥混合物,顶部是潮汐砂,然而,河口湾中沉积相垂向序列取决于河口湾类型和河口湾部位<sup>[29]</sup>。

### 3.1.2 层序界面

层序界面是确定沉积层序的主要依据,下切河谷

两侧壁和底部皆有河流基准面下降及降至最低点时形成的侵蚀面,该侵蚀面通常是识别下切河谷的主要依据,也是划分下切河谷沉积层序,研究其结构的参考依据<sup>[30]</sup>。

根据地层颜色、岩性、古生物、测年和地层层序特征,ZK02孔钻遇长江三角洲晚第四纪早期、中期和晚期三套下切河谷地层(图2、表1),区分不同时期下切河谷沉积层序的主要依据其的底部侵蚀面,即层序界面。ZK02孔钻识别出晚第四纪晚期和中期2个层序界面,晚第四纪晚期沉积层序底界在81.30 m处,为一河流侵蚀不整合面,侵蚀面之下为晚第四纪中期河漫滩相深灰色黏土,之上为晚第四纪晚期河床相灰黄、灰色砾质粗砂、含砾粗砂,岩性及颜色突变明显(图2),较易识别。长江三角洲下切河谷的两翼为古河间地,古河间地曾经暴露地表,发生沉积间断,形成了硬黏土(古土壤),其顶界的沉积间断面虽然与侵蚀面高程相差很大,但它们为同一时期产物<sup>[10,14]</sup>,一起构成区域不整合面,是划分晚第四纪沉积层的可靠标志。不整合面在浅层横波地震剖面上有着较为清楚的响应,而使用简易物探方法,如EH-4电法所得到的电阻率等值线图中,能够将层序界面起伏形态更加清晰地反映出来<sup>[32]</sup>。

冰盛期,海平面下降的幅度大,增加了河流梯度、增强了河流下切作用,河流强烈下切造成河谷底部侵蚀面出现凹凸不平,沿河谷下切方向或自河间地向河谷中部方向有个逐渐变深的自然坡度。从区域上看,黄桥HQ03孔晚第四纪晚期下切河谷层序界面在71.70 m,南通九圩港05孔为80.50 m,崇明CH4孔为88.60 m,在往东南的长兴岛CX03孔为89.80 m<sup>[30]</sup>,再往东南的水下三角洲C38孔已经超过100 m了<sup>[33]</sup>,此外启东ZK01孔为83.40 m<sup>[34]</sup>,从上可见该界面自西北向东南倾斜,而且下切河谷主轴线偏南,在现今的长江入海主流线方向(图1),形成了下切河谷西北部埋藏浅,东南部深,中部埋藏深,两翼埋藏浅的地貌特征。

ZK02孔晚第四纪中期层序界面在113.00 m处,为一河流侵蚀不整合面,侵蚀面之下为晚第四纪早期河床相深灰、灰黄色砾质粗砂、砾质细砂,之上为晚第四纪中期河床相黑灰、青灰色砂砾石层,颜色和岩性突变明显(图2)。位于ZK02孔西北部的南通九圩港05孔,晚第四纪中期层序界面为108.50 m深处(表1),同晚第四纪晚期层序界面相似,自西北向东南逐渐变深。

表1 江苏南通及相邻地区晚第四纪沉积物测年数据

Table 1 Dating of the Late Quaternary sediments from the ZK02 borehole in the Nantong and adjacent regions of Jiangsu Province, China

晚第四纪地层层序	九圩港 05 孔		崇明 CH4 孔		海门 ZK02 孔		
	埋深 /m	<sup>14</sup> C 年龄/ yr B.P.	埋深 /m	年龄/ yr B.P.	测年材料	埋深 /m	<sup>14</sup> C 年龄/ yr B.P.
晚第四纪晚期层序	11.7	5 750±150			贝壳	22.3	2 710±30
	38.8	11 030±1 230			贝壳	31.8	7 150±30
			54.8	12 630±120( <sup>14</sup> C)	贝壳	47.1	10 950±40
层序界面	80.5		88.6			81.3	
晚第四纪中期层序	94.5	34 900±960			木屑	104.5	>43 500
层序界面	108.5					113.0	
晚第四纪早期层序			105.6	95 000±4 700(热释光)			
层序界面			133.2			>128.0	

注:南通九圩港 05 孔测年资料来自参考文献[24];崇明 CH4 孔测年资料来自参考文献[24]和[31];ZK02 孔样品测试由美国 BETA 实验室完成。

一般来说<sup>[14-15]</sup>,研究区暴露成陆始于冰期海平面下降之时,暴露自西向东依次推迟。冰消期海平面上升,发生海侵,海侵自东向西、自下切河谷向两侧漫溢,古地面自东向西逐渐淹没,并接受沉积,因此区域不整合面自海向陆为一穿时面。海平面上升,海侵首先波及河床,下切河谷内开始接受沉积,随后下切河谷内水体逐渐漫溢于河间地,河间地开始接受沉积,因此区域不整合面在平行海岸线方向上也是不等时面。当海平面相对上升速度变慢,逐渐达到其最大位置,海岸线向陆推移最远,此时海底的沉积界面便为最大海泛面。最大海泛面位于浅海沉积层中,是沉积层序中唯一的等时面。最大海泛面之下地层自下而上为河床相、河漫滩、河口湾和浅海相,具有海水逐渐加深和海洋因素影响逐渐变强的特点,它们构成海侵沉积层序;最大海泛面之上地层为浅海相和三角洲相,具有海水逐渐变浅和海洋因素影响逐渐变弱的特点,它们构成海退沉积层序(图2)。

### 3.2 沉积环境解释

ZK02 孔可识别出晚第四纪早期地层河床相( $V_3$ ),晚第四纪中期河床( $V_2$ )和河漫滩相( $IV_2$ ),以及晚第四纪晚期地层,即自下而上划分为河床( $V_1$ )、河漫滩( $IV_1$ )、河口湾( $III_1$ )、浅海( $II_1$ )和三角洲( $I_1$ )5种沉积相类型,表现为一个较完整的沉积层序(图2),各沉积相特征如下。

(1) 晚第四纪早期河床相( $V_3$ ) 位于孔深 113.00~128.00 m,相当于第 17~18 层。下部 10.40 m 为青灰色细砂质中砂、中砂质细砂,局部夹黏土薄层和团块,发育块状层理;上部 4.60 m 主要为灰、灰黄砾质粗砂,见泥砾(图 3a)。下部沉积物岩性均匀、分选较好,粒度分布集中,表明沉积期水动力条件较强、沉积环境较稳定,而上部沉积物粒度变化较大,其中

砂质沉积物的砂组分含量占绝对优势,颗粒粒度粗,分选性变化较大但总体较好(表 2),说明水动力较下部增强,搬运介质扰动较大。该段沉积物颗粒较粗,无有孔虫壳体和贝壳,沉积构造简单,水动力条件较强且未受海洋环境影响,反映了河床相的沉积特征。

(2) 晚第四纪中期河床相( $V_2$ ) 位于孔深 88.65~113.00 m,相当于第 15~16 层,沉积层底界为一河流侵蚀不整合面。沉积物主要为黑灰、青灰、灰褐色砾石层、砂砾层、砾质或含砾粗砂、中砂质细砂组成,见多层木屑(图 3b)和炭屑薄层,整体含白云母碎片。该层段由多个沉积正旋回组成(图 2),旋回内部沉积物粒度向上逐渐减小,砾石含量减少(图 3c)。砂砾石层分选较差,而砂质沉积物颗粒较粗、分布较集中、分选较好(表 2)。砂质沉积物概率累积曲线为以跳跃总体为主的两段式,跳跃总体含量一般在 70%以上,对应直线段倾角约为 65°~70°,悬浮总体不超过 30%,由 2~3 个粒度次总体组成,直线段倾角约 20°~30°,跳跃与悬浮总体的截点在 2~3  $\phi$  之间;频率分布曲线主要为单峰式,少数为双峰,主峰众数值主要分布在 1.5~3.0  $\phi$  之间,次峰众数值多分布在 4~6  $\phi$  之间(图 4)。该段沉积物没有见到有孔虫和软体动物壳体,也缺乏潮汐影响所形成的诸如砂泥互层等典型沉积构造,反映出当时沉积的动力环境已经超过了潮流作用的限制,是一种未受海洋环境影响的水动力较强的河床相沉积。104.50 m 木屑层的 AMS <sup>14</sup>C 测年大于 43 500 yr B.P.(表 1)。

(3) 晚第四纪中期河漫滩相( $IV_2$ ) 位于孔深 81.30~88.65 m,相当于第 14 层,与相  $V_2$  为连续沉积。沉积物主要为块状深灰色黏土、粉砂质黏土、黏土质粉砂,可见少量极为破碎的贝壳,84.80~84.50 m 有机碳含量较高,黏土呈黑色(图 3d),88.60m 处可

表 2 江苏南通地区 ZK02 孔晚第四纪沉积物粒度特征参数

Table 2 Grain-size parameters of Core ZK02 sediments of the Late Quaternary in the Nantong area of Jiangsu Province, China

沉积相	深度 /m	平均粒径/ $\phi$	粒度组成 /%			分选系数	偏态	峰态
			砂	粉砂	黏土			
I <sub>1</sub>	0.12~23.00	2.98~5.03	43.22~88.85	10.58~51.18	0.57~15.07	1.10~2.57	1.35~1.90	1.87~3.06
		/ 4.11 (6)	/ 59.81	/ 35.24	/ 4.95	/ 1.59	/ 1.70	/ 2.43
II <sub>1</sub>	23.00~36.00	5.82~7.01	1.72~15.27	68.90~78.81	14.01~24.73	1.59~1.94	-1.25~1.56	2.06~2.65
		/ 6.48 (10)	/ 6.27	/ 74.42	/19.32	/ 1.77	/ 1.03	/ 2.35
III <sub>1</sub>	36.00~51.05	2.05~6.16	7.90~94.79	4.96~75.79	0.24~16.31	1.10~2.35	1.22~2.58	2.01~3.29
		/ 4.38 (11)	/ 46.85	/ 44.70	/ 8.45	/ 1.91	/ 1.76	/ 2.70
IV <sub>1</sub>	51.05~62.90	3.49~6.28	10.26~71.91	24.09~71.19	3.38~18.55	1.52~1.95	1.24~2.19	2.45~2.85
		/ 4.7 (5)	/41.16	/ 50.97	/ 7.87	/ 1.83	/ 1.71	/ 2.61
V <sub>1</sub>	62.90~81.30	2.11~5.08	30.15~97.98	2.02~61.55	0.00~12.80	0.53~2.59	0.17~2.67	0.66~3.44
		/ 3.35 (11)	/ 74.02	/ 21.88	/ 4.10	/ 1.62	/ 1.64	/ 2.37
IV <sub>2</sub>	81.30~88.65	6.62~7.48	1.56~1.76	63.38~80.21	18.03~35.06	1.53~1.58	-1.05~1.38	2.10~2.25
		/ 7.04 (3)	/ 1.63	/ 73.12	/ 25.25	/ 1.56	/ 0.30	/ 2.19
V <sub>2</sub>	88.65~128.00	2.13~2.91	77.18~100.00	0~18.18	0~4.64	0.52~2.21	0.22~2.56	0.65~3.24
		/ 2.66 (4)	/ 87.25	/ 10.91	/ 1.84	/ 1.44	/ 1.63	/ 2.19

注:2.98~5.03 / 4.11 (6) 表示最小值~最大值 / 平均值 (样品数)。

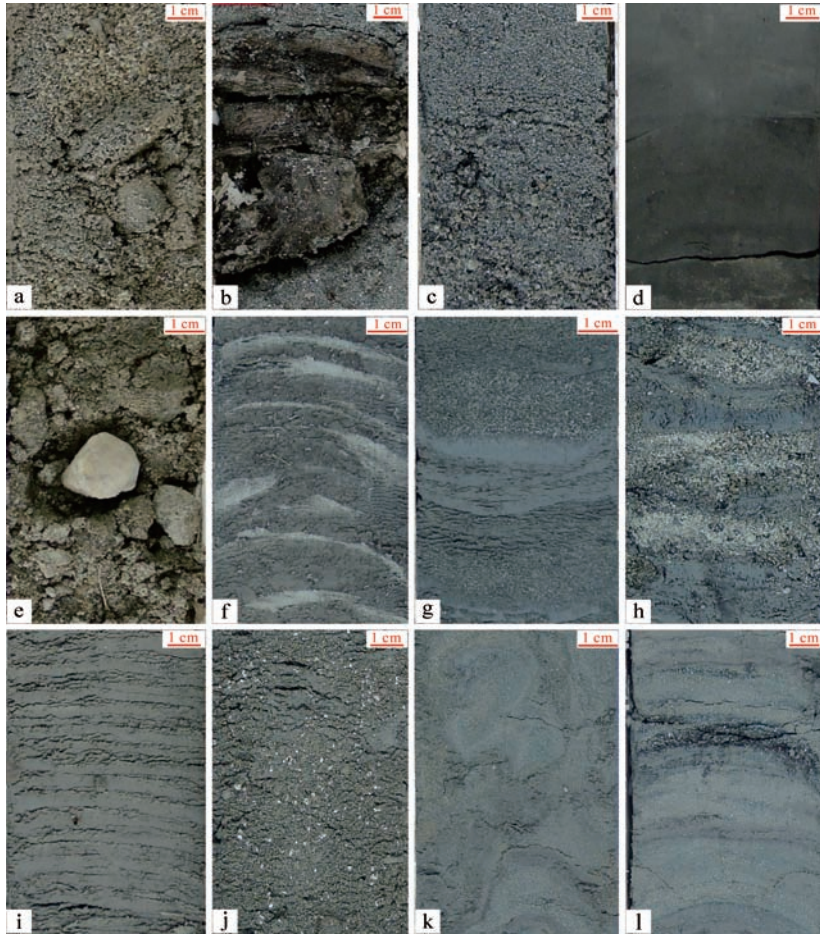


图 3 江苏南通地区 ZK02 孔典型沉积特征

a. 灰黄色砾质粗砂中泥砾, 116.35 m, 相 V<sub>3</sub>; b. 灰褐、灰黑色木屑层, 易剥成片状, 104.45 m, 相 V<sub>2</sub>; c. 砂砾石向上渐变为细砂质中砂, 103.90 m, 相 V<sub>2</sub>; d. 黏土因富含有机质而显黑色, 84.80 m, 相 IV<sub>2</sub>; e. 次棱角状砾石, 粒径约 20 mm, 77.50 m, 相 V<sub>1</sub>; f. 灰色粉砂质黏土夹灰白色粉砂薄层, 57.10 m, 相 IV<sub>1</sub>; g. 灰色粉砂质砂与黏土不等厚互层, 41.50 m, 相 III<sub>1</sub>; h. 灰白色砾质粗砂夹含炭屑薄层的灰色黏土, 47.55 m, 相 III<sub>1</sub>; i. 深灰色黏土与粉砂构成波状—水平层理, 34.75 m, 相 II<sub>1</sub>; j. 细砂层中夹较多白色贝壳碎片, 30.60 m, 相 II<sub>1</sub>; k. 包卷层理, 11.40 m, 相 I<sub>1</sub>; l. 灰黑色炭屑薄层, 14.30 m, 相 I<sub>1</sub>。

Fig.3 Selected photographs of typical sedimentary characteristics from ZK02 borehole in the Nantong area of Jiangsu province, China



见炭屑斑点。砂质沉积物以粉砂为主,平均粒径明显较相  $V_2$  细,偏态波动很大,峰态较稳定(表2)。相应的概率累积曲线形态大致为以悬浮总体为主的两段式,悬浮总体含量可高达 99%,由多个粒度次总体组成,对应直线段倾角约为  $50^\circ \sim 60^\circ$ ,分选性较差,跳跃总体极少,一般在 1%左右,悬浮与跳跃总体的截点在  $4 \phi$  左右;频率分布曲线主要为单峰式,主峰众数值在  $7.0 \sim 8.5 \phi$  之间(图4)。与相  $V_2$  相比,本段的水动力条件变弱,未受海洋环境影响,具有典型河漫滩相的沉积特征<sup>[30]</sup>。

(4) 晚第四纪晚期河床相( $V_1$ ) 位于孔深 62.90~81.30 m,相当于第 12~13 层,沉积层底界为一河流侵蚀不整合面。沉积物主要为砾质砂,其次为砂砾层、粉砂质砂、细砂质中砂和中砂质细砂等,砾石含量约 5%~30%,砾径在 2~15 mm 之间,最大可达 30 mm,成分以石英岩和石英砂岩为主(图 3e),局部可见泥砾。与相  $V_2$  沉积特征相似,由多个粒度向上变细的沉积旋回组成,所不同的是砂质沉积物平均粒径变小、砂组分含量降低、分选性变差、峰态值升高且波动更大(表2)。沉积物概率累积曲线和频率分布曲线特征与相  $V_2$  相似。总之,该段沉积物以粗组分为

主、分选较差、水动力较强、未受海洋环境影响,具有与现代河流沉积相似的岩性和沉积序列,因此可解释为河流体系中的河床沉积<sup>[35-36]</sup>。

(5) 晚第四纪晚期河漫滩相( $IV_1$ ) 位于孔深 51.05~62.90 m,相当于第 10~11 层,与相  $V_1$  呈整合接触。该段下部为灰色、灰褐色粉砂质黏土夹灰白色粉砂薄层(图 3f),上部由两个下粗上细的正旋回组成,均由青灰色粉砂质细砂向上渐变为灰色黏土夹细砂、粉砂薄层或团块,黏土无明显臭味,岩芯较松散,整体色质均匀,本段顶部 53.80~54.00 m 沉积物见铁锰浸染现象,说明沉积物遭受过氧化过程,可能为间断性暴露地表。偶见姜结石,粉砂质黏土与粉砂互层而呈波状-水平层理,并见平行层理、韵律层理和交错层理。黏土中砂质沉积物以粉砂和砂为主,较相  $IV_2$ ,其平均粒径变粗,分选性更差,峰态波动范围更大(表2)。沉积物概率累积曲线和频率分布曲线特征与相  $IV_2$  相似。有孔虫开始大量出现,但局部层位未见有孔虫壳体,底栖有孔虫丰度为 321~10 432 枚/50 g 干样,优势种以 *A. beccarii* vars.、*E. magellanicum*、*E. naraensis* 和 *C. vitreum* 为主,浮游有孔虫的丰度也较大,有孔虫群落特征显示此阶段沉积环境受海

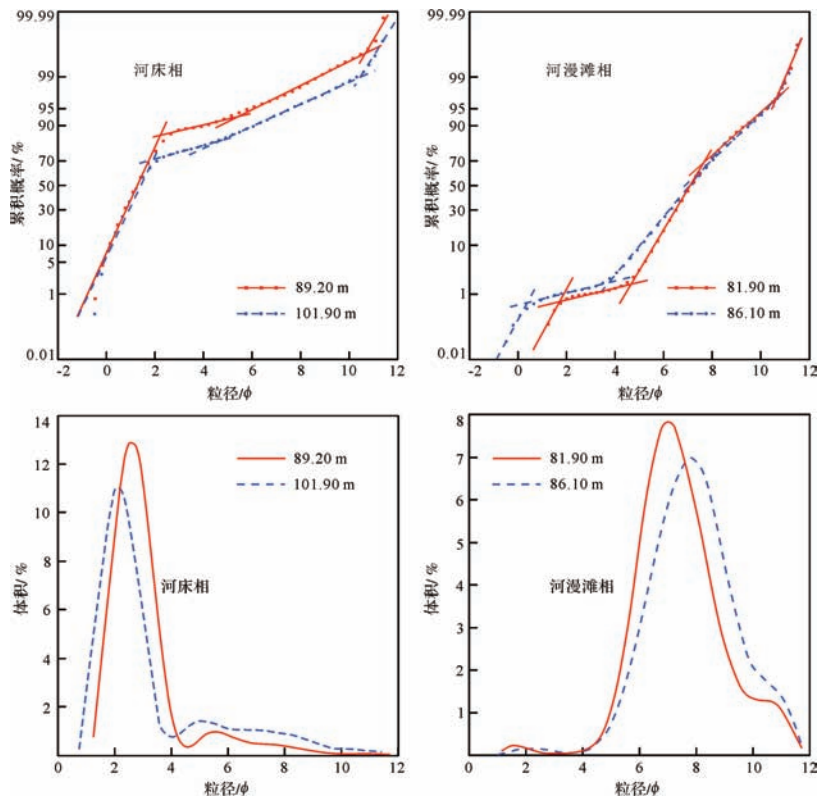


图4 江苏南通地区 ZK02 孔晚第四纪中期沉积物概率累积曲线和频率分布曲线特征

Fig.4 Probability accumulation and frequency distribution curves of sediments of the middle stage of Late Quaternary in Core ZK02, Nantong area, Jiangsu province, China

水影响明显。综上所述,此段沉积物可能为间断性暴露地表、受海水影响的河漫滩相沉积。

(6) 晚第四纪晚期河口湾相(III<sub>1</sub>) 位于孔深36.00~51.05 m,相当于第8~9层,与相IV<sub>1</sub>为连续沉积。该段下部6.95 m为灰黄色、灰白色砾质粗砂和青灰色细砂质中砂、粉砂质砂,砾质粗砂中的砾石含量约10%~15%,砾径约2~10 mm,次圆状,分选较好;上部8.10 m为灰色粉砂质砂和黏土(图3g),夹薄层灰白、灰色含砾粗砂、细砂质中砂、细砂等,砂中常夹泥质条带和团块,黏土富含有机质,具轻微臭味,与细砂、粉砂互层,发育波状—水平层理、块状层理、平行层理,见少量白云母碎片。47.85~46.25 m有较多炭屑薄层和斑点(图3h),炭屑薄层最厚可达16 cm,偶见较完整的贝壳,大小约5 mm×10 mm,壁厚约2 mm,含少量白云母碎片。对本段的砂质沉积物进行粒度分析,结果显示以砂和粉砂组分为主,沉积物各组分含量、平均粒径、偏态、峰态等粒度参数波动范围较大且频繁(表2)。概率累积曲线主要为两段式,以跳跃总体为主,含量约70%,对应直线段倾角在70°左右,悬浮总体约30%,由2~3个粒度次总体组成,直线段倾角在20°~30°之间,跳跃与悬浮总体的截点在1~2 φ之间;频率分布曲线为双峰式,主峰众数值在2 φ左右,次峰众数值约为5 φ(图5)。沉积

物粒度特征表明该沉积时期水体较为动荡,沉积环境不稳定。有孔虫含量较高,但丰度和种数波动较大,底栖丰度为4~17 728 枚/50 g 干样,优势种主要为 *A. beccarii* vars.、*C. vitreum*、*E. naraensis*、*E. magellanicum*、*F. decorus*、*B. robusta*、*B. marginata* 和 *A. tasmanensis*,有孔虫特征表明该沉积期受海水影响强烈。47.1 m 贝壳的 AMS <sup>14</sup>C 测年 10 950±40 yr B.P.(表1)。

(7) 晚第四纪晚期浅海相(II<sub>1</sub>) 位于孔深23.00~36.00 m,相当于第7层,直接覆盖在相III<sub>1</sub>之上。该层段沉积物下部3.62 m由4~10 mm左右的深灰色黏土与粉砂不等厚互层组成,局部夹细砂,富含有机质,具轻微臭味,发育波状—水平层理(图3i);上部9.38 m为深灰色淤泥质黏土夹灰白色、灰色细砂、粉砂薄层和团块,富含有机质,具轻微臭味,细砂夹层中含较多极为破碎的贝壳碎片(图3j),偶见完整者,大小约5 mm×3 mm,壁厚约1 mm。砂质沉积物以粉砂组分为主,黏土和砂含量较少,平均粒径较相III<sub>1</sub>细,分选性差,偏态以正偏为主且有少量负偏,峰态较稳定(表2)。概率累积曲线呈略向上凸的一段式,几乎均为悬浮总体,由多个粒度次总体组成,粒径主要分布在5~9 φ之间,直线段倾角在50°左右;频率分布曲线主要为单峰式,粒度分布较宽,主峰众数值在6~8 φ之间(图5)。上述特征反映出沉积期是弱水动

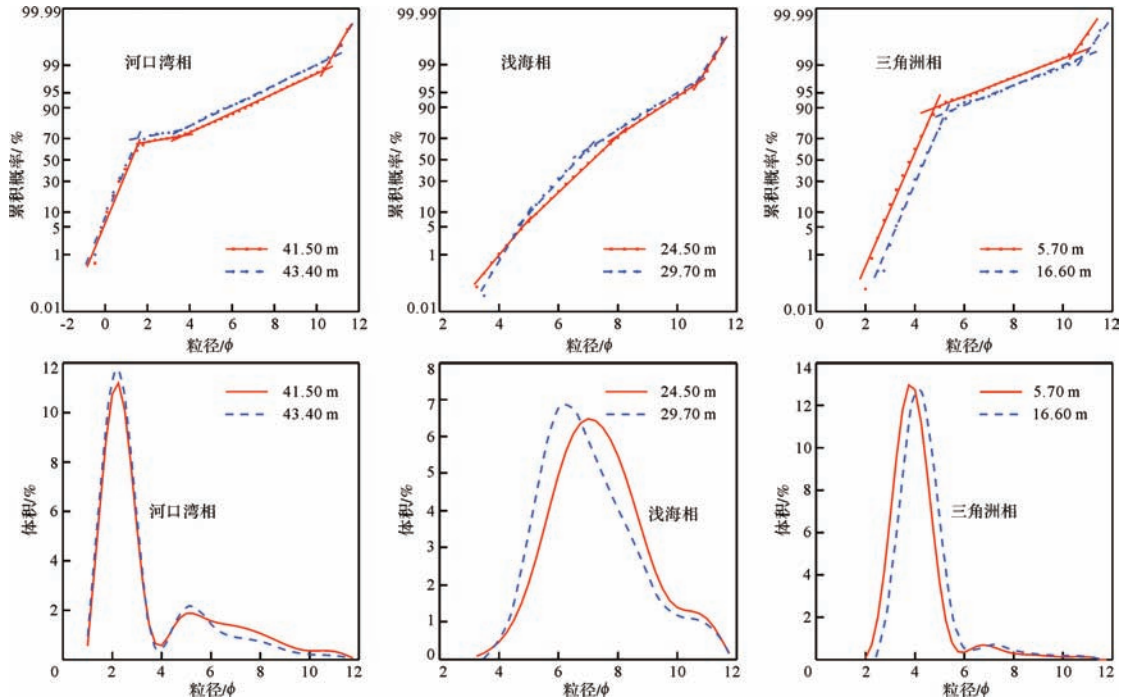


图5 江苏南通地区 ZK02 孔晚第四纪晚期沉积物概率累积曲线和频率分布曲线特征

Fig.5 Probability accumulation and frequency distribution curves of sediments of the late stage of Late Quaternary

力条件,沉积环境相对稳定。

该层段有孔虫丰度相对稳定,底栖有孔虫为 462~12 192 枚/50 g 干样,以 *A. beccarii* vars.、*C. vitreum*、*E. naraensis*、*E. magellanicum*、*F. decorus* 和 *P. tuberculatum* (d'Orbigny) 为优势种,底栖有孔虫丰度较低,一般为 26~992 枚/50 g 干样。底栖有孔虫以广盐性近岸生活的温带型和广温属种居多,化石群与中国东部沿岸海域的现代生物群相似,属种相当,生活在浅海区<sup>[23]</sup>。31.8 m 贝壳的 AMS <sup>14</sup>C 测年 7 150 ± 30 yr B.P.(表 1)。

(8) 晚第四纪晚期三角洲相(I<sub>1</sub>) 位于孔深 0.12~23.00 m,相当于第 2~6 层。该段沉积物由砂质粉砂、粉砂质细砂、泥质粉砂、中砂质细砂、含细砂粉砂、含中砂细砂构成,以砂质粉砂、粉砂质细砂为主,水动力条件复杂,沉积构造多样,发育水平层理、平行层理、块状层理、爬升波纹层理、包卷层理(图 3k)、波状沙纹层理等,整体见白云母碎片,上部见多层炭屑薄层(图 3l)和铁质浸染现象,局部见贝壳碎片。见多层炭屑薄层,单层厚度约 5~10 mm,局部夹炭屑斑点,直径约 4 mm。粒度分析表明沉积物主要为砂、粉砂组分,与相 II<sub>1</sub>相比,平均粒径变粗,分选性变好,偏态更稳定(表 2)。概率累积曲线为以跳跃总体为主的两段式,跳跃总体含量约 80%~90%,对应直线段倾角在 65°~70°左右,悬浮总体含量约占 10%~20%,直线段倾角在 20°左右,跳跃和悬浮总体的截点约为 5 φ;频率分布曲线主要为单峰式,主峰众数值主要分布在 4~5 φ 之间(图 5)。该段沉积物颗粒较粗,分选性较好,以跳跃搬运为主,反映当时水体较为动荡,水动力条件相对较强。底栖有孔虫最为丰富但丰度变化范围较大,一般在 4 枚/50 g 干样到 22 272 枚/50 g 干样之间,优势种以 *E. naraensis*、*A. beccarii* vars.、*B. robusta*、*C. vitreum*、*E. magellanicum*、*F. decorus* 和 *B. marginata* 为主,浮游有孔虫丰度最大可达 4 992 枚/50 g 干样。22.3 m 贝壳的 AMS <sup>14</sup>C 测年 2 710 ± 30 yr B.P.(表 1),这与前人认为三角洲相主要是在距今 3 000 年以来形成的观点一致<sup>[37]</sup>。

## 4 结论

(1) 以下切河谷底部的侵蚀面及河间地古土壤层顶面为层序界面,据此将江苏南通地区晚第四纪地层划分为三个层序,主体为三个下切河谷层序,自下而上三个层序的地质时代分别相当于晚第四纪早期、中期和晚期。三期向东南延伸的下切河谷具有明显

继承性,河谷主体位置逐渐南移,规模也渐次变小,早期下切河谷十分宽广,宽度超过 150 km,深度 80~140 m;中期下切河谷宽 55~80 km,深度 70~120 m;晚期下切河谷宽 20~70 km,深度 30~100 m。

(2) 晚第四纪晚期下切河谷底界面,是末次冰期海面下降,河流下切形成的侵蚀面,界面上下岩石颜色和岩性都发生突变,与河间地古土壤层顶面的沉积间断面同属一个地史期的产物,可互相对比,一起构成区域不整合面,因而具有年代地层学意义。侵蚀面起伏不平,沿河谷下切方向或沿河谷边缘向中部方向有个逐渐变深的自然坡度,即出现下切河谷西北部埋藏浅,东南部深,中部埋藏深,两翼埋藏浅的地貌特征。

(3) 早期形成的下切河谷层序往往被后期河谷的下切所破坏,仅残留下部的河床相粗粒沉积,造成河床相的叠置,相对而言,晚第四纪晚期形成的下切河谷层序以不同的沉积相组合被保存下来,自下而上划分为河床、河漫滩、河口湾、浅海和三角洲 5 种沉积相类型,表现为一个较完整的沉积层序。三期下切河谷层序的套叠结构表明,晚第四纪以来,研究区存在三次“低海面—海侵—高海面—海退”周期性海面变化。

致谢 本论文研究过程中得到徐振宇、魏乃颀、殷勇、殷启春、蒋义敏、鲁超、汪谦等人热忱指导和帮助,在此致以衷心的感谢!

## 参考文献(References)

- 1 Fisk H N, McFarlan D J. Late Quaternary deltaic deposits of the Mississippi River-local sedimentation and basin tectonics[J]. Geological Society of America Bulletin Special Paper, 1955, 62: 279-302.
- 2 Dalrymple R W, Zaitlin B A, Boyd R. A conceptual model of estuarine sedimentation[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1992, 62: 1130-1146.
- 3 Harris P T, Heap A, Passlow V, et al. Tidally incised valleys on tropical carbonate shelves: an example from the northern Great Barrier Reef, Australia[J]. Marine Geology, 2005, 220(1/2/3/4): 181-204.
- 4 Allen G P, Posamentier H W. Sequence stratigraphy and facies model of an incised valley fill: the Gironde estuary, France[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1993, 63(3): 378-391.
- 5 Weber N, Chaumillon E, Tesson M, et al. Architecture and morphology of the outer segment of a mixed tide and wave-dominated-incised valley, revealed by HR seismic reflection profiling: the paleo-Charente River, France[J]. Marine Geology, 2004, 207(1/2/3/4): 17-38.
- 6 Féliens H, Lericolais G, Posamentier H W. Comparison of wave-and tide-dominated incised valleys: specific processes controlling systems

- tract architecture and reservoir geometry [J]. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 2010, 181(2): 171-181.
- 7 Nichols M M, Johnson G H, Peebles P C. Modern Sediments and facies model for a microtidal coastal plain estuary, the James Estuary, Virginia[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1991, 61(6): 883-899.
  - 8 Dalrymple R W, Zaitlin B A. High-resolution sequence stratigraphy of a complex, incised valley succession, Cobequid Bay-Salmon River estuary, Bay of Fundy, Canada[J]. *Sedimentology*, 1994, 41(6): 1069-1091.
  - 9 陈中原,杨文达. 长江河口地区第四纪古地理古环境变迁[J]. *地理学报*, 1991, 46(4): 436-448. [Chen Zhongyuan, Yang Wenda. Quaternary paleogeography and paleoenvironment of Changjiang River estuarine region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1991, 46(4): 436-448.]
  - 10 李从先,汪品先. 长江晚第四纪河口地层学研究[M]. 北京:科学出版社,1998:1-197. [Li Congxian, Wang Pinxian. *Researches on Stratigraphy of the Late Quaternary Period in Yangtze River Mouth* [M]. Beijing: Science Press, 1998: 1-197.]
  - 11 刘振夏, Berne S, L'ATALANTE 科学考察组. 东海陆架的古河道和三角洲[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(1): 9-14. [Liu Zhenxia, Berne S, L'ATALANTE Scientific Party. Paleochannels and paleodeltas in the continental shelf of the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(1): 9-14.]
  - 12 李广雪,刘勇,杨子赓,等. 末次冰期东海陆架平原上的长江古河道[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*, 2004, 35(3): 284-289. [Li Guangxue, Liu Yong, Yang Zigeng, et al. Ancient Changjiang channel system in the East China Sea continental shelf during the last glaciation[J]. *Science in China Seris D: Earth Sciences*, 2005, 48(11): 1972-1978.]
  - 13 李从先,陈刚,钟和贤,等. 冰后期钱塘江口沉积层序和环境演变[J]. *第四纪研究*, 1993, 13(1): 16-24. [Li Congxian, Chen Gang, Zhong Hexian, et al. Sedimentary sequence and environmental evolution of Qiantang estuary during postglacial period[J]. *Quaternary Sciences*, 1993, 13(1): 16-24.]
  - 14 林春明,黄志诚,朱嗣昭,等. 杭州湾沿岸平原晚第四纪沉积特征和沉积过程[J]. *地质学报*, 1999, 73(2): 120-130. [Lin Chunming, Huang Zhicheng, Zhu Sizhao, et al. Late Quaternary sedimentary characteristics and processes in the Hangzhou Bay coastal plain [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(2): 120-130.]
  - 15 Lin Chunming, Zhuo Hongchun, Gao Shu. Sedimentary facies and evolution in the Qiantang River incised valley, Eastern China[J]. *Marine Geology*, 2005, 219(4): 235-259.
  - 16 韦惺,吴超羽. 全新世以来珠江三角洲的地层层序和演变过程[J]. *中国科学:地球科学*, 2011, 41(8): 1134-1149. [Wei Xing, Wu Chaoyu. Holocene delta evolution and sequence stratigraphy of the Pearl River Delta in South China[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2011, 54(10): 1523-1541.]
  - 17 Lin C M, Gu Lianxing, Li G Y, et al. Geology and formation mechanism of late Quaternary shallow biogenic gas reservoirs in the Hangzhou Bay area, eastern China[J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(5): 613-625.
  - 18 李艳丽,林春明,张霞,等. 钱塘江河口区晚第四纪古环境演化及其元素地球化学响应特征[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(5): 822-836. [Li Yanli, Lin Chunming, Zhang Xia, et al. Paleoenvironment evolution during the late Quaternary in the Qiantang River mouth area: evidence from the SE2 core sediment and its rare earth elements geochemistry[J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(5): 822-836.]
  - 19 Blott S J, Pye K. Graidstat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(11): 1237-1248.
  - 20 汪品先,章纪军,赵泉鸿,等. 东海底质中的有孔虫和介形虫[M]. 北京:海洋出版社,1988:1-438. [Wang Pinxian, Ji Zhangjun, Zhao Hongquan, et al. Foraminifera and ostracod in the bottom of the East China Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 1988: 1-438.]
  - 21 郑守仪,傅钊先. 中国动物志:粒网虫门、有孔虫纲、胶结壳有孔虫[M]. 北京:科学出版社,2001:1-788. [Zheng Shouyi, Fu Zhaoxian. *The Fauna Sinica, Phylum Granuloreticulosa, Foraminifera, Agglutinated foraminifera*[M]. Beijing: Science Press, 2001: 1-788.]
  - 22 胡惠民,黄立人,杨国华. 长江三角洲及其邻近地区的现代地壳垂直运动[J]. *地理学报*, 1992, 47(1): 22-30. [Hu Huimin, Huang Liren, Yang Guohua. Recent crustal vertical movement in the Changjiang River delta and its adjacent area[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1992, 47(1): 22-30.]
  - 23 汪品先,闵秋宝,卞云华,等. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究[J]. *地质学报*, 1981, 55(1): 1-13. [Wang Pinxian, Min Qiubao, Bian Yunhua, et al. Strata of Quaternary transgressions in east China: a preliminary study[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1981, 55(1): 1-13.]
  - 24 张家强,张桂甲,李从先. 长江三角洲晚第四纪地层层序特征[J]. *同济大学学报*, 1998, 26(4): 438-442. [Zhang Jiaqiang, Zhang Guijia, Li Congxian. Characteristics of the Late Quaternary stratigraphic sequence in the Changjiang River delta area[J]. *Journal of Tongji University*, 1998, 26(4): 438-442.]
  - 25 李从先,范代读,杨守业,等. 中国河口三角洲地区晚第四纪下切河谷层序特征和形成[J]. *古地理学报*, 2008, 10(1): 87-97. [Li Congxian, Fan Daidu, Yang Shouye, et al. Characteristics and formation of the Late Quaternary incised-valley sequences in estuary and delta areas in China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(1): 87-97.]
  - 26 Kvale E P, Archer A W. Paleovalley fills: trunk vs. tributary[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(6): 809-821.
  - 27 Zhang Xia, Lin Chunming, Dalrymple R W, et al. Facies architecture and depositional model of a macrotidal incised-valley succession (Qiantang River estuary, eastern China), and differences from other macrotidal systems[J]. *The Geological Society of America Bulletin*, 2014, 126(3/4): 499-522.
  - 28 Zhang Xia, Dalrymple R W, Yang Shouye, et al. Provenance of Holocene sediments in the outer part of the Paleo-Qiantang River estuary, China[J]. *Marine Geology*, 2015, 366: 1-15.
  - 29 Boggs S J. *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*[M]. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2000: 356-363.
  - 30 李保华,王强,李从先. 长江三角洲亚三角洲地层结构对比[J].

- 古地质量, 2010, 12(6): 685-698. [Li Baohua, Wang Qiang, Li Congxian. Correlation of stratigraphic architecture of sub-deltas of Changjiang River delta [J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(6): 685-698.]
- 31 孟广兰, 韩有松, 王少青. 东海长江口晚第四纪孢粉组合及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1989, 9(2): 13-26. [Meng Guanglan, Han Yousong, Wang Shaoqing. Late Quaternary sporopollen assemblages and their geological significance in the Changjiang River mouth area of the east China sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1989, 9(2): 13-26.]
- 32 Li Yanli, Lin Chunming. Exploration methods for late Quaternary shallow biogenic gas reservoirs in the Hangzhou Bay area, eastern China[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(11): 1741-1759.
- 33 李从先, 范代读. 全新世长江三角洲的发育及其对相邻海岸沉积体系的影响[J]. 古地质量, 2009, 11(1): 115-122. [Li Congxian, Fan Daidu. Development of the Holocene Changjiang delta and its influence on adjacent coastal sedimentary systems [J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(1): 115-122.]
- 34 林春明, 张霞, 徐振宇, 等. 长江三角洲晚第四纪地层沉积特征与生物气成藏条件分析[J]. 地球科学进展, 2015, 30(5): 589-601. [Lin Chunming, Zhang Xia, Xu Zhenyu, et al. Sedimentary characteristics and accumulation conditions of shallow-biogenic gas for the late Quaternary sediments in the Changjiang River delta area[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(5): 589-601.]
- 35 Li Congxian, Wang Ping, Sun Heping, et al. Late Quaternary incised-valley fill of the Yangtze delta (China): its stratigraphic framework and evolution[J]. Sedimentary Geology, 2002, 152(1/2): 133-158.
- 36 张霞, 林春明, 高抒, 等. 钱塘江下切河谷充填物沉积序列和分布模式[J]. 古地质量, 2013, 15(6): 839-852. [Zhang Xia, Lin Chunming, Gao Shu, et al. Sedimentary sequence and distribution pattern of filling in Qiantang River incised valley [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(6): 839-852.]
- 37 曹光杰, 王建. 长江三角洲全新世环境演变与人地关系研究综述[J]. 地球科学进展, 2005, 20(7): 757-764. [Cao Guangjie, Wang Jian. An overview of the research on the environmental evolution and human-environment relationship in Holocene epoch of the Yangtze delta[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(7): 757-764.]

## Sedimentary Characteristics and Environmental Evolution of the Late Quaternary Incised-Valley Fills in the Nantong Area of Jiangsu Province, China

LIN ChunMing<sup>1</sup> ZHANG Xia<sup>1</sup> DENG ChengWen<sup>1</sup> WANG Hong<sup>2</sup>  
FENG XuDong<sup>1</sup> LIU RuiCen<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China;

2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** This paper studies the sedimentary characteristics, stratigraphic sequence, sequence boundary and environmental evolution of the Late Quaternary incised-valley fills in the Nantong area, Jiangsu Province, based on the detailed analyses of core lithology, paleontology, <sup>14</sup>C dating, and so on. The results show that there are three episodes of incised valley developed in the study area resulting in the formation of distinct sedimentary sequences, which correlate to the early stage, the middle stage, and late stage of late Quaternary, respectively, and showing three episodic sea-level change “low sea level-transgression-high sea level-regression”. The early two systems are incomplete due to the late strong incision and erosion, and are characterized by the superposition of fluvial sediments; while the last postglacial sequence is relatively complete with five sedimentary facies generated, i.e., the fluvial channel, floodplain, estuary, shallow marine, and delta. The basal erosional surface of the lastglacial incised valley fill, which was formed during the Last Glacial Maximum due to fluvial incision, can be correlated with the surface of stiff clay on the interflaves, indicating a significant chronostratigraphic nature.

**Key words:** Late Quaternary stratum; sedimentary characteristics; sequence boundary; incised valley; Nantong area of Jiangsu province