

福建北部近岸海域晚更新世以来 典型地震剖面声学反射特征

徐承芬^{1,2,3}, 杨源^{2,3}, 王蛟^{2,3}, 孔祥淮^{2,3}, 胡刚^{2,3}, 张勇^{2,3*}

(1 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071;

3 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要:根据 2015 年采集的 3 500 km 浅地层剖面资料,以层序地层学为理论基础,运用地震地层学的分析方法,结合沉积学原理的相关理论,对福建北部近岸海域典型浅地层地震剖面声学反射特征进行了系统的分析和解释。根据本次获得的浅层地震剖面资料和以往的相关解释结果,将研究区浅部地震剖面划分为 6 个主要的地震反射界面(从上至下定名为 QT1、QT2、QT₂¹、QT3、QT₃¹、QT4),这些界面将剖面划分为 5 个地震单元(从上至下定名为 SU1、SU2、SU3、SU4、SU5)。详细描述了每个地震单元的反射界面特征及其层序内部特征,合理推测了每个地震单元的沉积地层特征及其演化,为研究福建北部近岸海域的沉积环境提供科学依据。

关键词:福建北部海域;晚更新世;地震剖面

中图分类号:P631

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.02001

东海陆架区受海平面变化、沉积动力、新构造运动等多种因素的影响,具有沉积物来源多样化,沉积结构复杂,地层连续性差等特点;同时也是研究晚第四纪海平面变化、沉积结构特征对构造运动、沉积物供应和海洋动力环境响应的天然“实验室”^[1]。末次盛冰期以来中国东部陆架的层序地层受控于晚更新世以后的海平面变化,发育在前一层序强制海退体系域之上,形成了低位体系域、海侵体系域和高位体系域^[2]。

1 研究区概况

研究区所处海域北倚杭州湾,南临台湾岛,西

接浙闽沿岸,东至东海大陆架边缘;北有苏北沿岸水系和黄海冷水团南伸,同时有长江、钱塘江两大江河的淡水注入^[1],沿岸水系与黑潮这两种性质不同的水系相互消长运动构成了东海陆架极为复杂的水文环境特征^[3-5]。研究区主要流系为东海沿岸流和台湾暖流,东海沿岸流主要是长江、钱塘江、闽江、椒江、九龙江等河流的入海径流与附近海水混合的一股低盐水体,这些河流平均年径流量大和年输沙量较大,为东海陆架提供了大量的物质来源^[1,6-9]。

在 20 世纪 90 年代之前,我国地质工作者就开始对福建沿海及其邻域的第四纪层序地层与沉积演化进行了研究^[10-13];90 年代后,地质学者又对其做了很多有益的探讨,并且取得了一定的进展^[14-19];进入 21 世纪以后,随着深入研究,逐渐又获得了一些新的认识和重要成果^[20-24]。杨建明通过大量钻孔岩心的岩性特征、微体古生物硅藻和有孔虫化石组合以及¹⁴C 测年结果揭示,闽江河口发育 2 期海侵地层,表明本区在晚第四纪期间至少经历了 2 次海侵事件^[25];王舒畋按地震地层

收稿日期:2016-12-02

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41376079, 41676052);中国地质调查项目(GZH200900501, DD20160139)

作者简介:徐承芬(1991—),女,在读硕士,主要从事沉积学方面的研究工作。E-mail: xuchengfen@sina.com

* 通讯作者:张勇(1970—),男,博士,教授级高工,主要从事海洋地质研究工作。E-mail: qimgzy@163.com

学关于层序划分的原则及反射界面识别的标志,在东海陆架的海底面下,大约 100 m 深度范围内,识别出 5 个划分层序边界的反射界面,自上而下分别定名为: QT_1^0 、 QT_2^0 、 QT_3^0 、 QT_4^0 、 QT_5^0 界面^[26];唐保根将当时现有的钻孔剖面揭露的第四纪地层进行划分和对比,建立了东海陆架第四纪地层层序,从老到新依次为下更新统西湖组、中更新统金鸡山组、上更新统西冷组、全新统海礁组或下全新统鸡骨礁组、中全新统大戟山组、上全新统嵎泗组^[27];刘振夏基于 1996 年中法合作在东海陆架进行的电火花单道地震调查资料,并与位于东海外陆架的钻孔 DZQ4 对比,发现对应于 MIS6 期以来的 6 个地震地层与钻孔地层呈现很好的对应关系,其间共有 4 次海退—海进的沉积旋回^[28-30];吴自银运用地震地层学方法,对 1996 年中法合作自长江口至冲绳海槽获取的地震资料进行了分析,对比 DZQ4 井的岩性资料,并结合 ChapePl 氧同位素曲线,识别出 3 类共 10 个地震层组,对各地震层组主要沉积相和沉积环境进行了合理推测,并与氧同位素期和全球冰期进行了对比^[31,32];徐方建通过对 EC2005 孔沉积特征研究,认为东海内陆架浙闽沿岸泥质 EC2005 孔沉积速率高而且变化非常大,可以划分出 4 个主要沉积阶段和 4 个快速沉积事件^[33];李达运用地震地层学的方法,对东海浅地层地震剖面资料进行了分区解释,对比及全区闭合,将西部海区分成 4 个层序、9 个地层单元,一个层序代表一次全球性或区域性海平面变化周期内的沉积,西部海区反映了 4 次海侵和 3 次海退^[1];崔征科根据穿越东海陆架的浅地震剖面解释研究,海底以下约 120 ms 时间深度内可识别出 6 个主层序反射界面,分别定名为 QT_0 、 QT_1 、 QT_2 、 QT_3 、 QT_4 和 QT_5 界面,5 套反射层序(反射波组)^[34]。

本文依据 2015 年采集的 3 500 km 浅地层剖面资料(图 1),以层序地层学为理论基础,并且结合前人研究成果,对东海西部晚更新世以来浅地层典型地震剖面进行了系统的分析和解释,对福建北部近岸海域层序地层进行了更精细的划分,利用高分辨率的先进设备采集到的最新浅层地震剖面资料,运用地震地层学的方法^[35,36],对该区进行了进一步的解释,对测网密度较高的浅层地震剖面层序进行了更为精细的划分。

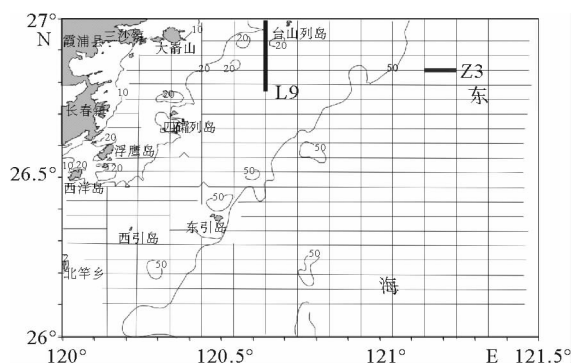


图 1 地理位置及地震测线布置

Fig. 1 Geographical position and arrangement of survey line

2 材料与方法

2.1 浅地层剖面参数试验以及海上测量

2015 年 8—11 月,青岛海洋地质研究所利用“业治铮”号海洋调查船在东海西部近岸海域完成了 3 500 km 浅层地震剖面及同步水深测量,定位采用美国 NAVCOM 技术公司生产的 SF-2050M 型 GPS 导航系统。定位精度水平 ≤ 10 cm,垂直 ≤ 15 cm,速度 ≤ 0.01 m/s。浅地层剖面测量仪为英国 AAE(Applied Acoustics Engineering)公司生产的新型浅地层剖面仪,配备电火花震源,工作站采用英国 CODA 公司的 DA500 进行数据采集,具有数字处理和存储功能,震源采用 Delta sparker、Squid 2000、Squid 500,水听器采用 20 单元组合检波水听器。

2.2 仪器参数试验

首先,测量开始之前进行了试验测试,试验主要对发射震源能量、拖缆放长、震源和水听器间距、带通滤波参数、延迟、记录量程等施工参数进行了选择。试验选取的剖面以能穿透目的层、具有较高分辨率和良好的记录面貌为原则。

震源能量试验分别选择了 160、250 和 500 J,从采集的剖面来看,160 J 能量偏小,穿透能力差,剖面基本不能分辨反射波界面,穿透深度达不到设计要求;250 J 能量所得剖面可见海底浅层反射波界面,而较深部分基本不能分辨反射波界面,穿透深度同样达不到设计要求;采用 500 J 能量获

取的剖面浅部、深部地层反射界面较为清楚,50 m 范围内声学记录良好,垂向分辨率优于 0.5 m,浅地层剖面记录良好,剖面打印清晰连续,分辨率较高。

2.3 浅剖资料处理与解释

基于最大程度保留浅层高频信息的要求,浅地层剖面数据处理流程如下:地震数据解编、定位数据提取、频谱分析,频率扫描、带通滤波、真振幅恢复、涌浪滤波、道平衡、显示、绘图打印。

浅地层剖面的解释主要运用层序地层学和地震地层学的原理,根据地震相反射特征和界面识别标志进行地层划分;地震相反射特征主要包括地震单元的外部形态(如席状、楔状等)和内部反射结构(如平行反射、前积反射、杂乱反射等),代表了在某一时期内沉积环境的能量、物源等;界面识别标志主要包括上超、下超、削截和顶超等,代表了沉积间断的特征。对研究区浅地层剖面的解释,首先根据反射界面识别标志将其中一条反射结构清晰的剖面进行分层,然后通过联络剖面,对其他所有剖面进行对比分析,使全区测线上的所有界面闭合。为了计算浅地层剖面上各地震单元的厚度,根据以往的经验 and 钻孔岩心与浅地层剖面的对比,海底以下各地震单元采用的声波通过地层的平均速率为 1 550 m/s。

在地震反射剖面的上部(二次波之上的地震反射资料,约位于双程反射时间 180 ms 之内),地震层序显示 6 个主要的地震反射界面(从上至下定名为 QT1、QT2、QT₂¹、QT3、QT₃¹、QT4),这些界面在调查区为连续分布或被切削,在全区可追踪,被解释为侵蚀面。这些界面将剖面划分为 5 个地震单元,即 SU1~SU5。

3 结果与讨论

3.1 QT2 之上的地震单元及反射界面

QT1 和 QT2 是研究区海底以下地震地层中最上部的 2 个地震界面,它们在研究区的东部(约在 120.5°E 以东),在下切古河谷充填地层中大多是分开的,而在西部近岸地区它们合二为一。QT1 被解释为最大海泛面,QT2 被解释为全新世

初始海进面。QT2 以上构成地震单元 SU1,对应于 MIS1 期,相当于全新统沉积地层(图 2)。

在研究区的最东部,QT1 和 QT2 之间的地震单元显示为以退积和加积方式叠加的、高振幅的、近似水平的内部反射层或充填潮道的杂乱/侧向加积反射层,一般其厚度 < 15 m,向陆快速尖灭。在最东部海区以西的下切谷中,界面 QT2 削截下伏的河道充填沉积,呈上凹的几何形态,并沿上倾方向与 QT1 合并。在这些地区,QT1 和 QT2 之间的地震单元由多个相互交切的亚单元构成,这些亚单元显示平缓—陡倾的、低至高振幅的反射层,QT1 和 QT2 之间的地震单元的厚度可达 20 m,取决于下切谷的宽度和深度。

在研究区的西部,大致与海水等深线相一致(图 2),QT1 或 QT₂¹(指 QT1 和 QT2 合并)被 2 个明显的地震相(上部和下部地震相)所覆盖。上部的地震相显示向东或东南进积的楔形沉积体形态,楔形沉积体的内部缓倾—陡倾、高振幅的反射层下超至分隔上部和下部地震相的地震反射界面 QT1 上(图 2)。在局部地区可见楔形沉积体之下的潮道及其充填物,这些潮道下切进入下伏地层,其充填物显示杂乱反射结构。下部的地震相主要以平行或亚平行的地震反射层为特征。上部的地震相厚度变化于 5~20 m 范围之间,而下部的地震相一般 < 10 m 或者局部尖灭。上部的这些楔形反射地震单元构成了沿岸呈 NE—SW 方向延伸的泥质沉积体。

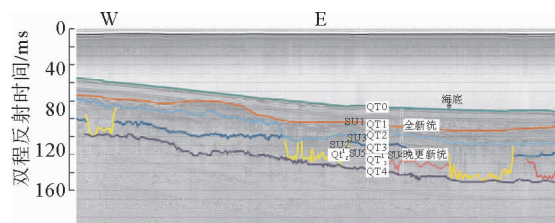


图 2 测线 Z3 剖面解释

Fig. 2 Interpretation of Line Z3

研究区表层为一薄层(一般 < 4 m 厚)地震相,该地震相显示平行—亚平行、高振幅的反射层,被解释为全新世后期海岸—浅海沉积,它覆盖所有下伏地层。

3.2 埋藏古河谷及其底部充填

被埋藏的下切古河谷在调查区分布普遍。地震界面 QT_2^1 是一个高振幅的侵蚀面,呈 V 或 U 形的河谷状界面下切到下伏地层之中(图 2)。与其他地震界面相比, QT_2^1 显得更加高低不平,在侧向上也更加不连续。 QT_2 与 QT_2^1 之间的地震单元被定义为 SU2,对应于 MIS2 期的末次冰期时代,主要为古河谷沉积。下切古河谷的深度和宽度变化很大,大的主干下切谷大多为 10~20 m 深(最大深度 40 m)、3~7 km 宽;小一中等规模的主干下切谷一般为 4~10 m 深、2~4 km 宽。下切谷的宽/深比一般都 >50 ,表明这些下切谷以床载搬运的方式输运沉积物,且搬运能力有限。大型和中等规模的主干下切谷显示阶梯式的地貌特征,可能反映了在下切谷发育过程中海平面下降的速率有所变化。下切谷的底部地震单元一般

不到 15 m 厚,呈混杂一波状、或叠瓦状侧向加积的高振幅反射层,被上覆的 QT_2 界面所削截。

3.3 地震界面 QT_2^1 之下的地震单元

地震界面 QT_3 是一个相对平滑的削截下伏地层的侵蚀面, QT_3 与 QT_2^1 之间(或当 QT_2^1 缺失时 QT_3 与 QT_2 之间)的地震单元被定义为 SU3,对应于 MIS3 期。该地震单元为交替出现的杂乱反射层与倾斜—低角度(大多 $<0.2^\circ$)反射层(图 2、3)。其杂乱反射层一般显示与下伏地震单元呈渐变式的接触关系,这与河道底部侵蚀面所表现出的向下深切的、突变式的侵蚀面不同。由于上覆下切谷的侵蚀,这一显示混乱反射层的地震单元在厚度上不规则,局部 <5 m;当上覆的下切谷不存在或较弱时,该单元的厚度大多为 7~15 m,局部最大厚度为 30 m。该地震单元在全区的连续性也较差,时常被其上的古河谷切断。

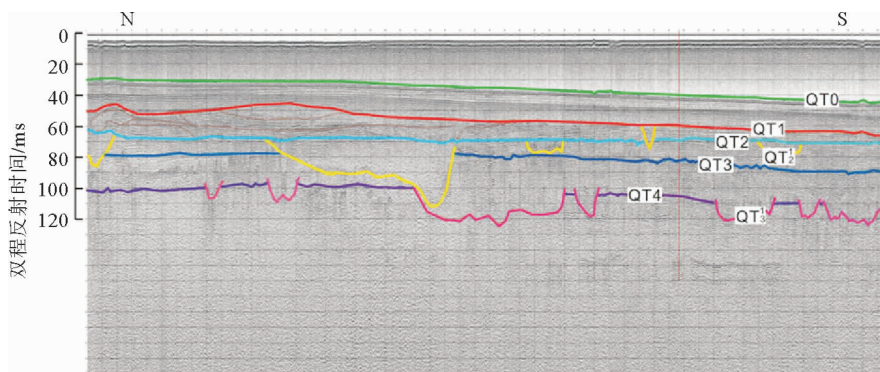


图 3 测线 L9 剖面解释

Fig. 3 Interpretation of Line L9

地震界面 QT_3^1 是一个起伏较大且不连续的反射面,与 QT_2^1 反射特征相似,也是一个高振幅的侵蚀面,呈 V 或 U 形的河谷状界面下切到下伏地层之中。 QT_3^1 与 QT_3 之间的地震单元被定义为 SU4,对应于 MIS4 期。该地震单元内部为杂乱、陡倾反射,厚度分布不规则,连续性极差。

地震界面 QT_4 也是一个侵蚀面,起伏幅度不大。 QT_4 与 QT_3^1 之间(QT_3^1 缺失时 QT_4 与 QT_3 之间)的地震单元被定义为 SU5,对应于 MIS5 期。该单元地震相显示为高振幅、波状、亚平行或缓倾的反射层。厚度分布不均,时常被界面 QT_3^1 切割。

地震界面 QT_4 之下的地震单元在研究区的东部是可分辨的,但向西因多次波的干扰无法追踪至浅水区。 QT_4 和 QT_5 之间的地震相显示高振幅、波状—混杂的反射层(大多厚度 <20 m),常见小规模的水道充填物(显示混杂或侧向加积的反射层)。

4 结论

将福建北部近岸海域晚更新世以来浅部地震相划分为 6 个主要的地震反射界面(从上至下为 QT_1 、 QT_2 、 QT_2^1 、 QT_3 、 QT_3^1 、 QT_4)。这些界面将

剖面划分为5个地震单元(从上至下为SU1、SU2、SU3、SU4、SU5)。QT2以上构成地震单元SU1,对应于MIS1期,相当于全新统沉积地层;QT2与QT₂¹之间的地震单元被定义为SU2,对应于MIS2期的末次冰期时代,主要为古河谷沉积;地震界面QT3是一个相对平滑的削截下伏地层的侵蚀面,QT3与QT₂¹之间(或当QT₂¹缺失时QT3与QT2之间)的地震单元被定义为SU3,对应于MIS3期;QT₃¹与QT3之间的地震单元被定义为SU4,对应于MIS4期;QT4与QT₃¹之间(QT₃¹缺失时QT4与QT3之间)的地震单元被定义为SU5,对应于MIS5期。

参考文献:

- [1] 李达. 东海陆架区浅部地震地层层序及新构造运动特征研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2010.
- [2] 田立柱. 末次盛冰期以来中国东部陆架层序地层研究现状[J]. 地质调查与研究, 2008, 31(4):328-332.
- [3] 苏纪兰. 中国近海水文[M]. 北京:海洋出版社, 2005.
- [4] 张慧, 堵盘军, 郑晓琴. 浙闽海域余流特征分析[J]. 海洋通报, 2011, 30(2): 151-157.
- [5] 庄丽华. 黄东海陆架晚第四纪古环境演化及海平面变化[D]. 青岛:中国科学院海洋研究所, 2002.
- [6] 张建培, 张田, 唐贤君. 东海陆架盆地类型及其形成的动力学环境[J]. 地质学报, 2014, 88(11):2033-2043.
- [7] 李家彪. 东海区域地质[M]. 北京:海洋出版社, 2008.
- [8] 许东禹. 中国近海地质[M]. 北京:地质出版社, 1997.
- [9] 李凤岐. 海洋水团分析[M]. 青岛:中国海洋大学出版社, 2000.
- [10] 林景星. 福建沿海全新世海进的初步认识[J]. 科学通报, 1979, 24(11):517-520.
- [11] 潘国轩. 福建沿海全新世地层划分与海面变化[J]. 应用海洋学学报, 1984, 3(2):50-62.
- [12] 蓝东兆, 于永芬, 陈承惠, 等. 福州盆地晚更新世海侵及全新世海面波动的初步研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1986, 6(3):105-113.
- [13] 杨建明. 福建沿岸晚更新世末次海侵及其海平面的变化[J]. 海洋科学, 1988, 12(5):5-9.
- [14] 王雨灼. 福建省第四纪地层的划分[J]. 福建地质, 1990, 9(4):289-306.
- [15] 曾从盛. 福建晚更新世海侵问题探讨[J]. 热带海洋学报, 1993, 5(1):39-45.
- [16] 陈峰, 张培辉. 闽江口水下三角洲的形成与演变[J]. 应用海洋学学报, 1998, 17(4):396-401.
- [17] 王绍鸿, 杨建明. 福建沿海晚更新世以来的海平面变化[J]. 应用海洋学学报, 1994, 13(2):166-175.
- [18] 陈方. 海坛岛第四纪地层及其沉积环境演变[J]. 海洋通报, 1996, 15(5):53-60.
- [19] 曾从盛. 闽东北沿海晚第四纪海侵与海面变动[J]. 福建师范大学学报:自然科学版, 1997, 13(4):94-101.
- [20] 程乾盛, 许汉荣. 东山 ZK51 孔第四纪地层划分与闽南沿海部分地区地层划分对比[J]. 福建地质, 2000, 12(1):24-33.
- [21] 王海鹏, 张培辉. 闽江口水下三角洲沉积特征及沉积环境: II. 晚更新世—全新世沉积 ...[J]. 应用海洋学学报, 2000, 19(2):132-140.
- [22] 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]. 应用海洋学学报, 2011, 30(3):324-329.
- [23] 赵绍华. 平潭岛附近海域全新世以来沉积特征及古气候变化研究[D]. 厦门:国家海洋局第三海洋研究所, 2012.
- [24] 陈聪, 万秋池, 郑卓, 等. 福建平潭岛晚第四纪沉积序列及 MIS5 海侵旋回特征[J]. 热带地理, 2016, 36(3):406-416.
- [25] 杨建明. 闽江口晚第四纪海侵地层的初步研究[J]. 福建师范大学学报:自然科学版, 1993, 9(1):86-90.
- [26] 王舒畋. 东海陆架中西部地区晚第四纪沉积层序与沉积体系域[J]. 海洋地质信息通报, 1995, 2(6):4-5.
- [27] 唐保根. 东海陆架第四纪地层层序的初步研究[J]. 上海国土资源, 1996, 17(2):22-30.
- [28] 刘振夏. 中更新世以来东海陆架的古环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(2):1-10.
- [29] 刘振夏, Berne S. 东海陆架的古河道和古三角洲[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(1):9-14.
- [30] 刘振夏, 印萍, Berne S, 等. 第四纪东海的海进层序和海退层序[J]. 科学通报, 2001, 46(S1):74-79.
- [31] 吴自银, 金翔龙, 李家彪. 16 万年来长江口至冲绳海槽高分辨率地震层序研究[C]//中国地球物理学会年刊——中国地球物理学会年会. 2001.
- [32] 吴自银, 金翔龙. 中更新世以来长江口至冲绳海槽高分辨率地震层序研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2):9-20.
- [33] 徐方建. 东海内陆架泥质区 EC2005 孔沉积特征及古环境记录[D]. 青岛:中国科学院海洋研究所, 2009.
- [34] 崔征科, 杨文达. 东海陆架晚第四纪层序地层及其沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 24(4):1-10.
- [35] 佩顿. 地震地层学[M]. 北京:石油工业出版社, 1980.
- [36] 何樵登. 应用地球物理教程[M]. 北京:地质出版社, 1991.

TYPICAL ACOUSTIC REFLECTIONS OF SEISMIC PROFILES FOR SEDIMENTS SINCE LATE PLEISTOCENE IN THE NORTH SEA AREA OF FUJIAN

XU Chengfen^{1,2,3}, YANG Yuan^{2,3}, WANG Jiao^{2,3},
KONG Xianghuai^{2,3}, HU Gang^{2,3}, ZHANG Yong^{2,3*}

(1 China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Key Laboratory of Marine
Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China;
3 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China)

Abstract: 3 500 km of shallow seismic profiles were acquired in 2015 from the northern seas area of Fujian province. Interpretation is made systematically based on the sequence stratigraphy and seismic stratigraphy for the sediment deposited since late Pleistocene. According to previous researches and related results, the seismic profiles of the study area may be divided into 5 main seismic units, namely SU1, SU2, SU3, SU4, SU5 from top to bottom by 6 interfaces of QT1, QT2, QT₂¹, QT3, QT₃¹ and QT4 respectively. Detailed description is carefully made for both the seismic units and the reflection interfaces. Rational inference is also made for the depositional history of the region.

Key words: northern seas area of Fujian; Late Pleistocene; seismic profiles

关于作者著作权及稿酬的声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

《海洋地质前沿》编辑部

2013 年 1 月