

doi: 10.12029/gc20210308001

王继龙, 林丰增, 彭博, 刘平, 章诚诚, 劳金秀, 李月, 于俊杰, 武彬, 陈静. 2024. 福建宁德地区第四纪年代地层时空特征及对海面变化的指示[J]. 中国地质, 51(4): 1342–1354.

Wang Jilong, Lin Fengzeng, Peng Bo, Liu Ping, Zhang Chengcheng, Lao Jinxiu, Li Yue, Yu Junjie, Wu Bin, Chen Jing. 2024. Temporal and spatial characteristics of Quaternary stratigraphy in Ningde area, Fujian Province and its indication of sea level change[J]. Geology in China, 51(4): 1342–1354(in Chinese with English abstract).

福建宁德地区第四纪年代地层时空特征及对海面变化的指示

王继龙¹, 林丰增², 彭博¹, 刘平³, 章诚诚¹, 劳金秀¹, 李月⁴,
于俊杰¹, 武彬¹, 陈静³

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016; 2. 宁德市人民政府, 福建 宁德 352101; 3. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 4. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210093)

摘要:【研究目的】为厘定福建宁德地区晚第四纪地层框架, 给予区域咸、淡水划分提供基础资料支撑, 也为中国东部晚第四纪海侵研究提供可供对比的新资料。【研究方法】通过对 NDGK2 孔的岩性、年代、微体古生物分析, 区域钻孔对比, 重建了其晚第四纪地层框架, 进一步探讨了区域地层展布特征及演化过程。【研究结果】NDGK2 孔第四纪地层晚更新世以来的沉积, 自下而上存在 3 层深灰色黏土, 年龄分别为~90 ka、39–44 ka、<10 ka。【结论】NDGK2 孔第四纪地层发育于古风化壳之上, 主要为中更新世末—晚更新世初以来的沉积。钻孔岩心中存在 3 层深灰色黏土层, 很可能均为海侵时期沉积物, 3 层深灰色黏土层可能分别对应于 MIS5、MIS3 和 MIS1 期。深灰色黏土层发育空间差异性, MIS3 较 MIS5 期海侵范围扩大, 当时古地势已经接近现代地势, 构造沉降明显, MIS3 之后构造相对稳定, 伴随着全新世最大海侵面的影响, 形成了最广泛的一次海侵。

关键词: 晚第四纪; 海相层; 古风化壳; 海平面变化; 地层年代; 地质调查工程; 宁德海岸带

创新点: 厘定了东南沿海福建宁德地区地层格架, 为东南沿海海侵历史及沉积环境变化提供可对比资料。

中图分类号: P737.17 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2024)04–1342–13

Temporal and spatial characteristics of Quaternary stratigraphy in Ningde area, Fujian Province and its indication of sea level change

WANG Jilong¹, LIN Fengzeng², PENG Bo¹, LIU Ping³, ZHANG Chengcheng¹, LAO Jinxiu¹,
LI Yue⁴, YU Junjie¹, WU Bin¹, CHEN Jing³

(1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. Ningde Municipal People's Government, Ningde 352101, Fujian, China; 3. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 4. Jiangsu Institute of Geological Survey, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

收稿日期: 2021–03–08; 改回日期: 2022–01–11

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20189505)和国家自然科学基金项目(41771226)联合资助。

作者简介: 王继龙, 男, 1992 年生, 工程师, 从事第四纪地质调查与研究; E-mail: wangjilong@mail.cgs.gov.cn.

通讯作者: 武彬, 男, 1982 年生, 高级工程师, 从事海岸带基础地质调查与研究; E-mail: 119825061@qq.com.

陈静, 女, 1977 年生, 教授, 自然地理与第四纪地质学专业; E-mail: jchen@geo.ecnu.edu.cn.

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] Clarifying the Late Quaternary stratigraphic framework in Ningde area, Fujian can provide basic information to support the regional division of saline and freshwater, and new comparable information for the study of Late Quaternary marine intrusion in Eastern China. **[Methods]** Through lithological, chronological and micro-body paleontological analyses of hole NDGK2 and regional borehole comparisons, we reconstructed its Late Quaternary stratigraphic framework and further explored the regional stratigraphic spreading characteristics and evolutionary processes. **[Results]** The Quaternary stratigraphy of hole NDGK2 has been deposited since the Late Pleistocene, and there are three layers of dark gray clay from bottom to top, with ages of about 90 ka, 39–44 ka, and <10 ka, respectively. **[Conclusions]** The Quaternary stratigraphy of hole NDGK2 is developed on top of ancient weathering crust, and is mainly deposited since the late Middle Pleistocene–early Late Pleistocene. There are three layers of dark gray clay in the core of the borehole, all of which are likely to be deposited during the transgression period, and the three layers of dark gray clay may correspond to MIS5, MIS3 and MIS1 phases, respectively. The spatial difference of the development of dark gray clay layer shows that the transgression scope of MIS3 is wider than that of MIS5. At that time, the paleotopography was close to the modern topography, and the tectonic subsidence was obvious. After MIS3, the structure was relatively stable, and the most extensive transgression was formed with the influence of the maximum transgression surface in the Holocene.

Key words: Late Quaternary; marine formation; ancient weathering crust; sea level change; stratigraphic age; geological survey engineering; coastal zone of Ningde

Highlights: The stratigraphic framework of Ningde area, Fujian, along the southeast coast is defined; The history of sea erosion and changes in sedimentary paleoenvironments along the southeast coast are provided with comparable information.

About the first author: WANG Jilong, male, born in 1992, engineer, engaged in Quaternary geological survey and research; E-mail: wangjilong@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: WU Bin, male, born in 1982, senior engineer, engaged in basic geological survey and research of coastal zone; E-mail: 119825061@qq.com. CHEN Jing, female, born in 1977, professor, majors in natural geography and Quaternary geology; E-mail: jchen@geo.ecnu.edu.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20189505) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41771226).

1 前言

在海陆相互作用强烈的沿海低地地区, 气候–海平面波动以及由其引发的地貌环境变化通常被认为是历史上众多古文明兴衰、人类大规模迁徙的主要因素 (Shepard, 1964; Stanley and Chen, 1996; Chen and Stanley, 1998; Turney and Brown, 2007; Chen et al., 2008; Wang et al., 2012; Liu et al., 2015)。研究历史时期海岸带的环境变迁与海平面变化关系, 能够从历史角度为当今海岸带地区人类社会与自然环境的可持续发展提供宝贵的借鉴, 对于深刻认识沿海地区的海陆交互环境特征、地貌形成机理和未来的演化趋势具有重要意义 (Yim et al., 1990; 王宏等, 2011; Yuan et al., 2015; 汪翡翠等, 2019; Wang et al., 2019; 王福等, 2020; 李建芬等, 2020; 陈永胜等, 2021; 郝秀东等, 2024)。

福建海岸带曲折, 发育多个入海河流及盆地, 自 20 世纪 80 年代以来, 该区域的海陆交互沉积环境演变一直备受关注 (林景星, 1979; 王绍鸿, 1984; 童永福, 1985; 姚庆元等, 1985; 程乾盛和龚金美, 1986; 童永福和徐书勇, 1989; 杨建明和郑晓云, 1990; 王雨灼, 1990; 陈园田, 1991; 韩书华和张静, 1992; 王绍鸿等, 1994; 曾从盛, 1997; 王海鹏等, 2000; 郑荣章等, 2002, 2005; Zong, 2004; Yue et al., 2015)。在研究福建沿海区域的海侵记录及地层年代框架方面, 前人主要使用传统的¹⁴C 和热释光测年的方法, 沉积物中热释光信号晒退速度远远低于光释光 (Optically Stimulated Luminescence, OSL) 信号的晒退速率 (Godfrey-Smith et al., 1988), 对于一些快速沉积物高残留热释光信号将会给结果带来巨大的误差。由于研究区域地理位置、测年材料受限等原因, 关于该区域晚第四纪地层的划分、晚更新世海侵时代与深海氧同位素阶段的对比存在较

大差异(程乾盛和龚金美, 1986; 蓝东兆等, 1986; 童永福和徐书勇, 1989; 王雨灼, 1990; 陈承惠等, 1990; 韩书华和张静, 1992; 王绍鸿等, 1994; 曾从盛, 1997; 程乾盛和许汉荣, 2000; 郑荣章等, 2005)。如陈承惠等(1990)在台湾海峡西部发现了金门海侵(>70 ka B.P.)、琅岐海侵(42~60 ka B.P.), 王海鹏等(2000)研究的闽江口存在晚更新世早期(110 ka B.P.)的海侵, 郑荣章等(2005)在福州盆地发现了全新世中晚期“长乐海侵”(1.44~7.86 ka B.P.)的产物和发育于晚更新世晚期“福州海侵”(44~20 ka B.P.)的产物等。因此厘定不同地区的第四纪沉积物年代地层(尤其是和大河口地质环境完全不同海湾地区晚第四纪年代地层)对于理解和约束该区域的构造和环境演变十分必要。

三都澳海湾, 口小腹大, 岛山环列, 海岸线 300 多千米, 是研究海陆交互沉积环境演变的理想海湾。本文在区域已有研究基础上, 选择了三都澳海积平原的典型钻孔岩心, 通过加速器放射性碳同位素(AMS ^{14}C)和光释光(OSL)测年方法, 结合钻孔的岩性沉积、沉积层分布特征, 探讨三都澳沿海晚第四纪地层特征。

2 地质地貌概况

三都澳又名三沙湾、宁德港, 位于福建省宁德市东南部(图 1), 居宁德、福安、霞浦三县之间, 为中国 1.84 万 km 长黄金海岸线的中点。距宁德市区 30 km, 为闽东沿海的“出入门户, 五邑咽喉”, 存在东冲半岛天然防浪屏障, 是避风条件极其良好的内湾。从地形地貌来看, 三沙湾四周为山环绕, 外围陆地整体呈四周向中心高度降低的趋势, 地形高差较大。沿海岸线 0~3 km 范围以内陆地高程多在 50 m 以下, 高山零星且均匀地分布于内陆。陆域地貌以构造侵蚀山地和构造侵蚀丘陵为主, 在内陆广泛分布。海积平原次之, 在宁德市城南镇和漳湾镇成片集中出现, 另在其他小型湾口零星分布。冲洪积平原主要见于城南镇和溪南镇。坡洪积台地仅见于东吾洋以北和田岐湾以西。沿海地区基岩以燕山期花岗岩和侏罗纪、白垩纪的陆相碎屑-火山碎屑建造为主, 第四纪沉积主要发育在东部沿海以花岗岩为基底的盆地、平原中, 一般是晚第四纪沉积。

3 样品与研究方法

本文对宁德三都澳南西侧飞鸾湾附近的 NDGK2 钻孔(26°36'24.89"N, 119°38'10.28"E, 海拔 4.940 m)进行采样分析研究, 其位置在近海湾地带, 采用套管式取心, 钻孔穿透第四纪沉积到达基岩, 取心率达 90% 以上, 孔深 95.90 m, 其中第四纪沉积厚度达 58.30 m, 记录最为完整, 钻孔分布如图 1。对岩石地层特征进行逐层描述, 按岩性相同、沉积构造类似的原则对相邻差别较小的层予以合并, 对钻孔岩心进行岩性、沉积特征进行描述。

3.1 有孔虫、介形虫鉴定分析

(1) 样品采集。本实验所分析样品长度为 7.7~54.6 m, 其岩性主要是灰黑色淤质黏土、灰黑色黏土和灰绿色黏土质粉砂。样品采集间隔 0.5~1 m, 本次在钻孔中共分析有孔虫、介形虫样品 60 件, 根据岩性差异和实验需要, 分别称取 36.28~50 g 样品进行实验室处理和分析鉴定。

(2) 样品处理与鉴定。由中国科学院南海海洋研究所实验室测试, NDGK2 钻孔有孔虫和介形虫样品的处理采用微体古生物学定量分析标准方法。首先将沉积物湿样置于 60°C 烘箱中烘干, 然后称取 50 g 干样浸泡于自来水中 2~3 天使其分散, 不添加任何分散剂。分散的样品置入 100 目铜筛(孔径 0.154 mm)中用自来水冲洗掉其中的细粒组分, 将剩余粗组分湿样置于烘箱中在 60°C 下烘干、称重, 并对大于 0.154 mm 组分中的有孔虫和介形虫进行挑选和鉴定。所有样品均在南京江南光电(集团)股份有限公司生产的 XTL-1 型双目实体显微镜下进行。对于个别样品有孔虫数量较多, 有孔虫和介形虫鉴定数目不少于 200 个; 大部分有孔虫和介形虫数量较少, 均挑尽全部砂样进行统计。有孔虫和介形虫鉴定采用统一标准, 最后计算各个样品的绝对丰度、简单分异度。其中绝对丰度指每单位干样的沉积物中所含有孔虫或介形虫的个体数, 用来表示有孔虫或介形虫分布密度, 计为 N/100g。简单分异度, 也称种数, 代表有孔虫和介形虫群落繁盛程度。根据有孔虫、介形虫鉴定结果绘制相关的丰度图。

3.2 AMS ^{14}C 年代

NDGK2 孔 40.0 m 之上共采集 10 个 AMS ^{14}C



图 1 研究区位置及钻孔分布图(收集钻孔来自福建省第四地质大队内部资料)

Fig.1 Location of study area and distribution of boreholes (The boreholes are from the internal data of the Fourth Geological Brigade of Fujian Province)

样品(表 1),由北京大学考古文博学院 ^{14}C 实验室测试。所用 ^{14}C 半衰期为 5568 a B.P.(Before Present)为距 1950 年的年代。树轮校正所用曲线为 IntCal13 atmospheric curve(Reimer et al., 2013),所用程序为 OxCal v4.2.4 Bronk Ramsey (2013); r:5,同时用 calib7.1 软件校正,校正曲线采用 IntCal13 和 Marine13,海洋碳库校正 $\Delta R = -72 \pm 39$ 。

3.3 光释光 (OSL) 年代

NDGK2 孔共取 OSL 样品 4 个,由南京师范大学释光实验室测试。样品制备、测量方法和技术见参考文献(Wintle, 1997; Murray, 2000; Murray and Wintle, 2003)。测试环境为红光暗室,测试样取未曝光的样品核心部分,先后加盐酸、双氧水,去除碳酸盐和有机质。干筛获得 38~63 μm 组分,加入氟硅酸,去除长石等矿物。再加盐酸,去除样品与氟硅酸反应过程中产生的氟化物沉淀,获得中颗粒石英组分。将提取的中颗粒石英矿物制片,在不锈钢

片上均匀涂上硅胶,将石英颗粒均匀单层黏附在钢片上。测试使用 Risø TL/OSL DA-20 型全自动释光分析系统,利用单片再生法进行石英样品的等效剂量测试。此外,测定沉积物的放射性元素铀(U)、钍(Th)和钾(K)的强度,以及沉积物的含水量,结合宇宙射线强度综合计算获得光释光沉积物样品的剂量率。利用等效剂量和剂量率比值最终计算获得测试结果(表 2)。

4 飞鸾湾 NDGK2 孔第四纪地层特征

钻孔部署均位于三都澳海湾西侧,虽然同时期沉积物的厚度不同,但岩性地层的变化趋势比较接近,以 NDGK2 孔为例,位于宁德市飞鸾镇新窑村西侧处,处于三都澳沿海潮间带人工回填区(图 1),该孔沉积特征主要反映福建省宁德市飞鸾镇地区三都澳海陆交互沉积序列,沉积物以细颗粒物质为主,根据沉积物的岩性、颜色、层理类型及沉积结构

表 1 NDGK2 钻孔 AMS ¹⁴C 测年结果
Table 1 AMS ¹⁴C ages of NDGK2 borehole

Lab编号	样品	样品原编号	深度/m	¹⁴ C年代/(B.P.)	树轮校正后年代 (cal B.P.)		概率中值年龄 (cal. a B.P.)
					1σ (68.2%)	2σ (95.4%)	
BA181838	植物残体	NDGK2 ¹⁴ C-1	8	580±20	601~630	589~641	607
BA181839	螺 (完整)	NDGK2 ¹⁴ C-2	14.7	4580±20	5295~5319	5284~5323	4809
BA181840	碳化植物残体	NDGK2 ¹⁴ C-3	20.9	2230±20	2178~2244	2155~2270	2222
BA181841	片状贝壳碎片	NDGK2 ¹⁴ C-4	24.9	8195±25	9088~9142	9032~9258	8681
BA181842	贝壳碎屑	NDGK2 ¹⁴ C-5	25.75	8225±25	9163~9250	9090~9290	8732
BA181843	植物残体	NDGK2 ¹⁴ C-5-2	25.75	7995±25	8862~8919	8770~8999	8881
BA181844	碳化植物残体	NDGK2 ¹⁴ C-6	31.85	14450±35	17520~17684	17450~17811	17610
BA181845	碳化植物残体	NDGK2 ¹⁴ C-7	33.1	36320±230	40716~41272	40408~41485	40975
BA181846	碳化植物残体	NDGK2 ¹⁴ C-8	35.1	>43320			
BA181847	碳化植物残体	NDGK2 ¹⁴ C-9	39	33960±180	38311~38680	38001~38885	38480

表 2 NDGK2 钻孔 OSL 测年结果
Table 2 OSL ages of NDGK2 borehole

实验室编号	样品编号	深度/m	粒径/μm	K/%	Th/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	质量含水量/%	等效剂量 (Gy)	年龄/ka
77	NDGK2-OSL-2	41.2~41.3	38~63	2.26	17.2	4.14	41.8	298.1	92.2±7.4
78	NDGK2-OSL-3	46.9~47.0	38~63	1.69	20.7	6.66	30.0	202.0	50.9±4.8
79	NDGK2-OSL-4	48.9~49.0	38~63	1.88	16.5	4.96	23.3	240.2	64.8±6.3
80	NDGK2-OSL-5	53.3~53.4	38~63	2.74	18.7	3.54	37.5	341.3	92.2±6.9

特征等, NDGK2 孔中风化基岩以上的岩心从上到下可划分为 17 段(图 2)。

(1) 回填土, 中细砂, 不见层理, 松散, 以石英砂为主。分选较好。为附近海域吹填形成。(0~7.30 m)

(2) 灰黑色, 黏土。不显层理, 块状。局部见植物碎屑不均匀分布, 见少量贝壳碎屑零星分布, 其中 20~20.3 m 处贝壳碎屑富集, 为潮坪相沉积, 与下部地层突变接触。(7.30~25.75 m)

(3) 黄褐色黏土, 块状厚层。见少量铁结核和钙质结核不均匀分布, 局部见青灰色矿物呈片状分布。推测该段为河漫滩沉积, 形成时期为末次盛冰期。与下部地层渐变接触。(25.75~29.55 m)

(4) 砾石, 中间有棕黄色粉砂质黏土填充, 见少量青灰色矿物零星分布。砾径小者 2~4 cm, 最大可达 10 cm, 分选较差, 磨圆中等, 分析该层为冲洪积河道滞留相。(29.55~30.30 m)

(5) 黄褐色, 黏土, 见大量青灰色矿物交错分布, 偶见红褐色铁质结核零星分布, 不显结构构造。饱和, 可塑, 与下部地层渐变接触。(30.30~31.10 m)

(6) 上部灰绿色, 下部青灰色, 中粗砂, 分选较差, 不显层理。上不见少量棕黄色矿物分布, 与下部地层突变接触。(31.10~31.50 m)

(7) 棕黄色, 黏土, 见少量青灰色矿物呈片状分布, 铁锰结核零星分布于下段。与下部地层渐变接触。(31.50~31.65 m)

(8) 灰黑色, 黏土, 见大量木炭碎屑零星分布, 偶见少量贝壳碎屑。32.45~32.65 m 受钻机钻进扰动严重, 呈流塑状态。与下部地层突变接触。(31.65~42.30 m)

(9) 蓝灰色, 以黏土为主, 顶部和底部分别为细砂和粉砂过渡区。不显纹理, 块状厚层。见大量木炭碎屑不均匀分布, 见少量贝壳碎屑零星分布。与下部地层渐变接触。(42.30~46.10 m)

(10) 灰白色, 上部为砂层, 中细砂, 分选较差。以石英砂为主, 见少量长石, 底部为黏土质粉砂, 与下部地层渐变接触。(46.10~47.00 m)

(11) 黄褐色, 黏土质粉砂, 黏土含量约 40%, 不显层理, 块状厚层。见大量植物碎屑, 顶部尤为富集, 碳化程度较低, 保存较完好。(47.00~48.00 m)

(12) 灰绿色, 黏土质粉砂, 黏土含量约 30%, 不显层理, 块状厚层。顶部见植物碎屑, 碳化程度较低, 保存较完好。见少量钙质结核不均匀分布。与下部地层渐变接触。(48.00~50.65 m)

(13) 青灰色, 粉砂质黏土, 粉砂含量<20%。见少量钙质结核不均匀分布。局部见水平纹理, 块状厚层。与下部地层突变接触。(50.65~51.90 m)

(14) 砾石层。被黄绿色砂质粉砂填充。分选较差, 磨圆较差, 为次棱角—棱角状。表面受铁质浸染严重。推测为冲洪积沉积的产物, 砾石主要为近源的花岗岩。与下部地层突变接触。(51.90~53.00 m)

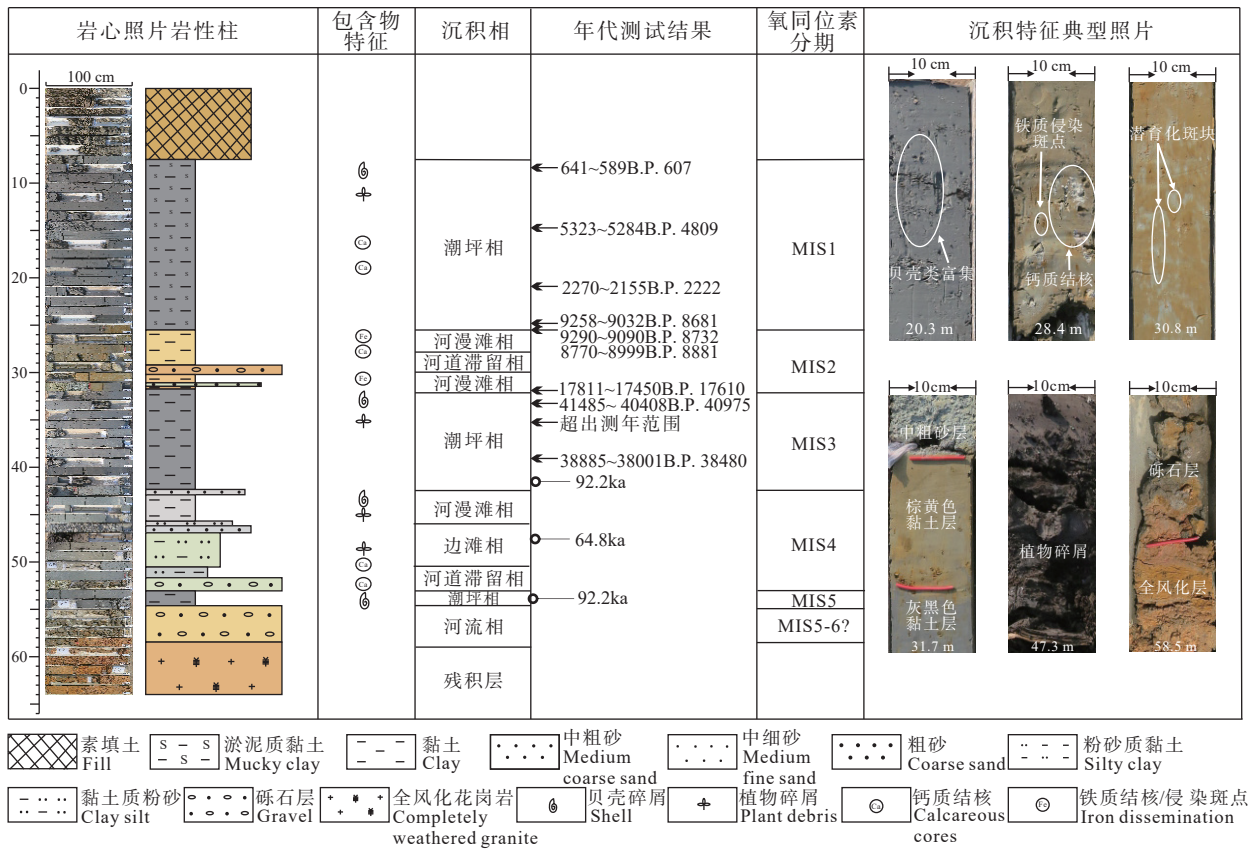


图 2 NDGK2 钻孔地层及典型沉积特征
Fig.2 Sedimentary facies and strata of NDGK2 borehole

(15) 灰黑色, 黏土, 水平纹理, 块状厚层。局部见钙质结核、贝壳碎屑零星分布, 见少量青灰色黏土层不均匀分布。

(53.00~54.57 m)

(16) 砾石层, 顶部填充物为灰黑色黏土, 下部为红褐色黏土。砾石以花岗岩和凝灰岩为主, 花岗岩为中细粒结构, 块状构造, 表面灰白色, 以长石和石英为主, 中等风化。凝灰岩主要为深灰色, 熔结结构, 块状构造。磨圆中等, 次圆—次棱角状, 分选中等, 砾径大多 3~5 cm。与下部地层突变接触。

(54.57~58.30 m)

(17) 棕黄色, 全风化层, 上部颗粒为中粗砂级, 下部为粉砂级。见大量长石、石英等矿物分布, 见少量暗色矿物零星分布。推测原岩为花岗岩。

(58.30~66 m)

根据颜色、包含物、沉积等特征, 辨识出 3 层深灰色黏土层(图 2), 由老至新分别以 I、II、III 表示, 分别对应分层层号 15、8 和 2, 具体特征如下:

第 I 层: 埋深 53~54.57 m, 厚 1.57 m, 为灰黑色黏土, 水平纹理, 块状厚层。局部见钙质结核、贝壳碎屑零星分布, 见少量青灰色黏土层不均匀分布。

第 II 层: 埋深 31.65~42.30 m, 厚 10.65 m, 为灰黑色黏土, 见大量木炭碎屑局部分布, 偶见少量贝壳碎屑。

第 III 层: 埋深 7.30~25.75 m, 厚 18.45 m, 为灰黑色淤泥质黏土, 不显层理, 块状厚层。局部见植物碎屑不均匀分布, 贝壳碎屑不均匀分布。

5 微体古生物鉴定结果及分布特征

5.1 有孔虫、介形虫鉴定结果

在 NDGK2 钻孔的 60 个样品中, 共统计鉴定有孔虫 1854 枚, 分属 8 个属种; 介形虫 290 枚, 分属 6 个属种。有孔虫和介形虫主要属种如下:

样品中没有发现浮游有孔虫; 底栖有孔虫有 6 属 8 种, 其中玻璃质壳主要有螺旋壳类和平旋壳类两种(图 3); 螺旋壳类有孔轮虫属(*Cavarotalia Müller-Merz, 1980*)的同现孔轮虫(*Cavarotalia annectens Parker and Jones, 1865*); 平旋壳类有筛九字虫属(*Cribrononion Thalmann, 1947*)的亚洲筛九

字虫(*Cribronion asiaticum* Polski, 1959); 希望虫属(*Elphidium* Montfort, 1808)的异地希望虫(*Elphidium advenum* Cushman, 1922)、茸毛希望虫(*Elphidium hispidulum* Cushman, 1936); 瓷质壳主要有抱环虫属(*Spiroloculina* d'Orbigny, 1826)的光滑抱环虫(*Spiroloculina laevigata* Cushman et Todd, 1944); 五块虫属(*Quinqueloculina* d'Orbigny, 1826)的半缺五块虫(*Quinqueloculina seminulanguata* Linné, 1767); 三块虫属(*Triloculina* d'Orbigny, 1826)的浑圆三块虫(*Triloculina rotunda* d'Orbigny, 1826)和三棱三块虫(*Triloculina tricarinata* d'Orbigny, 1826); 样品中没有出现钙质壳。

介形虫有 5 属 6 种, 包括中华美花介属(*Sinocytheridea* Hou, 1978)的典型中华美花介(*Sinocytheridea impressa* Brady, 1998); 新单角介属(*Neomonoceratina* Kingma, 1948)的欢乐新单角介(*Neomonoceratina delicat* 勾韵娴, 1983); 双角花介属(*Bicorncythere* Shornikov et Shaitarov, 1979)的美山双角花介(*Bicorncythere bisanensis* Okubo, 1985); 戳花介属(*Stigmatocythere* Siddiqui, 1971)的脊戳花介(*Stigmatocythere costa* Hu, 1977)和鲁斯曼戳花介(*Stigmatocythere rosemani* Kingma, 1998); 弯贝介属(*Loxoconcha* Sars, 1925)的中国弯贝介(*Loxoconcha sinensis* Brady, 1869)。

在所有的 60 个样品中, 有 19 个样品发现有孔虫或介形虫。其中在深度 7.7~25.5 m, 有孔虫和介

形虫相对集中, 基本呈现连续分布; 在深度 25.5~54.6 m, 没有发现有孔虫或介形虫。

5.2 有孔虫、介形虫组合特征

5.2.1 底栖有孔虫组合特征

NDGK2 钻孔底栖有孔虫总丰度、简单分异度如图 4 所示, 从底栖有孔虫总丰度变化看, 在钻孔深度 7.7~25.5 m 间呈现较连续分布特征, 丰度变化在 9~2217 枚/100 g, 在 22.7 m 分别出现明显峰值, 丰度达到 2217 枚/100 g。从简单分异度(种数)看, 底栖有孔虫简单分异度在 2~7 种, 在深度 9.7 m 处均达到最大值。从主要属种的丰度变化看, 底栖有孔虫主要以同现孔轮虫、亚洲筛九字虫和异地希望虫为主; 茸毛希望虫、光滑抱环虫、半缺五块虫、浑圆三块虫和三棱三块虫也较丰富。钻孔其他深度没有发现底栖有孔虫。从 NDGK2 钻孔底栖有孔虫的组合变化看, 主要以玻璃质壳、瓷质壳为主, 同现孔轮虫、亚洲筛九字虫、异地希望虫、光滑抱环虫和半缺五块虫等丰度较高, 表明该钻孔在底栖有孔虫出现的深度属正常的滨海—浅海沉积环境。

5.2.2 介形虫组合特征

NDGK2 钻孔介形虫丰度总体上较底栖有孔虫少, 其变化趋势与底栖有孔虫相似。介形虫总丰度、简单分异度如图 3 所示, 介形虫集中分布在钻孔深度 7.7~23.7 m。介形虫总丰度变化在 0~156 枚/100g, 在深度 22.7 m 处达到峰值, 丰度达到 156 枚/

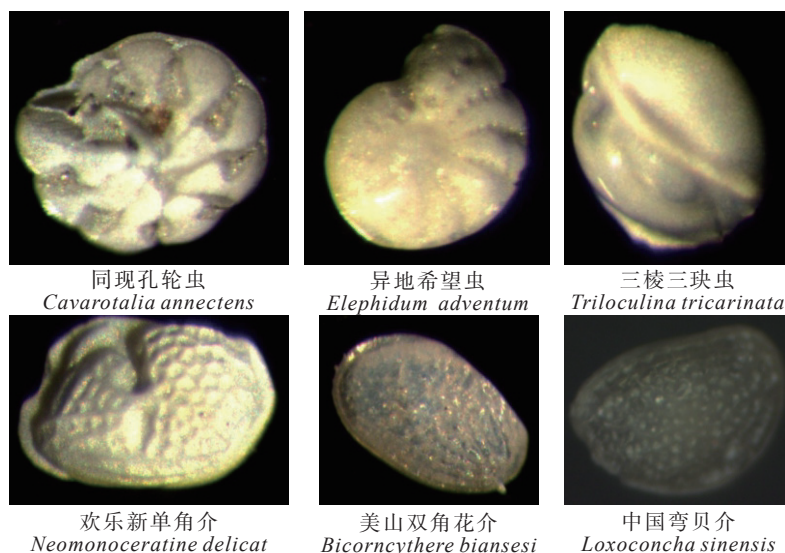


图 3 NDGK2 钻孔典型有孔虫、介形虫照片
Fig.3 Photographs of typical foraminifera and ostracods in NDGK2 borehole

100g。从简单分异度(种数)看,介形虫的种类较少,在 0~4 种,在 9.7 m 处简单分异度达到最高值,为 4 种。钻孔其他深度没有发现介形虫。从主要属种的丰度变化看,该钻孔介形虫主要以典型中华美花介、美山双角花介和欢乐新单角介为主,还有少量的鲁斯曼戳花介、脊戳花介和中国弯贝介。从 NDGK2 钻孔介形虫组合变化看,主要以典型中华美花介和欢乐新单角介多为广盐性河口滨岸相组合;而美山双角花介、鲁斯曼戳花介、脊戳花介和中国弯贝介等多为内、外陆架沿岸的组合。

6 讨论

6.1 NDGK2 孔深灰色黏土层成因及时代

NDGK2 孔第四纪地层中记录了 3 套深灰色黏土层(图 2),与其上下以杂色花斑黏土或沙质卵石为主的地层在颜色、结构、包含物、沉积特征等方面差别较大,层内含水量较高,质地较为均匀,第 I 层内有贝壳碎屑零星分布,第 II、III 层内局部贝壳、螺壳等碎屑较富集,底部含有较多碳化植物碎片或泥炭,是较为典型的海相沉积物。但是,有孔虫和介形虫化石仅在第三层黏土层中有所发现且连续分布,其他两层中并无记录(图 4),很可能是由于 NDGK2 点处当时沉积环境受海水影响较为有

限,不利于有孔虫和介形虫的生存,或者后期沉积环境等原因导致未能保存。韩书华和张静(1992)对福建沿海马尾地区的钻孔研究,发现位于上更新统上段的岩心中同样未出现有孔虫及介形虫,但硅藻类化石均属于咸水—半咸水—淡水混生。尽管对海侵次数和时代具有争议,福建沿海地区的晚更新世海侵地层还是普遍存在的(童永福和徐书勇,1989;韩书华和张静,1992;王绍鸿等,1994;郑荣章等,2005)。因此,本文推测这 3 层深灰色黏土层均为海相沉积物,还需要结合其他替代指标进行深入分析。

NDGK2 孔第四纪地层中记录的 3 套深灰色黏土(图 2),第 I 层 53.3~53.4 m 处光 OSL 年龄为 92.2 ka,很可能对应于 MIS5 期。第 II 层中 AMS ¹⁴C 的年龄均超过 30000 cal. a B.P.,其底部 41.20~41.30 m 处 OSL 年龄也为 92.2 ka,其下伏的陆相地层 46.9~47.00 m、48.9~49.00 m 处 OSL 年龄分别为 50.9 ka、64.8 ka,推断该层对应于 MIS3 期,39 m 和 41.2~41.3m 的样品定年数据差别大,沉积不一定连续,故还需要更多光释光年龄支撑。I 层底部 24.9 m 处 AMS ¹⁴C 的年龄记录为 8681 cal. a B.P.,显示了其属于 MIS1 时期的沉积物。根据前述的沉积物岩性特征推测这 3 层均为海相沉积物,很可能对应于 MIS5、MIS3 和 MIS1 时期 3 次海侵时期。

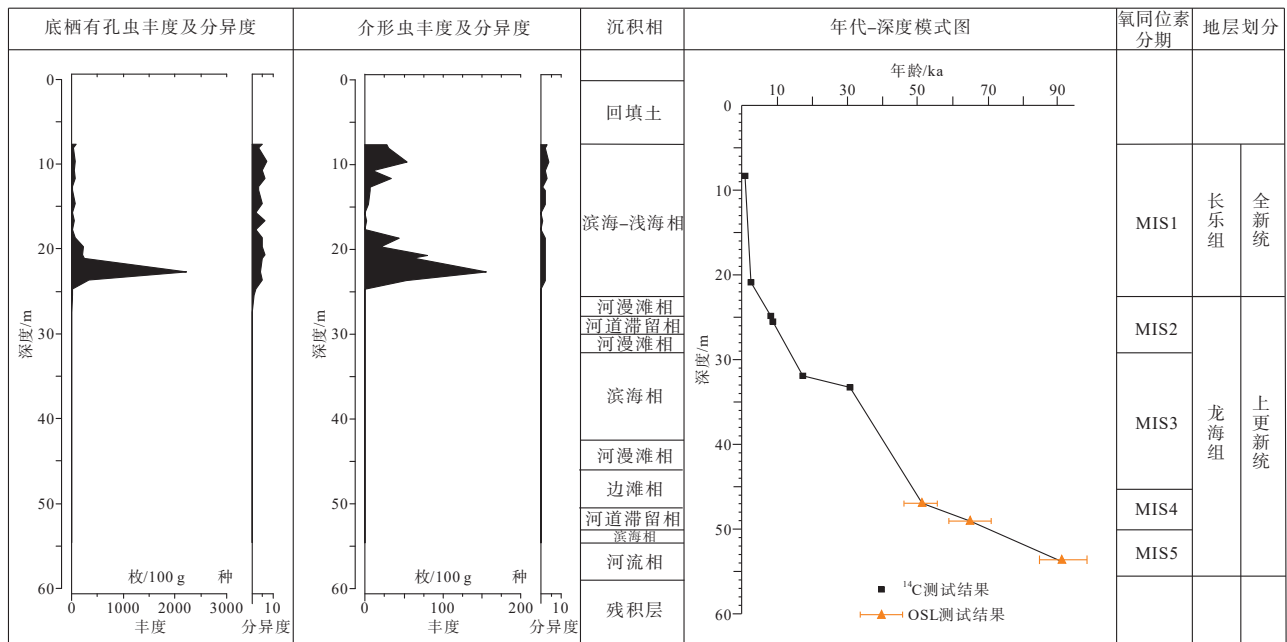


图 4 NDGK2 钻孔微体古生物分布特征及年代地层框架

Fig.4 Distribution characteristics of micropaleontology and chronostratigraphic framework of NDGK2 borehole

在前人对福建沿岸第四纪海侵地层的研究中,除了全新世长乐海侵地层划分较为一致外,对晚更新世海侵次数及时代的认识较为复杂,导致对各区域海侵次数认识不一(蓝东兆等, 1986; 童永福和徐书勇, 1989; 陈承惠等, 1990; 韩书华和张静, 1992; 王绍鸿等, 1994; 曾从盛, 1997; 郑荣章等, 2005), 整体来看前人研究中确定普遍认同的海侵划分为 2 次: 一次是晚更新世晚期的“福建海侵”(年代介于 20~44 ka B.P., ^{14}C), 另一次则为全新世“长乐海侵”(马明明等, 2016)。这和本研究中 NDGK2 孔第 II、III 层深灰色黏土层的时代较为一致, 但是钻孔最下层 I 层(MIS5 期)的深灰色黏土层在上述研究中很少被记录, 可能是由于 NDGK2 钻孔所处古地形较低的原因。

6.2 NDGK2 孔第四纪年代地层框架及地层展布特征

NDGK2 孔的 ^{14}C 测年结果中(表 1), 35.1 m 处 NDGK2 ^{14}C -8 样品测试年龄超出测试范围, 故舍弃。NDGK2 ^{14}C -5 与 NDGK2 ^{14}C -5-2 为同一深度值测试的不同类型样品, 贝壳明显和植物残体所得的年龄差别很小, 说明该层的年龄基本处于早全新世。其余样品测年值基本随深度增加而依次增大, 但是 14.7 m 处 NDGK2 ^{14}C -2 样品的年龄值明显偏老, 且为螺壳, 很可能是外海带入老地层中的物质所致, 和后期区域剥蚀与重新沉积有关, 并不能真实反映该深度地层年龄, 这一年龄倒置现象在海岸地区经常出现(Zhang et al., 2015; Gao et al., 2016)。NDGK2 孔的 OSL 测年结果中(表 2), NDGK2-OSL-2、NDGK2-OSL-5 测试结果年代一致, 均为 92.2 ka, 根据 NDGK2-OSL-3、NDGK2-OSL-4 样品测试结果(50.9 ka、64.8 ka), 本文认为 NDGK2-OSL-2 样品偏老, 更倾向于使用 NDGK2-OSL-4 和 NDGK2-OSL-5 测试年龄。

该孔 53.3~53.4 m 处光释光测年结果为 92.2 ka, 其下为卵石层, 在古风化壳之上约 4.9 m, 指示着第四纪沉积可能开始于中更新世末或晚更新世初期, 此前该区处于剥蚀状态。韩书华和张静(1992)对马尾钻孔的磁性地层学资料以及热释光年代研究也显示, 基岩之上基本是 12 万年以来的沉积, 和我们钻孔揭示的地层年代较为一致。之上 31.85 m 处年龄为 17610 cal. a B.P., 为第 II 层深灰色黏土层和其上河漫滩相(第一硬黏土层)交界处, 其下年

龄均超过 30000 cal. a B.P., 说明该孔 31.85 m 处为末次冰盛期时代的地层。孔深 25.75 m 年龄为 8732 cal. a B.P., 其上(除回填土外)主要为深灰色淤泥质黏土, 属于全新世时期, 这一时期的沉积记录和福建沿海以及中国东部沿海记录都较为一致(蓝东兆等, 1986; 童永福和徐书勇, 1989; 陈承惠等, 1990; 韩书华和张静, 1992; 王绍鸿等, 1994; 曾从盛, 1997; 郑荣章等, 2005)。

通过对宁德沿海钻孔岩心年代地层框架的重新厘定, 结合前人对福建沿海区域晚第四纪地层的划分(童永福, 1985; 程乾盛和龚金美, 1986; 程乾盛和许汉荣, 2000; 张璞等, 2005; 郑荣章等, 2005; 张路等, 2007)(表 3), 初步将宁德三都澳飞鸾湾海岸 NDGK2 岩心 58.3 m 以上第四纪地层从老至新划分为龙海组(海陆相交互沉积)、长乐组(海相沉积)(图 4)。

根据所得岩心并结合搜集到的钻孔资料, 根据其沉积特征构建 2 条剖面(图 4)。地层对比显示宁德地区第四纪地层普遍发育在古风化壳之上, 基底高程在 -60 m 以内, 从陆向海埋深逐渐变大。第四纪地层底部普遍发育一套陆相沉积地层: 下部为卵石层, 卵石直径最大可达 5~10 cm, 磨圆度较好, 为冲洪积相, 陆相沉积; 上覆沙质和黏土层, 推测为河流边滩—河漫滩相。这套陆相地层之上覆盖着 1~3 层深灰色黏土沉积, 和 NDGK2 孔十分相似, 普遍粒度较细, 均质, 且局部含有大量贝壳和植物碎屑, 依据前人研究成果, 推测为海相地层(童永福和徐书勇, 1989; 韩书华和张静, 1992; 曾从盛, 1997; 郑荣章等, 2005)。这些海相地层之间多为杂色硬黏土或砂质卵石等陆相沉积。

综上, 宁德地区第四纪地层中最多可识别出 3 层深灰色黏土层(图 5)。根据 NDGK2 孔的年代地层框架可知, 第 I 层深灰色黏土层时代归属于 MIS5 期, 在该区分布极为有限, 仅见于 NDGK2 孔, 且厚度仅为 1.57 m; 第 II 层时代可能归属于 MIS3 期, 分布区域也较为局限, 仅在研究区现代宁德湾内区域, 层厚约 17 m 以内; 第 III 层为全新世 MIS1 期沉积, 分布最广泛, 常见于现代宁德湾内区域以及大部分陆上区域, 层厚约 30 m 以内。根据 NDGK2 孔年代地层框架以及区域地层对比结果可知, 除最底层砾石层可能沉积于 MIS6~MIS5

期外, 宁德地区第四纪沉积主要开始于晚更新世 (MIS5 期), 厚度在 60 m 以内, 从陆向海厚度变大 (图 3, 图 4)。

6.3 福建宁德地区晚更新世以来沉积环境演化

通过第四纪年代地层、微体古生物分析, 可知本区在晚更新世以前地壳处于构造抬升区, 主要以遭受剥蚀侵蚀为主状态。之后本区经历了多次气候-海平面波动影响下的沉积环境演化过程。在晚

更新世以前地壳处于抬升区, 基本以遭受剥蚀为主, 形成了很厚的风化壳。进入晚更新世后, 伴随着 MIS5 期海平面升高, 该区东南部地势较低区域首次受到了海水的入侵, 形成第一海侵层, 以潮间带沉积环境为主。海水影响范围十分有限, 当时古地势还是处于较高。MIS4 期间, 全球海平面处于低海面, 该时段沉积速率极低, 存在沉积间断。MIS3 期间, 气候全球海平面有所回升, 海水也再次进入本区, 较 MIS5 期海侵范围扩大, 当时古地势已

表 3 福建省第四纪地层划分

Table 3 Quaternary stratigraphic division of Fujian Province

年代地层	童永福(1985)	程乾盛和龚金美(1986)	程乾盛和许汉荣(2000)	张璞等(2005)	郑荣章等(2005)	张路等(2007)
全新世	上	长乐组	江田组	江田组	长乐组上部	江田组
	中	长乐组	长乐组	长乐组	长乐组	长乐组
	下	东山组	东山组	东山组	长乐组下部	东山组
更新世	上	龙海组	龙海组	龙海组	龙海组	龙海组
	中	同安组	同安组	同安组	同安组	同安组
	下	天宝组	天宝组	天宝组	残积层	残积层

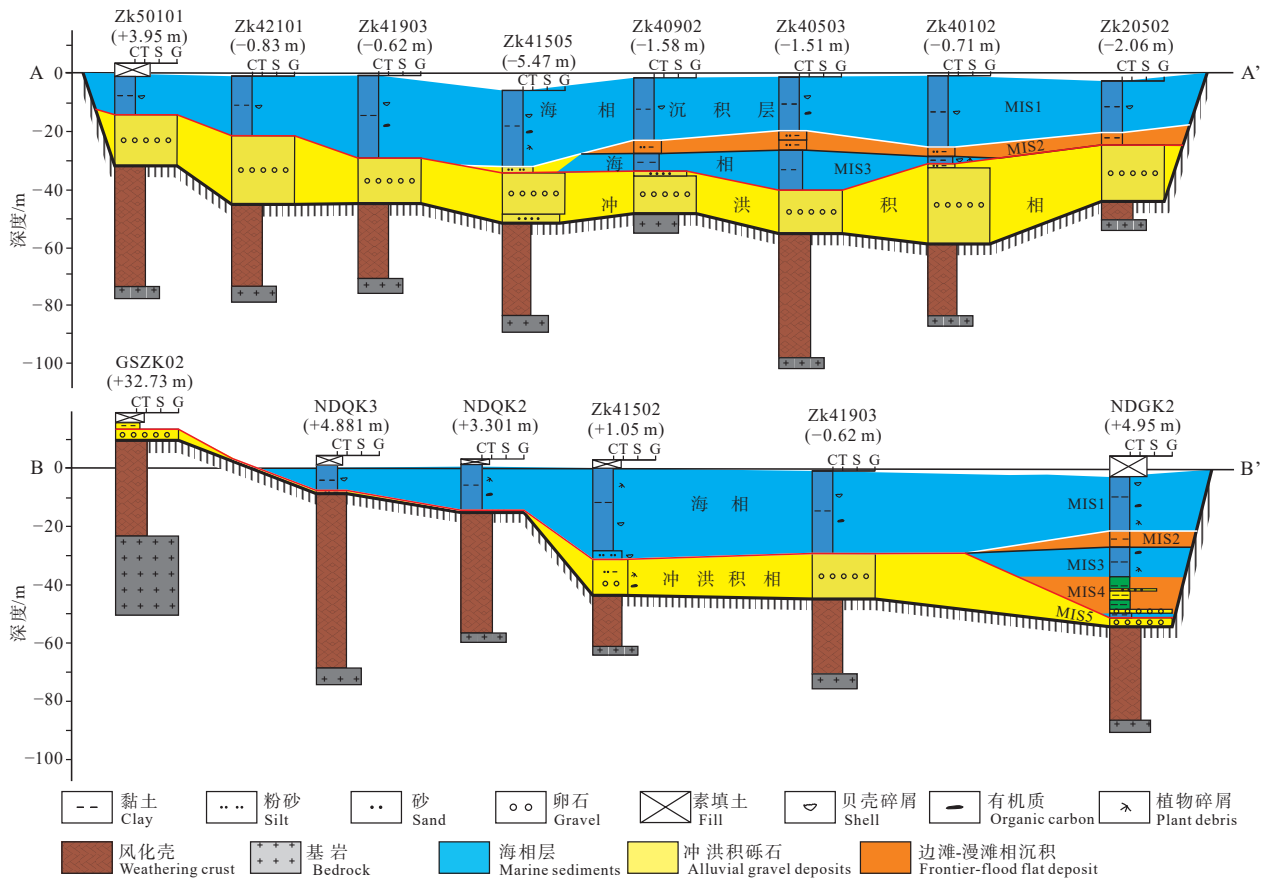


图 5 宁德地区第四纪地层剖面(A, B 剖面位置见图 1)

Fig.5 Quaternary stratigraphic profiles in Ningde area (Locations of profile A and B are shown in Fig.1)

经接近现代地势。末次冰盛期(MIS2期),海水完全退出该区。进入全新世(MIS1期),全球海平面影响下该区海平面再次上升,形成本区第四纪以来最大的海侵。

复杂特殊的第四系沉积环境导致封存海水在宁德沿海海积平原地区水质形成中起主要作用,多具咸水、微咸水等分布,地下水淡水资源相对紧缺。通过与前人研究的对比(李映平, 2020),发现沿海海积平原区 MIS1、MIS3 时期沉积物主要是海积淤质黏土,富水性极弱,基本不含水,多咸水或微咸水;海陆交互层中,由于含水岩性不同及富水性不均,一般低海平面时期形成的古河道、古港道的泥质砂砾石层为含水层,主要补给来源为远离含水层的山区基岩裂隙水及松散堆积层孔隙水,由于地表水及降水长期补给地下水,使之水质逐渐淡化,水质复杂,淡水、咸水及微咸水均有分布。

7 结 论

(1)根据钻孔 OSL 年代综合分析,NDGK2 孔第四纪地层发育于古风化壳之上,主要为中更新世末—晚更新世初以来的沉积。

(2)钻孔岩心中存在 3 层深灰色黏土层,推测这些黏土层很可能均为海侵时期沉积物,结合光释光(OSL)和 AMS ^{14}C 年代可知,3 层深灰色黏土层可能分别对应于 MIS5、MIS3 和 MIS1 期。

(3)根据区域地层对比剖面,深灰色黏土层发育的空间差异性,表明 MIS3 较 MIS5 期海侵范围扩大,当时古地势已经接近现代地势,构造沉降明显,之后构造相对稳定,伴随着全新世最大海侵面的影响,形成了最广泛的一次海侵。

References

- Chen Chenghui, Lan Dongzhao, Yu Yongfen, Zhang Weilin. 1990. Late Quaternary stratigraphy in the Western Taiwan Straits[J]. *Quaternary Sciences*, 10(4): 301–307 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuantian. 1991. A preliminary study of the Late Quaternary marine strata in Fujian coastal area[J]. *Journal of Stratigraphy*, (4): 285–290 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yongsheng, Li Jianfen, Yang Peng, Wang Fu, Tian Lizhu. 2021. AMS ^{14}C dating and "dwell time" of marine shells on the north coast of Bohai Bay[J]. *Geological Survey and Research*, 44(4): 23–27 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z, Stanley D J. 1998. Sea-level rise on Eastern China's Yangtze Delta[J]. *Journal of Coastal Research*, 14(1): 360–366.
- Chen Z, Zong Y, Wang Z, Wang H, Chen J. 2008. Migration patterns of Neolithic settlements on the abandoned Yellow and Yangtze River deltas of China[J]. *Quaternary Research*, 70(2): 301–314.
- Cheng Qiansheng, Gong Jinmei. 1986. The establishment and correlation of Jiangtian Formation of Late Holocene in the coastal area of Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 5(3): 15–22 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Qiansheng, Xu Hanrong. 2000. Classification of Quaternary strata from the drilled well ZK51 in Dongshan Island and contrast with some strata in the Southeast Fujian coastal area[J]. *Geology of Fujian*, 19(1): 24–33 (in Chinese with English abstract).
- Gao S, Wang D, Yang Y, Zhou L, Zhao Y, Gao W, Han Z, Yu Q, Li G. 2016. Holocene sedimentary systems on a broad continental shelf with abundant river input: Process-product relationships[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 429(1): 223–259.
- Godfrey-Smith D I, Huntley D J, Chen W H. 1988. Optical dating studies of quartz and feldspar sediment extracts[J]. *Quaternary Science Reviews*, 7(3/4): 373–380.
- Han Shuhua, Zhang Jing. 1992. Quaternary stratigraphic division and marine bed analysis of Mawei area, Fuzhou[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 12(1): 85–95 (in Chinese with English abstract).
- Hao Xiudong, Lao Yueying, Ouyang Xuhong, Jiang Xingyu, Wang Fu, Tian Lizhu, Shi Peixin, Chen Yongsheng, Wang Hong, Li Jianfen, Shang Zhiwen. 2024. Late Pliocene (6.8–0.004 Ma) vegetation evolution and sea-level fluctuations on the southern coastal plain of Laizhou Bay, Bohai Sea, China[J]. *Geology in China*, 51(2): 689–700 (in Chinese with English abstract).
- Lan Dongzhao, Yu Yongfen, Chen Chenghui, Xie Zaituan. 1986. Preliminary study on Late Pleistocene transgression and Holocene sea-level fluctuation in Fuzhou Basin[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 6(3): 103–111 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianfen, Shang Zhiwen, Chen Yongsheng, Tian Lizhu, Jiang Xingyu, Wang Fu, Hu Yunzhuang, Li Yong, Yang Peng, Wen Mingzheng, Yuan Haifan, Shi Peixin, Wang Hong. 2020. Research status and protection suggestions on oyster reef in Bohai Bay[J]. *Geological Survey and Research*, 43(4): 317–333 (in Chinese with English abstract).
- Li Yingping. 2020. Hydrogeological characteristics and optimal selection of groundwater emergency water source in main urban area of Ningde City, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 39(1): 63–70 (in Chinese with English abstract).
- Lin Jingxing. 1979. Preliminary notes on Holocene transgression in the seaboard of Fujian, South China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 24(11): 517–520 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y, Sun Q, Thomas I, Zhang L, Finlayson B, Zhang W, Chen J, Chen Z. 2015. Middle Holocene coastal environment and the rise of the Liangzhu City complex on the Yangtze delta, China[J]. *Quaternary Research*, 84(3): 326–334.

- Ma Mingming, Liu Xiuming, Zhou Guohua, Liu Gengyu, Chen Bolin. 2016. A review of Late Quaternary transgression studies and some basic questions in Fujian coastal area[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 11(3): 9–19 (in Chinese with English abstract).
- Murray A S. 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol[J]. *Radiation Measurements*, 32(1): 57–73.
- Murray A S, Wintle A G. 2003. The single aliquot regenerative dose protocol: Potential for improvements in reliability[J]. *Radiation Measurements*, 37(4): 377–381.
- Reimer P J, Bard E, Bayliss A, Beck J W, Staff R A. 2013. IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP[J]. *Radiocarbon*, 55(4): 1869–1887.
- Shepard F P. 1964. Sea-level changes in the past 6000 years, possible archaeological significance[J]. *Science*, 143(3606): 574–576.
- Stanley D J, Chen Z. 1996. Neolithic settlement distributions as a function of sea level controlled topography in the Yangtze delta, China[J]. *Geology*, 24(24): 1083–1086.
- Tong Yongfu. 1985. A outline of the Quaternary deposits of Fujian Province[J]. *Quaternary Sciences*, 6(1): 99–106 (in Chinese with English abstract).
- Tong Yongfu, Xu Shuyong. 1989. The Quaternary and active fault in coastal area of Fujian[J]. *Geology of Fujian*, 8(2): 81–99 (in Chinese with English abstract).
- Turney C S M, Brown H. 2007. Catastrophic Early Holocene sea level rise, human migration and the Neolithic transition in Europe[J]. *Quaternary Science Reviews*, 26(17): 2036–2041.
- Wang F, Li J F, Shi P X, Shang Z W, Li Y, Wang H. 2019. The impact of sea-level rise on the coast of Tian-Hebei, China[J]. *China Geology*, 2(1): 26–39.
- Wang Feicui, Shi Peixin, Shang Zhiwen, Xiao Guoqiang, Wang Fu. 2019. Research on coastline of Tianjin[J]. *Geological Survey and Research*, 42(4): 278–281 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fu, Shang Zhiwen, Li Jianfen, Jiang Xingyu, Wen Mingzheng, Shi Peixin, Tian Lizhu, Chen Yongsheng, Yang Peng, Hu Yunzhuang, Li Yong, Yuan Haifan, Wang Hong. 2020. Research status and protection suggestions of chenier on Bohai Bay[J]. *Geological Survey and Research*, 43(4): 293–316 (in Chinese with English abstract).
- Wang Haipeng, Zhang Peihui, Chen Feng, Ye Yanyi, Zheng Zhifeng. 2000. Sedimentary characteristics and environment of underwater delta in Minjiang Estuary II. Sedimentary characteristics and environment since Late Pleistocene[J]. *Taiwan Strait*, 19(2): 132–140 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hong, Che Jiyang, Song Meiyu, Geng yan, Jiang Xingyu, Su Shengwei, Wang Haifeng, Li Jianfen, Pei Yandong, Wang Fu. 2011. Study of Quaternary geology on the west coast of Bohai Bay[J]. *Geological Survey and Research*, 34(2): 81–97 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shaohong. 1984. The development of the Fuzhou Basin and shelf transgression in the western coast of the Taiwan Strait[J]. *Oceanologia et limnologia Sinica*, 15(4): 380–387 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shaohong, Yang Jianming, Zeng Congsheng, Wu Xuezhong, Yu Mingtong. 1994. Sea level changes since Late Pleistocene along Fujian coast[J]. *Taiwan Strait*, 13(2): 166–175 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuzhuo. 1990. The classification of Quaternary strata in Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 9(4): 289–306 (in Chinese with English abstract).
- Wang Z, Zhuang C, Saito Y, Chen J, Zhan Q, Wang X. 2012. Early mid-Holocene sea-level change and coastal environmental response on the southern Yangtze delta plain, China: Implications for the rise of Neolithic culture[J]. *Quaternary Science Reviews*, 35(6): 51–62.
- Wintle A G. 1997. Luminescence dating: laboratory procedures and protocols[J]. *Radiation Measurements*, 27(5/6): 769–817.
- Yang Jianming, Zheng Xiaoyun. 1990. Sea-level fluctuations during the past 6000 years along the coast of Fujian[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 10(4): 67–75 (in Chinese with English abstract).
- Yao Qingyuan, Zhang Hunan, Zhang Jingwen, Zhao Xitao. 1985. A preliminary study on the Late Pleistocene stratigraphy along the coastal area of Southern Fujian[J]. *Seismology and Geology*, 7(4): 32–40 (in Chinese with English abstract).
- Yim W, Ivanovich M, Yu K. 1990. Young age bias of radiocarbon dates in pre-Holocene marine deposits of Hong Kong and implications for Pleistocene stratigraphy[J]. *Geo-Marine Letters*, 10(3): 165–172.
- Yuan R, Zhu J, Wang B. 2015. Impact of sea-level rise on saltwater intrusion in the Pearl River Estuary[J]. *Journal of Coastal Research*, 31(2): 477–487.
- Yue Y, Zheng Z, Rolett B V, Ma T, Chen C, Huang K, Lin G, Zhu G, Cheddadi R. 2015. Holocene vegetation, environment and anthropogenic influence in the Fuzhou Basin, southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 99: 85–94.
- Zeng Congsheng. 1997. Transgression and sea level changes along the northern coast of Fujian during the Late Quaternary[J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science)*, 13(4): 94–101 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lu, Qu Guosheng, Zhu Jinfang, Li Yigang, Huang Zonglin. 2007. Model of Quaternary tectonic movement and dynamic setting of basins along the coast of Fujian, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(3): 275–288 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Pu, Chen Jianqiang, Tian Mingzhong, Zhu Jinfang, Hang Zonglin, Jiang Chunliang. 2005. Application of sediments grain-size analysis in Quaternary environmental research and its stratum compartmentalization and contrast function in Xiamen Island, Fujian Province[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*,

- 27(1): 88–94 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X, Dalrymple R W, Yang S Y, Lin C M, Wang P. 2015. Provenance of Holocene sediments in the outer part of the Paleozoic Qiantang River Estuary, China[J]. *Marine Geology*, 366: 1–15.
- Zheng Rongzhang, Chen Guihua, Xu Xiwei, Zhu Jinfang, Huang Zonglin, Li Jianping. 2005. Strata division of buried Late Quaternary of Fuzhou Basin[J]. *Seismology and Geology*, 27(4): 556–565 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongzhang, Xu Xiwei, Zhu Jinfang, Ji Fengju, Hang Zonglin, Li Jianping. 2002. Division of Late Quaternary strata and analysis of palaeoenvironment in Fuzhou Basin[J]. *Seismology and Geology*, 24(4): 503–513 (in Chinese with English abstract).
- Zong Y. 2004. Mid–Holocene sea-level highstand along the southeast coast of China[J]. *Quaternary International*, 117(1): 55–67.
- ### 附中文参考文献
- 陈承惠, 蓝东兆, 于永芬, 张维林. 1990. 台湾海峡西部海域晚第四纪地层[J]. *第四纪研究*, 10(4): 301–307.
- 陈园田. 1991. 福建沿海晚第四纪海相地层的初步研究[J]. *地层学杂志*, (4): 285–290.
- 陈永胜, 李建芬, 杨朋, 王福, 田立柱. 2021. 渤海湾北岸海相贝壳 AMS ^{14}C 测年与“滞留时间”[J]. *地质调查与研究*, 44(4): 23–27.
- 程乾盛, 龚金美. 1986. 福建沿海晚全新世地层——江田组的建立与对比[J]. *福建地质*, 5(3): 18–25.
- 程乾盛, 许汉荣. 2000. 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*, 19(1): 24–33.
- 韩书华, 张静. 1992. 福州市马尾地区第四纪地层划分及海相层分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 12(1): 85–96.
- 郝秀东, 劳月英, 欧阳绪红, 姜兴钰, 王福, 田立柱, 施佩歆, 陈永胜, 王宏, 李建芬, 商志文. 2024. 山东莱州湾南岸晚全新世以来 (6.8~0.004 Ma) 古植被演替与海平面波动[J]. *中国地质*, 51(2): 689–700.
- 蓝东兆, 于永芬, 陈承惠, 谢在团. 1986. 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*, 6(3): 105–113.
- 李建芬, 商志文, 陈永胜, 田立柱, 姜兴钰, 王福, 胡云壮, 李勇, 杨朋, 文明征, 袁海帆, 施佩歆, 王宏. 2020. 渤海湾牡蛎礁的研究现状与保护建议[J]. *地质调查与研究*, 43(4): 317–333.
- 李映平. 2020. 福建宁德主城区水文地质特征与地下水应急水源优选[J]. *福建地质*, 39(1): 63–70.
- 林景星. 1979. 福建沿海全新世海进的初步认识[J]. *科学通报*, 24(11): 517–520.
- 马明明, 刘秀铭, 周国华, 刘庚余, 车柏林. 2016. 福建沿海地区晚第四纪海侵研究进展及存在的问题[J]. *亚热带资源与环境学报*, 11(3): 9–19.
- 童永福. 1985. 福建省第四系沉积概况[J]. *第四纪研究*, 6(1): 99–106.
- 童永福, 徐书勇. 1989. 福建省沿海第四系与活动构造[J]. *福建地质*, 8(2): 81–99.
- 汪翡翠, 施佩歆, 商志文, 肖国强, 王福. 2019. 天津市海岸线现状[J]. *地质调查与研究*, 42(4): 278–281.
- 王福, 商志文, 李建芬, 姜兴钰, 文明征, 施佩歆, 田立柱, 陈永胜, 杨朋, 胡云壮, 李勇, 袁海帆, 王宏. 2020. 渤海湾贝壳堤现状与保护建议[J]. *地质调查与研究*, 43(4): 293–316.
- 王海鹏, 张培辉, 陈峰, 叶燕胎, 郑志凤. 2000. 闽江口水下三角洲沉积特征及沉积环境 II. 晚更新世—全新世沉积特征和沉积环境[J]. *应用海洋学学报*, 19(2): 132–140.
- 王宏, 车继英, 宋美钰, 耿岩, 姜兴钰, 苏盛伟, 王海峰, 李建芬, 裴艳东, 王福. 2011. 渤海湾西岸海岸带第四纪地质研究成果概述[J]. *地质调查与研究*, 34(2): 81–97.
- 王绍鸿. 1984. 福州湾的演变与台湾海峡西岸的陆架海侵[J]. *海洋与湖沼*, 15(4): 380–387.
- 王绍鸿, 杨建明, 曾从盛, 吴学忠, 俞鸣同. 1994. 福建沿海晚更新世以来的海平面变化[J]. *应用海洋学学报*, 13(2): 166–175.
- 王雨灼. 1990. 福建省第四纪地层的划分[J]. *福建地质*, 9(4): 289–306.
- 杨建明, 郑晓云. 1990. 福建沿岸 6000 年来的海平面波动[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 10(4): 67–75.
- 姚庆元, 张虎男, 张景文, 赵希涛. 1985. 闽南沿海晚更新世地层的初步研究[J]. *地震地质*, 7(4): 32–40.
- 曾从盛. 1997. 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)*, 13(4): 94–101.
- 张路, 曲国胜, 朱金芳, 李亦纲, 黄宗林. 2007. 福建沿海盆地第四纪构造运动模式与动力学环境[J]. *地质通报*, 26(3): 275–288.
- 张璞, 陈建强, 田明中, 朱金芳, 黄宗林, 江春亮. 2005. 沉积物粒度分析在厦门市第四纪环境研究和地层划分对比中的应用[J]. *地球科学与环境学报*, 27(1): 88–94.
- 郑荣章, 陈桂华, 徐锡伟, 朱金芳, 黄宗林, 李建平. 2005. 福州盆地埋藏晚第四纪沉积地层划分[J]. *地震地质*, 27(4): 556–565.
- 郑荣章, 徐锡伟, 朱金芳, 计凤桔, 黄宗林, 李建平. 2002. 福州盆地晚第四纪地层划分及古环境分析[J]. *地震地质*, 24(4): 503–513.