

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020022801

晚更新世以来台湾浅滩西北近岸沉积特征与古环境演化

赵东波¹, 孙荣涛², 蒋恒毅², 李董²

1. 福建省海岛与海岸带管理技术研究重点实验室, 福建海洋研究所, 厦门 361013

2. 山东理工大学资源与环境工程学院, 淄博 255000

摘要:对取自台湾浅滩西北部福建东山岛外的浅钻 ZK2 孔进行了包括 AMS¹⁴C 测年、粒度、微体古生物、碎屑矿物和黏土矿物等分析。结果表明该孔地层中存在两个明显的海相层和其间的两个陆相层, 顶部的海相层为全新世高海平面以来形成的被现代潮流作用改造的现代沉积和残留沉积混合物; 底部陆相层为 MIS4 期低海平面时期形成的河流沉积; 中间的细粒沉积层又可划分为下部形成于 MIS3 期的以潟湖、潮坪和盐沼交替出现的海相沉积层, 以及上部形成于 MIS3 期末到盛冰期出露水面之前的陆上沟谷充填沉积; 台湾海峡南部在 MIS3 期之后发生了明显的构造沉降过程, 但是在末次盛冰期海峡南部仍然出露水面之上形成了沉积间断面。本文研究内容为今后在台湾浅滩西北边缘到福建东南近岸区深入开展沉积学、地层学及古环境演化研究提供了新的参考。

关键词:沉积特征; 古环境演化; 晚更新世; 台湾浅滩

中图分类号: P736.21 **文献标识码:** A

Sedimentary characteristics and paleoenvironmental evolution of the northwest coast of the Taiwan Shoal since Late Pleistocene

ZHAO Dongbo¹, SUN Rongtao², JIANG Hengyi², LI Dong²

1. Fujian Provincial Key Laboratory of Coast and Island Management Technology Study, Fujian Province, Fujian Institute of Oceanography, Xiamen 361013, China

2. School of resources & environment engineering, Shandong University of technology, Zibo 255000, China

Abstract: ZK2, a shallow drilling core taken from the northwest Taiwan Shoal off the coast of the Dongshan Island, Fujian Province, is studied for establishing the stratigraphic sequence and paleoenvironmental evolution of the shoal. According to the data of AMS¹⁴C dating, grain size, micro-paleontology and detrital and clay minerals, two marine strata and two terrestrial strata are recognized. The top marine stratum is a mixture of modern sediments and the late Pleistocene relict deposits formed by tidal current since the Holocene high sea level, and the bottom terrestrial layer is a fluvial deposit formed during the MIS4 when the sea level was low. The fine-grained strata in the middle can be further divided into two layers. The lower layer is formed in MIS3 in a frequently changing environment from lagoon, to tidal flat or salt marsh, while the upper layer is the filling deposits in incised valleys formed during the period from MIS3 to the peak of LGM. The southern Taiwan Strait had experienced obvious tectonic subsidence during MIS3, but emerged above the sea level in LGM and left a hiatus or discontinuity behind. This paper provides some new evidence for further research of sedimentology, stratigraphy and paleoenvironmental evolution of the region from the northwestern margin of the Taiwan Shoal to the southeast coastal area of the Fujian Province.

Key words: sedimentary characteristics; paleoenvironmental evolution; Late Pleistocene; Taiwan Shoal

从构造背景而言, 台湾海峡属于典型具有挤压特征的弧后盆地, 其基底构造单元异常复杂, 第四纪以来这一区域大部分时期处于持续隆起状态, 引

起相应阶段沉积记录的缺失。从区域环境背景来看, 台湾海峡处于东海、南海与开放洋区相互作用的关键地带, 海气相互作用强烈, 且陆源物质、近海

资助项目:福建省科技计划项目“台湾浅滩西北部沉积环境研究”(2016R1006-2); 福建省海岛与海岸带管理技术研究重点实验室开放课题“晚更新世以来台湾浅滩古环境演化过程研究”(CIMTS-2016-02); 国家自然科学基金“末次冰期以来西太暖池—主流区系温、盐梯度对全球快速气候变化事件的响应”(41576054)

作者简介:赵东波(1979—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事海洋地质、海洋沉积学研究, E-mail: 68551924@qq.com

通讯作者:孙荣涛(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事海洋微体古生物与古环境研究, E-mail: rtsun@sdut.edu.cn

收稿日期:2020-02-28; **改回日期:**2020-08-31. 文凤英编辑

自生物质以及黑潮流系搬运物质在此互相混杂,使得这一区域的沉积层明显有别于我国其他海域。因此在台湾海峡附近深入开展地层、沉积过程以及古环境演化过程研究,不仅可以揭示这一区域晚近地质时期构造演化和海平面升降规律,了解区域古环境演化机制,而且可以为预测未来区域环境演化趋势、制定防灾减灾策略等工作提供可靠的参考资料。

台湾浅滩作为台湾海峡的主要沉积亚区之一^[1-2],其沉积速率高、地层相对完整,是开展区域沉积学、地层学和古环境演化过程研究的理想场所。前人在这一区域针对沙脊和沙波发育的现代过程开展了深入研究^[3-4];关于浅滩潮流砂体的来源,蓝东兆等指出浅滩的中粗砂是在10~20 kaBP由单向水流搬运和沉积形成的,不属于河流相或滨岸相,而且台湾海峡在晚更新世低海面时期没有出露成陆^[5];刘振夏等则认为台湾浅滩兼具残留沉积和现代沉积的特征^[6];蔡爱智等则指出冰后期台湾浅滩经历了三角洲、海岸海滩以及现代浅滩的演化过程^[7]。这些研究多是基于尺度较短的重力柱状样研究取得,而对于更深部地层层序以及沉积环境演化过程的工作罕有报道,近几年只有王利波等在浅滩西部的40 m浅钻TWS1208的粒度特征和地震数据的基础上识别出了三期海相层,分别形成于深海氧同位素5.1期、3期和1期,而陆相层则可能形成于4期和2期,其中的沙波基底来自于冰后期的海侵过程,而全新世高海面后才形成了沙波的主体^[8],但截至目前未见关于该孔粒度和浅剖资料之外的其他数据发表。

显然,目前为止在台湾海峡尤其是台湾浅滩这一海域开展的沉积学和古环境演化研究仍然不够充分,因此,本文对取自台湾浅滩西北部长度40 m的浅钻样品进行低分辨率的综合指标分析,对浅滩西北部的地层结构、海侵期次、沉积特征等开展初步研究,为后期开展高分辨率的古环境研究打下基础。

1 研究区地质和水文环境特征

台湾浅滩位于台湾海峡南部,从福建东山、诏安和澳东的南澳向东及东北扩展到澎湖群岛,面积约13000 km²,地理中心位置在23°N、118°30' E附近,基底是周边被陡坎围限的构造台地,平均水深仅20 m左右。浅滩上沉积了白垩系、渐新统一中新统及上新统一更新统,一般厚度不足1000 m,最薄小于500 m,为一套浅海相、滨海相、海陆过渡相陆源碎屑沉积,局部夹有玄武岩层^[9]。浅滩底质主要

由粗砂和砂组成,其上密布着NNE-SSW、N-S向的潮流沙脊和近E-W向的沙波。浅滩西北近岸靠近福建沿岸,岸线曲折,岛屿港湾密布,附近主要的河流包括北部的九龙江和南部的韩江,这两条大河的年输沙量分别为2.23和7.3 Mt^[10-11],另有众多小型的山溪型河流的输沙量也不可忽视。

浅滩附近属于亚热带海洋性季风气候,四季气候温和,日照充足,雨量丰沛。根据东山县气象站和海洋站资料,本区多年平均气温为21.2℃,7、8月平均气温为27.5℃;2月平均气温为13.3℃。多年平均降水量为1071.2 mm,全年降水主要集中在春、夏季(3—8月),占全年的61%以上。浅滩附近大风盛行,多年平均风速为7.1 m/s,强风向为NE,多年平均大风(≥8级)日数为122 d,台风影响频繁,平均每年5.1个,出现≥4 m高的巨浪天数超过160 d,风浪最高可达9.5 m,涌浪最高可达7 m。福建沿海是风暴潮多发区,东山海洋站记录1961—2013年共发生台风暴潮256次,年平均4.8次,台风暴潮发生时间多集中在7—9月,台风过程最大增水≥1.0 m的有15次,过程最大增水1.52 m。台湾海峡表层海流流向随季节和盛行风向而变化,但底层的海流流向基本不变,终年向北流动^[12]。沿岸流系对海峡附近也有明显影响,夏季浙闽沿岸流的南下趋势很弱,一般进不了台湾海峡,而冬季在东北季风驱动下,低温、低盐且富含营养盐的浙闽沿岸流沿海峡西岸向南流动,最远可达汕头附近。台湾海峡附近属于非正规半日潮,以M2分潮占主导,多年平均潮位为0.46 m,平均潮差为2.33 m,多年平均潮流流速0.46 m/s,最大可达0.8 m/s^[13],而浅滩处的最大流速达1.2 m/s以上^[14]。

2 材料与方法

ZK2孔(23°30'38.44"N、117°30'55.94"E)是福建海洋研究所2015年6月在福建东山岛岸外获取的浅钻,其位置正处于台湾浅滩西北边缘向近岸水域的过渡带上(图1)。柱长40.2 m,取样水深37.35 m。钻探设备采用XY-2型岩芯钻机,采用套管跟进且泥浆护壁、回旋钻进或重锤击进全孔取芯的施工工艺。砂质沉积物取芯率平均70%以上,泥质沉积物取芯率平均85%以上,总平均取芯率79%。此次分析以1 m间隔在中间部位取样,根据每个回次的进尺和取芯率,将取样深度换算为实际深度,最终共取样40个。除黏土矿物只对下部28个样品进行分析以外,其他测试指标均分析了40个样品。

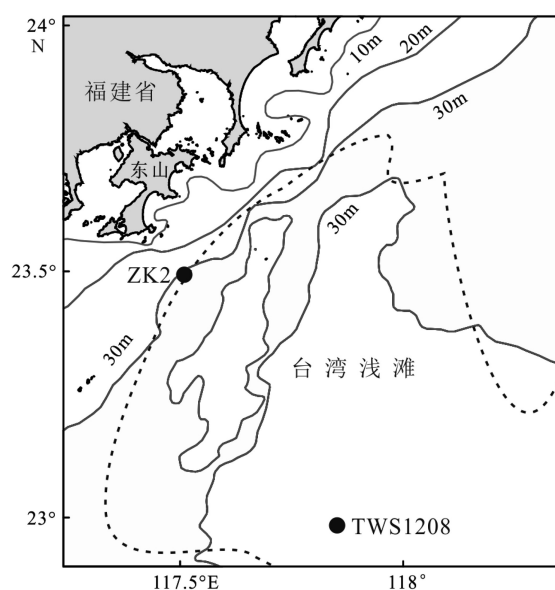


图 1 台湾浅滩西北部 ZK2 孔取样站位
虚线为台湾浅滩范围^[15]。

Fig.1 The map of Taiwan Shoal and location of ZK2^[15]
outlined by dash line.

在 4 个层位挑取不少于 10 mg 的底栖有孔虫混合种壳体送美国 Beta 实验室进行 AMS¹⁴C 测年, 挑样中尽量挑取新鲜、完整的壳体, 排除再沉积壳体的“老碳”造成的误差; 另有 1 个下部层位挑取完整的木炭送样测年。

粒度分析在山东理工大学分析测试中心完成。样品先分别利用双氧水和稀盐酸彻底去除有机质和除钙质胶结物后, 将大于 2 mm 的砾级组分筛出, 间隔 0.5 Φ 称重后换算为质量百分比; 细粒沉积物使用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 3000 型激光粒度仪进行分析, 仪器量程为 0.01~3 200 μ m, 结果统计粒度范围为 -1~12 Φ ; 各项粒度参数均根据 GB/T 12763.8-2007 规定的 Folk-Word 法计算得出。

微体古生物分析在山东理工大学海洋地质研究所完成。各样品均取 50 g 左右的干样经过充分浸泡后利用孔径 0.063 mm 的标准筛冲洗并烘干。根据微体化石通用鉴定流程, 鉴定时将干的粗碎屑再过 0.15 mm 标准筛后, 对粗样中的微体化石进行鉴定统计。对于微体化石丰度较大的样品采用二分法鉴定分别统计 1/2、1/4、1/8……的样品中的全部化石, 对于丰度较高的样品, 底栖有孔虫鉴定数量不少于 200 枚, 介形虫鉴定数量不少于 80 瓣, 对于丰度较低的样品则统计全部微体化石。

碎屑矿物分析在山东理工大学海洋地质研究所完成。各样取沉积物干样 50 g, 去离子水充分浸泡后, 加入少量的偏磷酸钠溶液分散样品, 然后利

用双氧水和稀盐酸分别去除有机质和钙质胶结物, 然后依次用 0.063、0.125、0.25 mm 孔径的标准筛对沉积物进行筛分。称取 5 g 粒级为 0.063~0.125 mm 的细砂组分, 加三溴甲烷重液对轻、重矿物进行分离并分别称重, 得到轻、重矿物相对含量。矿物的鉴定采用实体显微镜观察和偏光显微镜油浸法结合进行, 各样品鉴定矿物颗粒数在 400 颗以上。

因为柱状样上部层位黏土粒级含量极低难以提取, 所以仅对深度 12 m 以下层位进行了黏土矿物分析, 测试在中国科学院海洋地质与环境重点实验室完成。各样取 5 g 左右的干样, 分别利用浓度为 10% 的过氧化氢溶液和 10% 的稀盐酸去除有机质和碳酸盐, 再以超声波振动充分分散后用斯托克斯沉降法提取样品并浓缩、涂片、风干后得到自然片。XRD 分析利用德国产 D8 Advance 衍射仪, 每个样品经乙二醇蒸气 100 $^{\circ}$ C 饱和和处理 1 h 后分别扫描, 扫描角度 3 $^{\circ}$ ~30 $^{\circ}$ 2 θ , 步长 0.02 $^{\circ}$, 取 5 个样品进行了自然片和加热片的 XRD 分析以准确识别黏土矿物组成。衍射曲线用 TOPAS2.0 软件进行分析, 对黏土矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石和绿泥石)相对含量主要用 (001) 晶面衍射峰的面积比, 采用 Biscay(1965)的方法, 17 \AA 衍射峰面积 \times 1 为蒙脱石的权重强度; 10 \AA 衍射峰面积 \times 4 为伊利石的权重强度; 7 \AA 衍射峰面积 \times 2 为高岭石和绿泥石合计的权重强度, 绿泥石和高岭石的含量比例从绿泥石的 (004) (3.54 \AA) 和高岭石的 (002) (3.58 \AA) 的衍射峰面积求出, 四者强度最后校正为含量 100%。另外, 利用乙二醇曲线计算伊利石的化学指数, 即 5 \AA / 10 \AA 峰面积比, 比值小于 0.5 代表物理风化强, 反之代表化学风化强; 参考 Petschick 等的方法使用乙二醇曲线伊利石 10 \AA 的积分宽度 IB 来计算伊利石结晶度^[16], 可反映沉积物物源变化。

3 结果

3.1 柱状样年代框架与沉积单元划分

利用 Calib 8.2 软件将测得的 ¹⁴C 年龄转换为日历年龄^[17]。年龄转换时选用 Marine20 曲线, 全球海洋碳储库偏离量 (ΔR) 参照 Yoneda 等在台湾西北近岸的数据, 设置为 113 \pm 37 a^[18]。本文及附近参考站位测年结果如表 1 所示。

根据测年结果, 结合 ZK2 孔的岩性、微体古生物、粒度参数等各项参数, 我们将该孔划分为 3 个主要的沉积单元, 12 m 以上的 U1 单元大致代表了

表1 ZK2孔和邻近TWS1208孔 AMS¹⁴C 测年数据
Table 1 AMS¹⁴C ages from Core ZK2 and adjacent TWS1208

岩芯	层位/m	测试材料	绝对年龄/aBP	日历年/cal. aBP	来源
ZK2	3.5	底栖有孔虫	3 780±30	3 410	本文
	7.5	底栖有孔虫	4 540±30	4 393	本文
	17.5	底栖有孔虫	35 790±280	39 846	本文
	20.5	底栖有孔虫	35 910±280	39 938	本文
	36.5	木炭	>43 500	>43 500	本文
TWS1208	7.06	贝壳	3 210±30	2 871	王利波等 ^[8]
	9.51	贝壳	5 400±40	5 649	王利波等 ^[8]
	26.52	贝壳	>43 500	>43 500	王利波等 ^[8]

全新世高海平面以来的沉积,其底部与U2单元呈假整合接触;31~32 m处有较为明显的侵蚀间断面,其下的U3沉积单元可能代表了深海氧同位素4期(MIS4期)低海平面阶段的沉积;U2单元内部又可以以15 m为界作为划分陆相和海陆过渡相的界限,其上部的沉积层可能对应着末次盛冰期(MIS2期)的陆相沉积,下部为末次冰期中的间冰阶(MIS3期)的海陆过渡相沉积(图2)。

3.2 ZK2孔岩性及粒度特征

ZK2孔垂向岩性变化较大,U1单元主要以灰色到灰黄色细砂为主,上部层位含砾石;U3单元主要为深灰色到灰黑色中砂,局部含有少量粉砂质黏

土,下部层位含砾石;U2单元以灰黑色含粉砂黏土为主,部分层段含有较高的有机质,有腐臭味。U1和U3单元沉积颗粒粗,意味着沉积环境的水动力强;而U2单元以细粒沉积物为主,但该单元内平均粒径波动较大,说明沉积环境很不稳定(图2)。

ZK2孔沉积物分选程度较差,即使是上部的U1单元分选系数均值也达到2.43,说明即使是在潮流沙脊顶部沉积物也未能被水流彻底分选,但是这一阶段分选系数较为稳定;而同样以粗粒沉积物为主的U3沉积单元分选程度则很差,分选系数均值高达4.17,意味着其沉积环境跟U1单元明显不同,结合其他指标推测该单元应当属河流相,机械沉积分异作用极不充分,造成了沉积物的粗细混杂堆

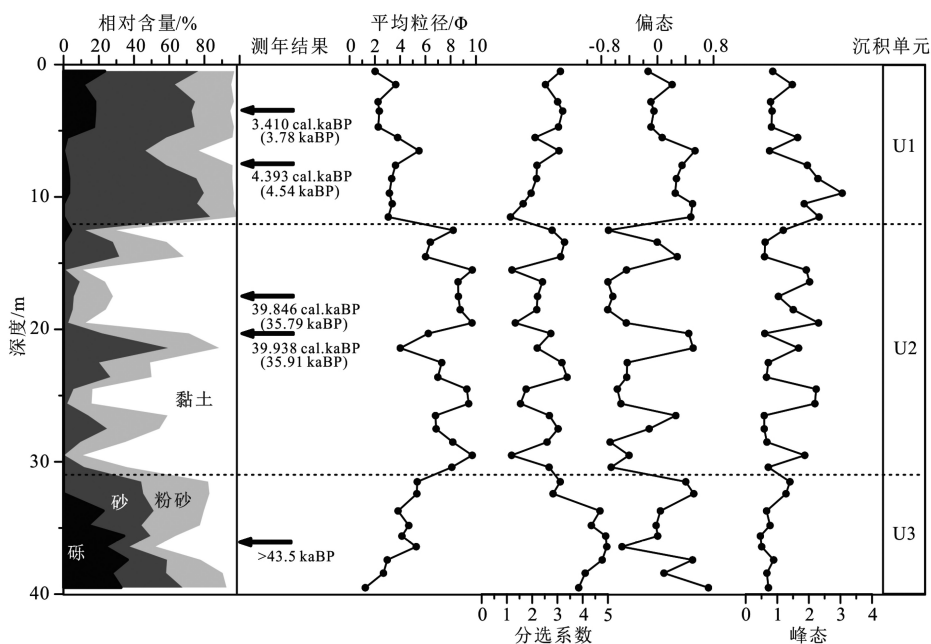


图2 ZK2孔粒度参数变化曲线和 AMS¹⁴C 年代控制点

Fig.2 Downcore variations of grain-size parameters and AMS¹⁴C age control points of Core ZK2

积。U2沉积单元分选系数均值仅有2.39,但波动频繁,且幅度较大,平均粒径波动趋势与分选系数呈反向变化,说明这一阶段沉积物越细,分选越好,总体而言U2沉积单元形成过程中动力较弱,但沉积环境很不稳定。U1单元和U3单元呈现较为稳定的正偏态,均值分别为0.19和0.20,而U2单元呈现以负偏态和正偏态交替出现的趋势,同样说明沉积环境复杂多变。

从ZK2孔各单元的沉积物频率分布和累积曲线上可以看出,U1单元粒度分布范围很大,频率曲线存在推移组分和跃移组分两个明显的峰,3 Φ 左右的跃移组分为主峰,峰态尖锐,说明跃移组分分选良好,其中5m以上在粗粒推移组分范围存在明显的次峰,而在细粒悬移部分存在若干个弱峰,分选较差,累积曲线上也存在明显的三段式分布(图3)。U2单元基本不含推移组分,因此概率曲线呈现以跃移组分和悬移组分为主的两个主峰,其中悬移组分主峰形态尖锐,众数为9~10 Φ ,说明悬移组分分选良好,占总质量的30%~80%;相对而言跃移组分峰值并不集中,主峰宽缓,分选相对较差。U3单元粒度分布范围大,尤其其下部层位推移组分是柱内最高阶段,因此其多数层位概率曲线主峰出现在推移粒度,而在跃移和悬移部分弱峰很多,没有明显的优势粒度,表明其分选程度极差,弱峰形态都比较宽缓,因此这一阶段峰态值很低,从沉积特征来看这一阶段明显不同于U1单元,应属于未能充分淘洗的河流沉积。

3.3 微体古生物组合变化

ZK2孔上部底栖有孔虫丰度相对较高,向下呈递减趋势(图4),40个样品中只有24个层位发现底栖有孔虫个体,共鉴定出底栖有孔虫29属共60种,其中占全群2%以上的优势种共12个,主要包括异地希望虫 *Elphidium advenum*(Cushman)(占16.52%)、美丽星轮虫 *Asterorotalia pulchella*(d'Orbigny)(占12.87%)、毕克卷转虫 *Ammonia becarii*(Linné) var.(占9.29%)、日本半泽虫 *Hanzawaia nipponica* Asano(占9.06%)、同现孔轮虫 *Cavarotalia annectens*(Parker & Jones)(占8.41%)、拉马克五块虫 *Quinqueloculina larmarckiana* d'Orbigny(占5.23%)等。介形虫出现概率与底栖有孔虫类似,但只有18个层位发现介形虫个体,共鉴定出介形虫25属共32种,优势种共11个,主要包括舟耳形介 *Aurila cymba*(Brady)(占20.78%)、美山双角花介 *Bicornucythere bisanensis*(Okubo)(占20.29%),布氏棘艳花介

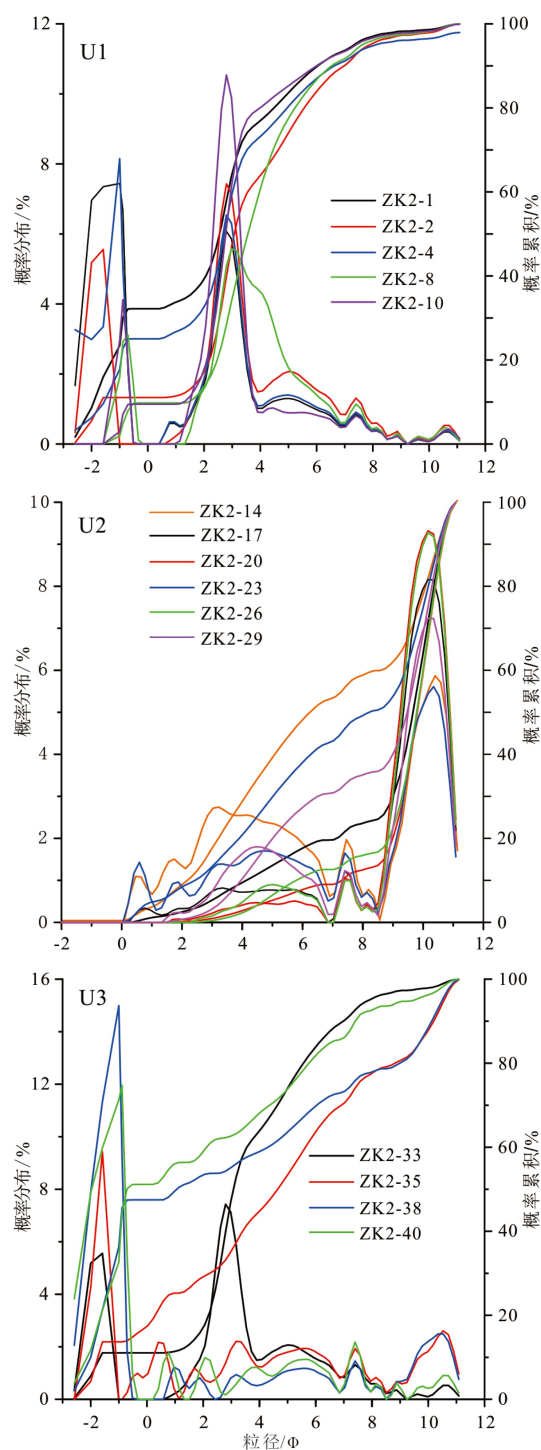


图3 ZK2孔各沉积单元代表层位粒度概率累积曲线和频率分布曲线

Fig.3 Grain-size probability cumulative curves and frequency distribution curves of representative samples from each sedimentary unit in Core ZK2

Echinocythereis bradyformis Ishizaki(占8.22%)、凹陷中华丽花介 *Sinocytheridea impressa*(Brady)(占8.02%)、台湾弯贝介 *Loxoconcha taiwanensis* Zhao(占7.19%)、皱新单角介 *Neomonoceratina crispata* Hu(占5.99%)、三浦翼花介 *Cytheropteron miurense* Hannai(占4.85%)等。

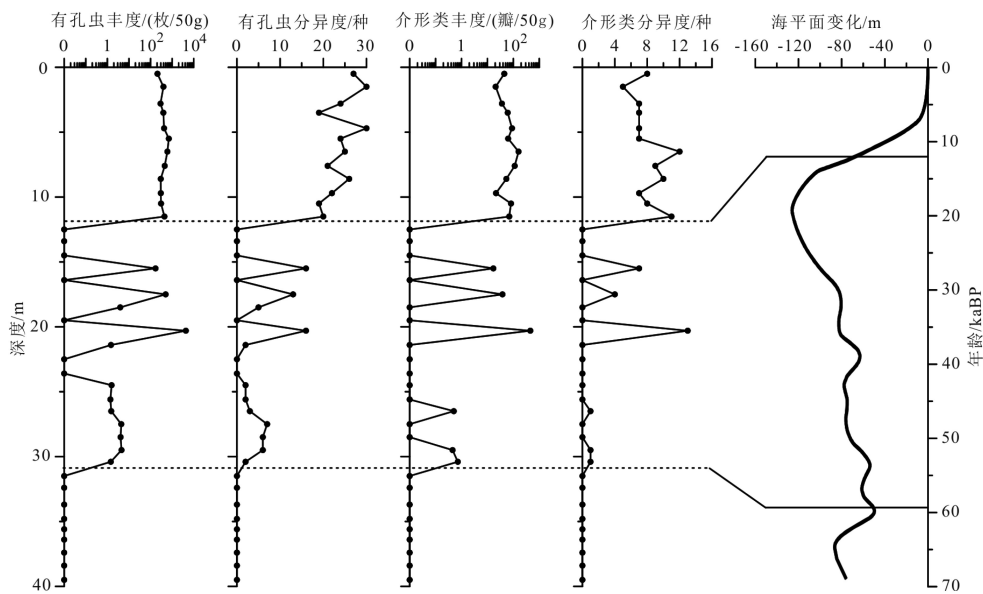


图4 ZK2孔底栖有孔虫、介形类丰度、分异度变化与海平面变化^[19]的关系

Fig.4 Correlation of downcore variations of abundances and species numbers of benthic foraminifera and ostracoda and their relation with global sea-level changes^[19]

U3 沉积单元中未发现任何微体生物化石, 由于 20.3 m 处的年代控制点为 39976 cal. aBP, 而 36.5 m 处则超过 43350 aBP, 因此推测 U3 单元可能是 MIS4 期低海平面时期的沉积。

U2 沉积单元内 17.5 m 处的年代控制点为 39816 cal. aBP, 因此 U2 单元主体应属于 MIS3 期的沉积。尽管从上文的沉积记录上 U2 单元内部变化不大, 但是微体古生物记录却显示 U2 单元内部存在次一级变化: 上部 12~15 m 不含微体化石; 而 15~24 m 底栖有孔虫间隔出现, 介形类只在个别层位出现, 其中在 15.5、17.5、20.3 m 等层位微体化石

丰度激增, 且这几个层位中的微体化石组合特征有着高度一致性, 底栖有孔虫分异度达到了 15 种, 其主要的优势种包括 *Asterorotalia pulchella* (42.31%)、*Elphidium advenum* (15.92%)、*Hanzawaia nipponica* (13.68%)、*Ammonia becarii* var. (6.34%) 等; 介形类分异度达到 8 种, 主要优势种包括 *Neomonoceratina crispata* (23.93%)、*Sinocytheridea impressa* (22.22%)、*Cytheropteron miurense* (16.24%)、*Cytheropteron rhombiformis* (8.97%)、*Bicornucythere bisanensis* (6.84%)、*Parabosquetina sinucostata* (5.13%) 等(图 5)。24 m 以下底栖有孔虫丰度很低, 但连续出现。

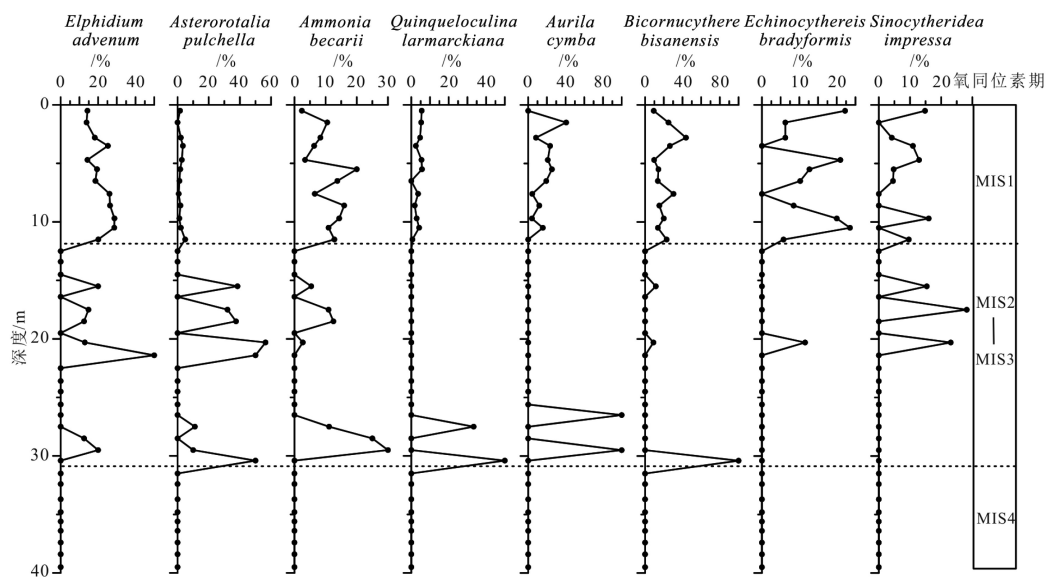


图5 ZK2孔底栖有孔虫、介形类优势种相对含量变化

Fig.5 Downcore variations of the contents of dominant species of foraminifera and ostracoda in Core ZK2

3.4 沉积物矿物组合变化

ZK2 孔重矿物含量为 0.11%~6.17%，一共鉴定出 31 种重矿物，主要矿物有角闪石、绿帘石、绿泥石、褐铁矿；次要矿物包括透闪石、褐帘石、黑云母、磁铁矿、褐铁矿、白云母、蓝晶石、锆石；少量矿物包括电气石、透辉石、磷灰石、红柱石、石榴子石、榍石、金红石、钛铁矿、绿柱石、黝帘石、紫苏辉石、十字石、矽线石、白钛石、白云石、自生黄铁矿等。由于沉积物粒度的变化和沉积环境的差异，各沉积单元的优势重矿物变化明显。

U3 沉积单元的粗碎屑沉积中下部以绿泥石为主的片状矿物含量极高，上部则是以闪石类、帘石类为主的不稳定矿物显著增加。U2 沉积单元中比较突出的是以褐铁矿、磁铁矿等为主的金属矿物含量达到柱内最高水平，闪石类的不稳定矿物明显减少，片状矿物有所增加；24~25 m 层段重矿物含量达到柱内最高。U1 沉积单元中的重矿物总体含量很低，闪石类和帘石类不稳定矿物含量较高，变质矿物含量达到柱内最高阶段(图 6)。

ZK2 孔黏土矿物分析结果显示，伊利石、高岭石、蒙脱石和绿泥石的平均相对含量分别为 44%、34%、17% 和 5%。其中 U3 沉积单元中高岭石占据明显优势，占到总质量的 55%，伊利石含量仅有 29%，蒙脱石为 13%，绿泥石含量不到 2%。U2 沉积单元中高岭石含量显著降低，仅有 23%，伊利石则增加到 52%，绿泥石增加到 7%，蒙脱石含量增加到了 19%。U3 单元的伊利石化学指数较高，均值达到 0.64，U2 单元则仅有 0.50。除了个别层位以外，大

部分层位伊利石结晶度较为稳定，均值都在 0.26 左右(图 7)。

4 ZK2 孔沉积记录与古环境演化

关于晚更新世以来台湾海峡附近的海侵期次，尤其是关于末次盛冰期台湾海峡是否成为陆相的问题，至今学术界仍然未有统一的观点。20 世纪 80 年代的主流观点认为是随着末次盛冰期的到来台湾海峡区域裸露成陆，福建和台湾之间存在“台湾陆桥”^[20-22]；90 年代初陈承惠与蓝东兆等基于海峡西部 16 个柱状样的微体古生物、¹⁴C 和古地磁数据识别出了晚更新世以来的三次海侵过程，分别是早玉木冰期末的金门海侵、玉木亚间冰期的福州海侵以及冰后期的长乐海侵，而在末次盛冰期台湾海峡为水深 30~60 m 的浅海环境，8 kaBP 之前存在“东山陆桥”^[23-24]，此后不乏文章反复引用并支持这一观点^[25-26]。然而基于陆地古生物化石的证据则支持末次盛冰期海峡成陆的观点^[27]，加之 90 年代初的研究都是最长不过数米的短柱，以其结论推测的沉积速率确实与台湾海峡区的现代沉积速率相差较大^[28-29]，因此，周定成等认为仅凭柱状样浅表地层划分第四纪地层，依据未加校正处理的¹⁴C 年龄数据，参考没有精确时代意义和时代跨度较长的微体古生物等资料，推断台湾海峡西部的晚更新世以来的地层划分，推论全区“海侵”事件及其“浅海”环境是不确切的，目前划分的“海侵”依据不足^[30]。目前在台湾浅滩附近的长柱样只有王利波等基于粒度特征和地震数据的基础上识别的三期海相层^[8]，该孔顶部潮

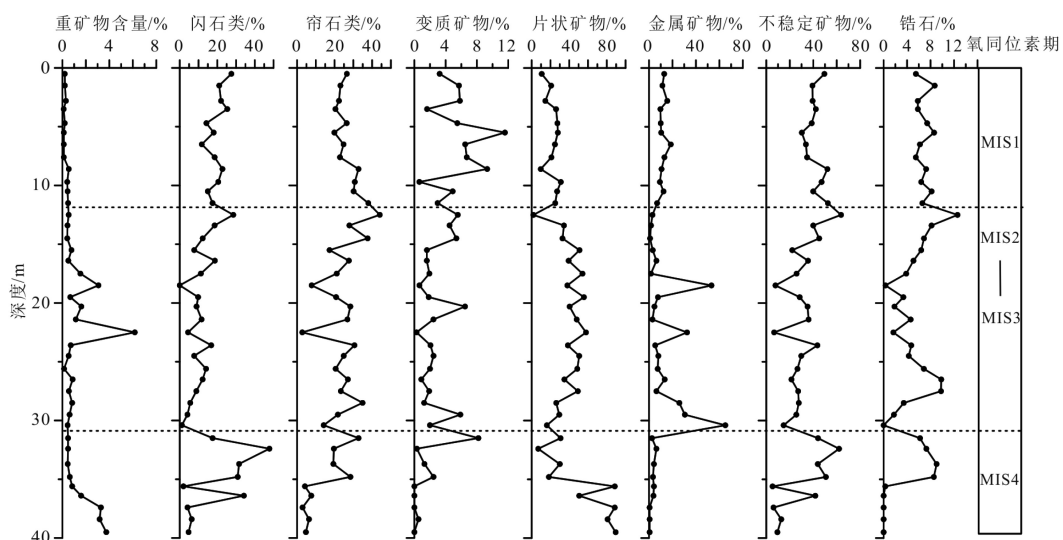


图 6 ZK2 孔主要重矿物相对含量变化

Fig.6 Downcore variations of the relative contents of dominant heavy minerals in Core ZK2

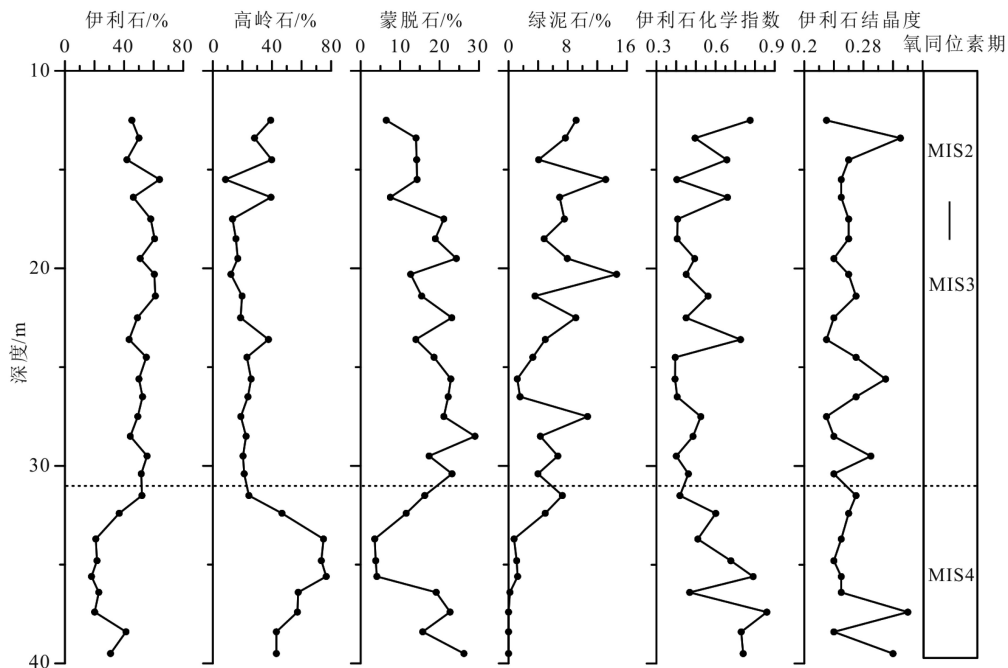


图7 ZK2孔主要黏土矿物相对含量及伊利石化学指数和结晶度变化

Fig.7 Downcore variations of the relative contents of clay minerals, illite chemical index and illite crystallinity in Core ZK2

流砂体属于全新世高海平面以来的沉积有确切的AMS¹⁴C数据支持,但下部两次海侵只是基于地震和粒度数据的推测,需要进一步的分析加以佐证。

ZK2孔上部U1沉积单元中部的两个AMS¹⁴C年代控制点校正后的日历年龄分别为3.41和4.39 cal. kaBP,与王利波等在台湾浅滩西部TWS1208孔上部DU1沉积单元中的两个年代控制点可以互相印证(表1),证明两孔顶部沉积单元具有时空上的一致性。粒度特征反映U1单元沉积颗粒较粗,但是其分选程度明显低于浅滩内部的TWS1208孔,这应该与ZK2孔位置处于浅滩边缘,受到沿岸流系的影响,混入更多细粒物质有关。关于构成台湾浅滩表层沙波主体的砂体来源,刘振夏等认为台湾浅滩沉积保留了部分残留沉积特征,也含有现代沉积特征^[6],ZK2孔U1单元的微体化石群组成反映出了这种残留沉积和现代沉积共存的特征:例如底栖有孔虫种群优势种中的*Ammonia becarii* var.、*Quinqueloculina larmarckiana*、*Ammonia aomoriensis* (Asano)、*Spiroloculina laevigata* Cushman等,介形类中的*Sinocytheridea impressa*、*Bicornucythere bisanensis*、*Aurila cymba*、*Echinocythereis bradyformis*、*Neomonocerotina crispata*等属种在我国近海现代沉积中都属于广温广盐种,在内陆架半咸水海域为优势种^[31-33],这与该孔现代所在的37 m左右的水深环境并不相符,说明这部分微体生物化石来源于低海平面阶段的残留沉积;而相同层位出现的底栖有孔虫

Elphidium advenum、*Cavarotalia annectens*、*Hanzawaia nipponica*、*Cribronion subincertum* (Asano)、*Ammonia compressiuscula* (Brady)、*Pararotalia nipponica* (Asano)和介形类中的*Loxococoncha taiwanensis* Zhao、*Munseyella japonica* (Hanai)、*Cytheropteron miurense*、*Cytheropteron rhombiformis* Chen等种则是我国诸海内陆架水域正常盐度环境下的常见属种^[31-33],它们更可能来源于台湾浅滩附近的现代沉积环境。陈华胄曾指出台湾浅滩西部主要重矿物为钛铁矿、锆石、电气石等,其主要来源是闽粤海岸以及韩江的入海泥沙,钛铁矿是韩江三角洲的主要矿物,锆石是东山近岸及东山湾的主要矿物^[34]。从ZK2孔U1单元的重矿物组成来看,角闪石、绿帘石、黑云母等为代表的稳定矿物含量较高,说明该单元的重矿物具有近源特性;特征性矿物中锆石含量较高,而钛铁矿含量较低,说明ZK2孔的重矿物以附近的东山岛为最主要的物质来源。

根据现有证据,ZK2孔上部U1单元相当于浅滩中部TWS1208孔顶部的DU1和DU2单元^[8],尽管U1单元内部也可分为上部的含砾石层和下部的不含砾石层,但是其微体古生物面貌并无差别,因此我们认为作为一个沉积单元更为合理。蓝东兆等曾指出,台湾浅滩的中、粗砂系10~20 kaBP从异地搬运而来^[5],事实上这一阶段在中国东部海域普遍发生海平面的阶段性上升,U1单元超覆于下部U2单元顶部的侵蚀面上形成与滨岸浅水强水动

力环境相符的粗粒沉积层。因此, 即使大部分沉积碎屑来自于低海平面的残留沉积, 但沉积物经过搬运、再沉积过程最终形成 U1 单元主体的时代应在全新世以内, 但现有资料无法准确推定其底界是在冰后期还是末次冰消期。

U2 单元顶部与 U1 单元之间是一假整合界面, 说明 U2 单元顶部曾经遭受风化剥蚀, 说明 ZK2 孔在末次盛冰期是出露于水面之上的。U2 单元顶部 12~15 m 不含海相微体古生物化石, 而从沉积特征上来看, 这一阶段平均粒径仅有 6.9Φ , 与 U1 单元相比水动力要弱得多, 但是沉积物中的跃移组分平均含量也达到 50.8%, 分选系数均值高达 3.1, 说明这一阶段沉积物分选很差, 具有明显的近源沉积特点。段内黏土矿物的相对含量分别是伊利石 46%、高岭石 36%、蒙脱石 12%、绿泥石 7%, 而福建沿岸现代沉积中黏土矿物以高岭石为主, 平均含量为 38%, 伊利石为 34%, 绿泥石为 22%, 蒙脱石为 5%^[35], 可见 U2 沉积单元顶部伊利石相对含量高于现代, 而绿泥石含量偏低, 说明这一阶段的物理风化更强, 但高岭石含量并未相应减少, 这很可能是由于高岭石系次生矿物, 含量随着与陆地物质源地距离的增加有明显减少的趋势^[36], 说明这一阶段 ZK2 孔离岸更近。这一阶段碎屑矿物中以绿帘石、角闪石为代表的稳定矿物含量有所升高, 也说明这一阶段沉积物搬运距离更近的特征。综上所述, 无论是从不含微体化石还是沉积学特征都表明 U2 单元顶部具有较强的陆相沉积特征。因此, 我们认为位于现代浅滩沙波沉积体之下的 U2 沉积单元顶部应属于陆相的侵蚀沟谷充填沉积, 其形成时间介于 MIS3 低海平面到末次盛冰期出露之前。

U2 沉积单元中部的两个 AMS¹⁴C 控制点确定了这一单元主体形成于 MIS3 期。尽管多数层位微体化石丰度不高, 但可以确定系以海相沉积为主的过渡相。其中最主要的底栖优势种 *Asterorotalia pulchella* 在现代海洋沉积中主要分布于东南亚沿海, 在我国海域主要局限在台湾海峡以南, 在我国东部海域被作为 MIS5 期“星轮虫海侵”的标志种^[19]。但这一阶段的海侵显然不属于发生在 10 万年前的星轮虫海侵, 事实上, MIS3 期在南海的河口和滨岸区 *Asterorotalia* 和 *Pseudorotalia* 均有出现, 只是 *Asterorotalia* 在此次海侵中主要集中在海州湾以南, 因此渤海地区只能发现 *Pseudorotalia*, 才将此次海侵命名为“假轮虫海侵”^[19]。这一阶段其他底栖有孔虫和介形类也以广温、广盐的内陆架浅水种为主。U2 沉积单元下部的平均粒径均值为 8.0Φ , 分

选系数为 2.27, 是 ZK2 孔内沉积物粒度最细、分选程度最高的阶段。段内黏土矿物组成为伊利石 53%, 高岭石 21%, 蒙脱石 19%, 绿泥石 6%, 伊利石结晶度和化学指数均值分别为 0.25 和 0.47, 显然, 相对于顶部层位而言, 伊利石含量更高, 物理风化作用占主导, 而高岭石含量则明显偏低, 很可能意味着 ZK2 孔离岸距离增大, 受到了海水的影响^[36]。以绿帘石、角闪石为代表的稳定矿物含量明显降低, 而代表着更强的海水潮流分选作用的重矿物和白云母等片状矿物的含量有所升高, 也说明这一阶段沉积的海相性强于上部层位。另外, 这一阶段沉积物颜色较深并带有明显的腐臭气味, 说明这一阶段为有机质含量较高、水动力很弱的还原沉积环境。因此, U2 单元下部可能以水体流动较弱的滨岸盐沼环境为主, 25 m 以上频繁发生海进海退, 海侵时为低能的潟湖环境, 海退时则为盐沼或潮坪沉积。由于 MIS3 期中的全球海平面从早期的 -60 m 逐渐降低到后期的 -80 m^[37], 若忽略区域性的构造升降, U2 沉积单元的标高应该从底部的 -68 m 逐渐过渡到顶部的 -52 m, 这样在顶部就比当时的海平面高出了近 30 m, 这显然与该孔所记录的海相沉积环境相悖, 因此我们认为, 在 MIS3 期中 ZK2 孔处于构造沉降的背景下, 在约 30 ka 的时间内沉降 20~30 m, 这与 90 年代初的研究结论相符^[23-25]。

根据 U2 单元的年代控制点向下推算, U3 单元很可能属于 MIS4 期中低海平面阶段的沉积。U3 单元中未见任何微体古生物化石, 而从沉积特征上来看, 这一阶段平均粒径为 3.9Φ , 砾石含量高达 21.1%, 说明沉积环境水动力很强, 但同时黏土粒级含量达到 22.4%, 概率分布曲线没有突出的峰, 分选系数均值高达 4.1, 其分选性极差, 说明碎屑物质很可能没有经过长距离搬运, 机械沉积分异作用很弱。段内黏土矿物的相对含量分别是伊利石 29%、高岭石 55%、蒙脱石 14%、绿泥石 2%, 伊利石结晶度和化学指数均值分别为 0.27 和 0.64, 伊利石含量低而高岭石含量高, 同时伊利石化学指数较高, 一方面说明这一阶段物理风化较弱而化学风化较强, 另一方面很可能也意味着这一阶段 ZK2 孔黏土矿物物源更近。在 U3 单元中以绿帘石、角闪石为代表的稳定矿物含量明显高于 U2 沉积单元, 也说明这一阶段重矿物同样表现出近源特性。值得一提的是 U3 沉积单元中 35 m 以下层位的重矿物中绿泥石含量骤增至 80% 以上, 说明这一阶段沉积物中的重矿物来源极其特殊, 可能受到附近流经变质岩区的山溪性河流的强烈影响, 很可能这一阶段沉积物中的

重矿物和黏土矿物来源不同。MIS4期全球平均海平面低至现代海平面-80 m以下^[37],而ZK2孔标高为-37 m,如忽略局部地壳升降运动的影响,ZK2孔31~40 m的沉积层在其形成时期高于MIS4期最低海平面12~3 m,因此在这一阶段ZK2孔附近很可能已经成为陆相沉积环境,微体古生物和各项沉积特征都印证了这一点,而且由于其极强的水动力状况,我们认为该阶段属于河床沉积。

5 结论

根据ZK2孔AMS¹⁴C测年结果,基于垂向上的微体古生物组合、粒度参数特征以及黏土矿物和重矿物组合特征,参考前人在台湾浅滩附近的研究成果,台湾浅滩西北近岸的ZK2孔可以以12和31 m处的两个沉积间断面将地层分为3个大的演化阶段:

(1) 12 m以上的U1沉积单元为全新世高海平面以来形成的低海平面阶段残留沉积和现代沉积的混合沉积体,其碎屑物质的来源可能主要来自于附近的东山岛。

(2) 12~31 m之间的U2沉积单元为一个相对连续的以悬移质为主的沉积体,其间又以15 m为界划分为上下两个次一级单元,上部为陆上的沟谷充填沉积,形成于MIS3期末到LGM出露水面之前,LGM期间东山岛岸外区域出露成陆接受了较长时间的风化剥蚀;下部为MIS3期形成的以潟湖、潮坪和盐沼环境交替出现的海陆过渡相沉积,在这一阶段台湾浅滩附近沉积盆地基底持续沉降。

(3) 31 m以下的U3沉积单元应为MIS4期低海平面阶段形成的河流相沉积。

参考文献 (References)

- [1] 曾成开,朱永其,王秀昌.台湾海峡的底质类型与沉积分区[J].台湾海峡,1982,1(1):54-61.[ZENG Chengkai, ZHU Yongqi, WANG Xiuchang. Bottom material types and sedimentation districts in Taiwan Strait [J]. Taiwan Strait, 1982, 1(1): 54-61.]
- [2] 郭允谋,郑承忠,潘亚明.台湾海峡的现代沉积环境[M]//《台湾海峡及邻近海域海洋科学讨论会论文集》编辑委员会.台湾海峡及邻近海域海洋科学讨论会论文集.北京:海洋出版社,1995:145-153.[GUO Yunmou, ZHENG Chengzhong, PAN Yaming. The modern sedimentary environment of Taiwan Strait[M]//Editorial Board of Proceedings of the Symposium on Marine Science in the Taiwan Strait and Adjacent Waters. Proceedings of Symposium of Marine Sciences in Taiwan Strait and Its Adjacent Waters. Beijing: China Ocean Press, 1995: 145-153.]
- [3] 郑铁民,张君元.台湾浅滩及其附近大陆架的地形和沉积特征的初步研究[M]//中国科学院海洋研究所海洋地质研究室.黄东海地质.北京:科学出版社,1982:52-66,219.[ZHENG Tiemin, ZHANG Junyuan. Preliminary researches of geomorphology and sedimentary characteristics in the Taiwan shoal and surrounding shelf[M]//Department of Marine Geology, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. Geology of the Yellow Sea and East China Sea. Beijing: Science Press, 1982: 52-66, 219.]
- [4] 廉耀康,李炎.台湾浅滩沉积物粒度特征及输运趋势[J].台湾海峡,2011,30(1):122-127.[LIAN Yaokang, LI Yan. Grain size characteristics and transport trend in the Taiwan Bank [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2011, 30(1): 122-127.]
- [5] 蓝东兆,张维林,陈承惠,等.台湾浅滩中粗砂的时代与成因[J].台湾海峡,1991,10(2):156-161.[LAN Dongzhao, ZHANG Weilin, CHEN Chenghui, et al. Preliminary study on age and origin of medium-coarse sands in Taiwan Shoal [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1991, 10(2): 156-161.]
- [6] 刘振夏,夏东兴.中国近海潮流沉积沙体[M].北京:海洋出版社,2004:129-210,222.[LIU Zhenxia, XIA Dongxing. Tidal Sands in the China Seas[M]. Beijing: Ocean Press, 2004: 129-210, 222.]
- [7] Cai A Z, Zhu X N, Li Y M, et al. Sedimentary environment in Taiwan Shoal [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1992, 10(4): 331-339.
- [8] 王利波,李军,陈正新,等.晚更新世以来台湾浅滩西部地层结构与古环境演化[J].沉积学报,2014,32(6):1089-1099.[WANG Libo, LI Jun, CHEN Zhengxin, et al. Late Pleistocene and Holocene stratigraphy and Paleo-environmental evolution in the western Taiwan shoal [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(6): 1089-1099.]
- [9] 马道修,刘锡清.台湾浅滩构造台地的形成与发展[J].海洋地质动态,1994(7):4-6.[MA Daoxiu, LIU Xiqing. Formation and development of tectonic platform in the Taiwan Shoal [J]. Marine Geology Frontiers, 1994(7): 4-6.]
- [10] Dadson S J, Hovius N, Chen H, et al. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen [J]. Nature, 2004, 426(6967): 648-651.
- [11] 王文介.中国南海海岸地貌沉积研究[M].广州:广东经济出版社,2007:13-16,344.[WANG Wenjie. Study on the Geomorphology and Sedimentation of the South China Sea Coastal Area[M]. Guangzhou: Guangdong Economy Publishing House, 2007: 13-16, 344.]
- [12] 伍伯瑜.台湾海峡及其邻近水域的流型和人文特征[J].海洋通报,1983,2(4):1-8.[WU Boyu. The current pattern and hydrologic character in the Taiwan Straits and its adjacent waters [J]. Marine Science Bulletin, 1983, 2(4): 1-8.]
- [13] Wang Y H, Jan S, Wang D P. Transports and tidal current estimates in the Taiwan Strait from shipboard ADCP observations (1999-2001) [J]. Estuarine, Coastal & Shelf Science, 2003, 57(1-2): 193-199.
- [14] 杜晓琴,李炎,高抒.台湾浅滩大型沙波、潮流结构和推移质输运特征[J].海洋学报,2008,30(5):124-136.[DU Xiaolin, LI Yan, GAO Shu. Characteristics of the large-scale sandwaves, tidal flow structure and bedload transport over the Taiwan Bank in southern China [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(5): 124-136.]
- [15] 石谦,张君元,蔡爱智.台湾浅滩——巨大的砂资源库[J].自然资源

- 学报, 2009, 24(3): 507-513. [SHI Qian, ZHANG Junyuan, CAI Aizhi. Taiwan Shoal, a magnitude storage of sand resources [J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(3): 507-513.]
- [16] 万世明. 近2千万年以来东亚季风演化的南海沉积矿物学记录[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士学位论文, 2006, 181. [WAN Shiming. Evolution of the East Asian Monsoon: mineralogical and sedimentologic records in the South China Sea since 20 Ma[D]. Doctor Dissertation of Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2006, 181.]
- [17] Stuiver M, Reimer P J. Extended ^{14}C data base and revised CALIB 3.0 ^{14}C age calibration program [J]. *Radiocarbon*, 1993, 35(1): 215-230.
- [18] Yoneda M, Uno H, Shibata Y, et al. Radiocarbon marine reservoir ages in the western Pacific estimated by pre-bomb molluscan shells [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007, 259(1): 432-437.
- [19] 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(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(1): 1-13.]
- [20] 周慕林. 中国第四纪地层划分的新进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(4): 105-115. [ZHOU Mulin. Recent progress of quaternary stratigraphical division in China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1985, 5(4): 105-115.]
- [21] 朱永其, 李承伊, 曾成开, 等. 关于东海大陆架晚更新世最低海面[J]. 科学通报, 1979(7): 317-320. [ZHU Yongqi, LI Chengyi, ZENG Chengkai, et al. Lowest sea level about the continental shelf of the East China Sea during late Pleistocene [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1979(7): 317-320.]
- [22] 赵昭炳. 台湾海峡演变的初步研究[J]. 台湾海峡, 1982, 1(1): 20-24. [ZHAO Zhaobing. A preliminary study on the evolution of Taiwan Strait [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1982, 1(1): 20-24.]
- [23] 陈承惠, 蓝东兆, 于永芬, 等. 台湾海峡西部海域晚第四纪地层[J]. 第四纪研究, 1990(4): 301-307. [CHEN Chenghui, LAN Dongzhao, YU Yongfen, et al. Late Quaternary stratigraphy in the western Taiwan Strait [J]. *Quaternary Sciences*, 1990(4): 301-307.]
- [24] 蓝东兆, 张维林, 陈承惠, 等. 晚更新世以来台湾海峡西部的海侵及海平面变化[J]. 海洋学报, 1993, 15(4): 77-84. [LAN Dongzhao, ZHANG Weilin, CHEN Chenghui, et al. Transgression and sea-level change in western Taiwan Strait since the Late Pleistocene [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1993, 15(4): 77-84.]
- [25] 程乾盛. 关于福建和台湾晚更新世存在陆桥之说质疑[J]. 福建地质, 1998, 18(4): 214-220. [CHENG Qiansheng. Was there a land bridge between Fujian and Taiwan provinces in the late Pleistocene epoch [J]. *Geology of Fujian*, 1998, 18(4): 214-220.]
- [26] 丁祥焕, 王耀东, 叶盛基. 福建东南沿海活动断裂与地震[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1999: 74-81, 223. [DING Xianghuan, WANG Yaodong, YE Shengji. Active faults and earthquakes along the southeast coast of Fujian Province[M]. Fuzhou: Fujian science & Technology Publishing House, 1999: 74-81, 223.]
- [27] 蔡保全. 晚玉木冰期台湾海峡成陆的证据[J]. 海洋科学, 2002, 26(6): 51-54. [CAI Baoquan. The evidence of dry land of the Taiwan Straits during late Würm glaciation [J]. *Marine Sciences*, 2002, 26(6): 51-54.]
- [28] 金庆焕, 高天钧, 黄辉, 等. 台湾海峡中、新生代地质构造及油气地质[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1993: 1-51. [JIN Qinghuan, GAO Tianjun, HUANG Hui. Mesozoic and Cenozoic geological structures and petroleum geology in the Taiwan Strait[M]. Fuzhou: Fujian Science & Technology Publishing House, 1993: 1-51.]
- [29] 中国科学院南海海洋研究所台湾海峡课题组, 福建海洋研究所台湾海峡课题组. 台湾海峡西部石油地质地球物理调查研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1989: 75-76, 134. [Research Group of Taiwan Strait, Institute of South China Sea Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences & Fujian Institute of Oceanography. A Study of Petroleum Geology and Geophysics in the Western Taiwan Strait[M]. Beijing: China Ocean Press, 1989: 75-76, 134.]
- [30] 周定成, 孙全, 许志峰. 台湾海峡西部海域晚更新世3次“海侵”依据的探讨[J]. 台湾海峡, 2011, 30(3): 324-329. [ZHOU Dingcheng, SUN Quan, XU Zhifeng. Discussion on the evidence of three late-Pleistocene “transgressions” in the western Taiwan Strait waters [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2011, 30(3): 324-329.]
- [31] 何炎, 胡兰英, 王克良. 江苏东部第四纪有孔虫[J]. 中国科学院地质古生物研究所集刊, 1965(4): 51-162. [HE Yan, HU Lanying, WANG Keliang. Quaternary foraminifera in the east region of Jiangsu province [J]. *Memoirs of the Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Science*, 1965(4): 51-162.]
- [32] 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. [WANG Pinxian, ZHANG Jijun, ZHAO Quanhong, et al. Foraminifera and Ostracods in the Sediments of the East China Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1988.]
- [33] Lei Y L, Li T G. Atlas of Benthic Foraminifera from China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2016, 399.
- [34] 陈华胄. 台湾海峡表层沉积物中重矿物特征及其物质来源[J]. 台湾海峡, 1993, 12(2): 136-144. [CHEN Huazhou. Characteristics and sources of heavy minerals in surface sediment of Taiwan Strait [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1993, 12(2): 136-144.]
- [35] 徐勇航, 陈坚, 王爱军, 等. 台湾海峡表层沉积物中黏土矿物特征及物质来源[J]. 沉积学报, 2013, 31(1): 120-129. [XU Yonghang, CHEN Jian, WANG Aijun, et al. Clay minerals in surface sediments of the Taiwan Strait and their provenance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(1): 120-129.]
- [36] 游仲华, 唐锦龙. 台湾海峡西部沉积物中粘土矿物的初步研究[J]. 沉积学报, 1992, 10(4): 129-136. [YOU Zhonghua, TANG Jinlong. Preliminary study on clay minerals of sediments in Western Taiwan Strait [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(4): 129-136.]
- [37] Waelbroeck C, Labeyrie L, Michel E, et al. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(1-3): 295-305.