JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY (Chinese Edition)

文章编号: 1671-1505(2022)01-0139-13 DOI: 10.7605/gdlxb.2022.01.011

## 基于沉积成因地化元素指标的闽北海湾晚更新世 海侵地层辨识及其意义<sup>\*</sup>

## $孙丹P^{1}$ 刘 $\Psi^{1}$ 张 杰<sup>1</sup> 于俊杰<sup>2</sup> 岳 伟<sup>3</sup> 王继 $\lambda^{2}$ 彭 博<sup>2</sup> 刘 演<sup>1</sup> 李 月<sup>1</sup> 陈 静<sup>1</sup>

1 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室,上海 200241
 2 中国地质调查局南京地质调查中心,江苏南京 210016
 3 江苏师范大学地理测绘与规划学院,江苏徐州 221116

摘要 福建沿岸晚更新世地层中微体古生物化石较为缺乏,极大限制了对该区晚第四纪海侵过程的深入研究。针对这一问题,本研究以闽北2个海湾内的第四纪钻孔为研究对象,通过有孔虫化石以及沉积成因的地球化学元素(Sr/Ba、Mn/Fe)分析,结合三沙湾表层沉积物相应指标,探讨沉积成因的地球化学元素指示海侵地层的可行性。结果显示,2个海湾钻孔的晚第四纪地层中均发育3套疑似海相深灰色黏土层,其中开放海湾霞浦湾钻孔底部黏土层中缺失有孔虫,半封闭海湾三沙湾钻孔中有孔虫仅出现于顶部黏土层中。这3层黏土层的Sr/Ba 值远大于1,和现代潮滩一河口湾体系相近,且出现的海相沟鞭藻和自生黄铁矿为典型的海相地层特征。基于已有的OSL和AMS<sup>14</sup>C年龄框架,这3层海侵层分别对应于MIS5、MIS3和MIS1期,Sr/Ba 和Mn/Fe 均值从MIS5 到 MIS1 期不断增大,结合现代潮滩-河口湾体系指标,表明从 MIS5 到 MIS1 期海侵强度的增加。由此可见,沉积成因地球化学元素指标可以有效辨识闽北海湾晚更新世海侵地层,这将有助于进一步了解该区晚第四纪海侵过程及其控制因素。

关键词 元素比值 有孔虫 海侵地层 福建沿岸 晚更新世

第一作者简介 孙丹丹,女,1996年生,华东师范大学河口海岸学国家重点实验室硕士研究生,自然地理 学专业。E-mail: 51193904002@stu.ecnu.edu.cn。

通讯作者简介 陈静,女,1977年生,华东师范大学河口海岸学国家重点实验室研究员,主要从事自然地 理学研究。E-mail: jchen@geo.ecnu.edu.cn。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)

## Identification and significance of the Late Pleistocene transgressive strata in the bays of northern Fujian Province based on geochemical element indicators of sedimentary origin

Sun Dan-Dan<sup>1</sup> Liu Ping<sup>1</sup> Zhang Jie<sup>1</sup> Yu Jun-Jie<sup>2</sup> Yue Wei<sup>3</sup> Wang Ji-Long<sup>2</sup> Peng Bo<sup>2</sup> Liu Yan<sup>1</sup> Li Yue<sup>1</sup> Chen Jing<sup>1</sup>

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(编号: 41771226, 41620104004) 与中国地质调查局宁德海岸陆海统筹项目(编号: DD20189505) 联合资 助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41771226, 41620104004) and the Integrated Geological Survey on Land and Sea of the Ningde Coast (No. DD20189505)]

收稿日期: 2021-07-16 改回日期: 2021-09-08

1 State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China 2 Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China

3 School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Jiangsu Xuzhou 221116, China

**Abstract** The lack of micropaleontological records in the Late Pleistocene strata along the Fujian coasts has greatly restricted the further understanding on the regional land-sea interaction. This study aims to identify the transgressive strata of the Late Pleistocene in the two bays of northern Fujian, by using geochemical elements of sedimentary origin. Based on the analysis of the foraminifera and surficial sediments of Sansha Bay, the Sr/Ba and Mn/Fe are used as proxies to identify the possibility of transgression in the study area. The results suggest that there are three sets of dark grey layers in the two late Quaternary cores might be formed in a marine environment. For aminifera are missed at the bottom of drilling cores in the open Xiapu Bay, while foraminifera are only observed in the upper drilling cores of semi-closed Sansha Bay. However, the sedimentary Sr/Ba ratios in the three clay layers are much higher than 1 and similar to the modern tidal flat and bay system, indicating typical marine origins. This is also supported by the occurrence of marine dinoflagellates and abundant authigenic pyrites in these layers. Based on the existing chronology of the core (NDGK2), the three transgressive layers are possibly corresponding to the highstands of the MIS5, MIS3 and MIS1, respectively. The mean ratios of Sr/Ba and Mn/Fe show an increase trend from MIS5 to MIS1, indicating marine influence is enhanced compared with the ratios of modern tidal flat-bay system. This study shows geochemical elements of sedimentary origin can be used as an effective proxy to identify the Late Pleistocene transgression strata along the Fujian coast, which will help to further understand the process and controlling factors of the late Quaternary transgression in this area.

Key words element ratios, foraminifera, transgression strata, Fujian coast, Late Pleistocene About the first author Sun Dan-Dan, born in 1996, is a master degree candidate majoring in physical geography at East China Normal University. E-mail: 51193904002@stu.ecnu.edu.cn.

**About the corresponding author** Chen Jing , born in 1977 , is a professor at State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research , East China Normal University. She is mainly engaged in research on physical geography. E-mail: jchen@geo.ecnu.edu.cn.

#### 1 概述

随着冰期—间冰期旋回,第四纪以来全球海平 面也发生周期性大幅升降波动(Linsley,1996; Chapman *et al.*,2000; Lambeck and Chappell, 2001)。海平面的波动势必引起沿海地区发生海侵 和海退。然而,沿岸地区的海侵地层并不仅仅是气 候一冰量—海面作用下的沉积产物,其和区域构造 活动、后期沉积物压实以及陆源河流泥沙充填等多 重海陆升降因素的改造密切相关,可以说是海动与 地动效应的共同产物(于革等,2016)。因此,通 过海侵地层的记录与全球海平面波动的对比,可揭 示区域地动因素的变化。可见,海侵地层的可靠辨 识是探讨区域海侵过程及其机制的关键基础。

20世纪70年代末开始,中国学者们针对东部

沿海一陆架地区的第四纪地层、环境以及海侵旋回 进行了大量的研究,普遍认为大规模海侵发生于晚 第四纪,尤其是晚更新世以来(汪品先等,1981; 秦蕴珊和赵松龄,1987; Lin et al.,1989; Liu et al., 2017)。晚更新世以来,全球存在2期相对高海平面 阶段(深海氧同位素 MIS5 期和 MIS3 期),其中 MIS5 期接近或高于现代海平面,远高于 MIS3 期海 平面(Shackleton,1987; Linsley,1996; Chapman et al.,2000; Lambeck and Chappell,2001; Siddall et al.,2003)。然而,中国东部沿岸晚更新世以来 MIS5 和 MIS3 期海侵地层记录有明显的区域差异。 这2期海侵地层在长江三角洲及其以北的沿岸区域 记录较为连续(汪品先等,1981; Lin et al.,1989; 王张华等,2004; Yi et al.,2012; Wang et al.,2013; Li et al.,2018; Gao et al.,2021),而在长江三角洲 以南的浙闽沿岸地区仅发现其中1期海侵地层,尽管其形成年代还具有一定争议(韩书华和张静, 1992;陈聪等,2016;Shang et al.,2018)。如果年代准确以及海侵地层可靠,那么这一差异很可能反映了区域构造升降过程。

海陆交互地区海侵地层的辨识通常采用对盐度 较为敏感的有孔虫化石指标,这也是长江三角洲及 其北部沿岸地区辨识第四纪海侵地层的主要依据 (汪品先等,1988; Liu *et al.*,2010,2018; Wang *et al.*,2013)。然而,并不是所有海岸环境都适合 有孔虫的生长,且其碳酸盐壳体埋藏后的保存率也 是个问题(汪品先,1992; 曾从盛,1997; Wang and Chappell,2001; Berkeley *et al.*,2009; 周洋 等,2015; Charrieau *et al.*,2018)。浙闽沿岸第四 纪地层中有孔虫化石并不丰富,尤其是晚更新世地 层。前人多采用岩性、粒度、硅藻等指标来推测海 侵地层(姚庆元等,1985; 陈园田,1991; 郑荣章 等,2005)。可见,急需寻找一套不受限于生物生 存及死亡后保存环境、简单可靠且有效的判别指 标,来辨识浙闽沿岸晚第四纪海侵地层。

本研究以闽北宁德地区 2 个海湾内的第四纪钻 孔为研究对象,拟对其沉积物中沉积成因的地球化 学元素进行分析,基于海湾表层沉积物中的相应指 标,辨识晚第四纪海侵地层;结合微体古生物、矿 物等指标来探讨该指标的可靠性;并结合年代框 架,初步探讨闽北沿岸晚更新世的海侵过程。

#### 2 研究区概况

福建沿海第四纪地层发育,主要以晚第四纪地 层为主(童永福,1985; 王雨灼,1990; 陈园田, 1991),其基底为燕山晚期花岗岩及侏罗纪火山 岩。福建沿海整体处于新构造运动的上升区,但是 内部分化显著,以闽江为界,南升北降(童永福, 1985; 童永福和徐书勇,1989),其中发育多个断 陷盆地。该区沉积了晚第四纪以来的海相、陆相及 海陆交互相地层(韩书华和张静,1992; 郑荣章 等,2005; Yue *et al.*,2015),为研究福建沿海晚 第四纪以来的海侵事件及海平面的升降提供了理想 的材料。

本研究选取位于福建省东北部宁德地区的2个 海湾为研究区域,一个是半封闭的三沙湾,一个是 相对开放的霞浦湾(图1)。三沙湾位于宁德市东南 部,地形口小腹大,出水口仅有一个东冲口,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。湾内主要有交溪和霍童溪两





大河流输入,年均输沙量为 57.6×10<sup>4</sup> t 和 29.2× 10<sup>4</sup> t (据当地水文站泥沙实测资料计算)。三沙湾 潮汐形态为非正规半日潮,平均潮差为 5.35 m, 港湾内的平均潮差由湾口向湾顶逐渐增大。霞浦湾 位于霞浦县东南部,面向东海,岸线曲折,岛屿众 多。霞浦湾内主要河流为杯溪和罗汉溪,受进入福 建东海潮波分支的影响,霞浦湾潮汐类型为规则半 日潮,平均潮差大于4 m。

### 3 样品和方法

#### 3.1 钻孔和表层样品采集

本研究于 2018 年在福建宁德市三沙湾和霞浦 湾区域获取第四纪钻孔 5 个,钻孔全部钻遇基岩, 取心率达 90%以上(图 1;表 1)。此外,2020 年 5 月采集了三沙湾表层沉积物样品 14 件,其中潮间 带和海湾表层沉积物各 7 件,海湾采样水深在 12.8~31.2 m 之间(图 1)。

表 1 闽北海湾钻孔信息和实验样品数统计

Table 1 Information of cores and experimental samples in the bays of northern Fujian

			•		0		
钻孔号	<b>经度</b> /°E	纬度 /°N	孔口 标高 /m	终孔 深度 /m	微体 古生物 /个	地球化 学元素 /个	自生 黄铁矿 /个
NDGKA	110 (4	26.61	1.0.1	05.00		26	10
NDGK2	119.64	26.61	4.94	95.90	$60 + 10^{*}$	36	19
NDQK2	119.55	26.64	3.30	63.00	$46^{*}$	—	—
NDQK6	119.64	26.73	3.46	55.70	$40^{*}$	—	—
NDQK8	119.56	26.73	3.30	20.50	35*	_	—
NDQK11	120.05	26.88	6.00	102.00	$40^{*}$	59	37

注: \* 南京地质调查中心, 2019<sup>①</sup>; #宽广粒级组分(>32µm) 的 有孔虫。

#### 3.2 实验与分析方法

5 个钻孔共计 326 个钻孔沉积物样品和 14 个 现代表层沉积物样品进行了有孔虫(部分含有介 形虫) 丰度和酸溶相地球化学元素分析,NDGK2 和 NDQK11 孔共计 56 个样品进行了自生黄铁矿的 统计,详细信息见表 1。

3.2.1 微体古生物

称取 50g 干样浸泡 2~3 天,充分分散后的样 品置于 100 目铜筛(孔径 0.154 mm) 过水筛,粗 组分烘干、称重。所有样品均在双目实体显微镜下 进行统计和鉴定。对于个别有孔虫数量较多的样 品,有孔虫和介形虫鉴定数目不少于 200 个;大部 分样品中有孔虫和介形虫数量较少,均挑尽全部砂 样进行统计。上述鉴定工作由中国科学院南海海洋 研究所实验室完成。此外,为了防止该区钻孔中有 孔虫丰度较低、个体较小的特点所导致的统计遗 漏,本研究对三沙湾表层样品(14 个)以及 NDGK2 钻孔样品(10 个)进行了宽广粒级组分 (>32 μm)的有孔虫丰度检核。

3.2.2 酸溶相 (沉积成因) 地球化学元素

该实验方法参照王爱华等(2019)进行。将 样品低温冻干后,称取1.5g左右样品,剔除贝壳 和有机碎屑后仔细研磨;然后置于离心管内加入 75 mL 50%醋酸溶液,超声震荡1h后于4000 r/min 离心机内离心5 min;吸取离心后的上清液于蒸发 皿中,在180℃加热板上加热3~4h直至蒸发皿中 仅剩橘红色固体;用5‰HNO₃溶液溶解蒸发皿中 固体,并转移到干净的离心管中定容至50 mL。经 过预处理的样品采用电感耦合等离子体发射光谱仪 ICAP7400进行元素含量测试,主要分析元素为Sr、 Ba、Mn和Fe。测试结果的相对标准偏差均在2% 以下。该实验在华东师范大学河口海岸学国家重点 实验室完成。

#### 3.2.3 自生黄铁矿

取 20 g 左右干样放入 100 mL 小烧杯中,加入适 量六偏磷酸钠充分浸泡 48 h,待碎屑矿物完全分散 以后,用孔径为 500 μm 和 32 μm 的套筛反复进行水 筛,直至粗粉砂和细砂粒级沉积物基本被收集。取 2.0 g 左右烘干后的宽广粒级(500~32 μm)碎屑物 置入装有重液聚钨酸钠(常温下密度为 2.88 g/cm<sup>3</sup>) 的离心管中充分浸湿 5 min,再利用离心法进行重液 分离,回收离心管底部的重矿物。在实体显微镜下, 随机挑选超过 300 颗矿物进行自生黄铁矿的鉴定与 统计,获得自生黄铁矿的相对含量。该实验在华东 师范大学河口海岸学国家重点实验室完成。

#### 4 结果

## 4.1 宁德地区第四纪地层特征

宁德地区第四纪地层普遍发育在新近纪古风化

① 南京地质调查中心. 2019. 宁德第四纪钻孔有孔虫、介形虫报告 (内部报告).

壳之上,古风化壳是由一套残积黏土和风化基岩地 层组成,其下基底为中生代基岩。第四纪地层底部 普遍发育一套陆相沉积地层:下部为砾石层,磨圆 度较好;上覆砂质和黏土层,推测为河床──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,普遍粒度较细,均质,且含有大量贝壳和植 物碎屑,尤其是顶层黏土层,具有海相层的沉积特 征。相邻的深灰色黏土层之间多为杂色黏土层,质 硬,含有钙质结核(图2)。

根据钻孔中深灰色黏土地层的分布特征,该区 域有以下3类沉积单元:  1) 单层深灰色黏土层。分布于山前。地层自 下而上分别是古风化壳、砾石层和深灰色黏土层。
 典型钻孔地层参见 NDQK2 和 NDQK8 孔(图 2)。

143

2 层深灰色黏土层。分布于自陆向海的中间部位。地层自下而上分别是古风化壳、砾石层、深灰色黏土层、杂色黏土层和深灰色黏土层。典型钻孔地层参见 NDQK6 孔(图 2)。

3) 3 层深灰色黏土层。分布于东南区域飞鸾 湾外部分地区以及霞浦利埕附近(图1),范围较 小。地层自下而上分别是古风化壳、砾石层、深灰 色黏土层、杂色黏土层(底部含有卵石,中部含)



图 2 福建宁德地区第四纪钻孔岩性及有孔虫、介形虫丰度(NDGK2 孔底栖有孔虫和介形虫数据见南京地质调查中心,2019<sup>①</sup>) Fig. 2 Lithology of Quaternary cores and abundance of foraminifera and ostracods in Ningde area, Fujian Province (Abundance of benthic foraminifera and ostracods in the core NDGK2 is cited from Nanjing Geological Survey Center, 2019<sup>①</sup>)

① 南京地质调查中心. 2019. 宁德第四纪钻孔有孔虫、 介形虫报告(内部报告).

有粗砂层)、深灰色黏土层、杂色黏土层和深灰色 黏土层。典型钻孔地层参见 NDGK2 和 NDQK11 孔 (图 2)。

## 4.2 宁德地区第四纪钻孔有孔虫、介形虫 特征

从宁德地区 5 个钻孔沉积物中的有孔虫和介形 虫分布来看,位于三沙湾区域内的 4 个钻孔 NDGK2、NDQK2、NDQK6 和 NDQK8 孔,其有孔 虫和介形虫仅出现在顶部深灰色淤泥质黏土层中 (图 2)。而位于霞浦湾区域的 NDQK11 孔,其有 孔虫出现在顶部和第 2 层深灰色黏土层中。5 个钻 孔沉积物中的有孔虫总丰度存在较大差异,其中 NDQK11 孔总体最大,可达 15000 枚/100g,其次 是 NDGK2 孔,达 3000 枚/100g,NDQK8 孔有孔虫 总丰度最小,仅为 68 枚/100g。这些钻孔的有孔 虫种属分布类似,以 NDQK6 孔为例,有孔虫以底 栖有孔虫为主,主要为玻璃质壳和瓷质壳,同现孔 轮虫、亚洲筛九字虫和希望虫属较多,介形虫以中 华美花介和美山双角花介为主(图 3)。

此外,NDGK2 钻孔深灰色黏土层宽广粒级组 分(>32 μm) 沉积物中的有孔虫丰度结果显示,有 孔虫仍仅出现在顶部深灰色黏土层中,第2 层和第 3 层深灰色黏土层中有孔虫存在缺失(图 2)。有孔 虫总丰度变化范围在 16~11931 枚/100 g 之间,明 显高于粗颗粒(>154 μm) 沉积物中的有孔虫丰度。

## 4.3 宁德地区第四纪钻孔沉积成因地球化 学元素及自生黄铁矿特征

总体来看,各项指标随深度变化明显,可将两 钻孔(NDGK2和NDQK11孔) 自下而上分为5段 (图 4)。

层 I: 两孔的 Sr/Ba 值均处于钻孔高值区,变 化范围分别为 4.76~9.04、7.74~49.52,远大于 1。两孔的 Mn/Fe 值平均值为钻孔最低,分别为 0.04 和 0.013。NDQK11 孔的自生黄铁矿平均含量 (<20%) 低于 NDGK2 孔(>75%)(图 4)。

层 II: 两孔的 Sr/Ba 值均值为钻孔最低,分别 为 0. 59 和 1. 26。Mn/Fe 值较层 I 有所增大,且存 在较大波动,均值为 0. 05 和 0. 62。两孔的自生黄 铁矿平均含量处于钻孔低值区,均小于 15%(图 4)。

层Ⅲ:两孔的 Sr/Ba 值较层Ⅱ显著升高,且自 下而上有增大的趋势,变化范围为 2.73~29.46、 4.70~24.88,远大于 1。Mn/Fe 值均值分别为 0.05 和 0.14,较层Ⅰ有所增加。两孔的自生黄铁 矿平均含量均在 50%左右(图 4)。

层Ⅳ:两孔的 Sr/Ba 值较层Ⅲ明显降低,变化



Fig. 3 Foraminiferal and ostracod assemblages in the core NDQK6 in the bays of northern Fujian Province

144





范围分别为 1.77~7.71、1.09~8.25,均大于 1。 Mn/Fe 值有所升高,属于钻孔高值区,均值分别 为 0.12 和 0.12。NDGK2 孔未出现自生黄铁矿, NDQK11 孔自生黄铁矿含量小于 15%(图 4)。

层V:两孔的 Sr/Ba 值较层IV 明显升高,处于 钻孔高值区,变化范围分别为 6.40~20.70、8.79 ~53.48,远大于 1。Mn/Fe 值自下而上有增大的趋势,均值分别为 0.12 和 0.16,为钻孔最高。 NDGK2 孔的自生黄铁矿平均含量(>80%)大于 NDQK11 孔(<40%)(图 4)。

## 4.4 宁德三沙湾表层沉积物有孔虫及沉积 成因地球化学元素特征

宁德三沙湾表层沉积物有孔虫及沉积成因地球 化学元素特征如表 2 所示。潮间带沉积物中的 Sr、 Ba 元素含量均值(17.12 μg/g、1.65 μg/g) 低于 海湾沉积物(41.78 μg/g、1.87 μg/g), Mn、Fe 元素含量均值(821.89 μg/g、5091.94 μg/g) 稍 高于海湾沉积物(801.35 μg/g、4575.44 μg/g), 但 Sr/Ba、Mn/Fe 值的均值(10.52、0.16)小于 海湾沉积物(22.90、0.18)。潮间带和海湾沉积 物的 Sr/Ba 值变化范围分别为 9.48~12.38、14.79 ~33.62,均远大于 1。海湾沉积物的 Sr/Ba、 Mn/Fe 值变异系数(0.34、0.46) 均要大于潮间 带沉积物(0.10、0.33)。潮间带沉积物中有孔虫 丰度均值为9048 枚/100g,要高于海湾沉积物中 有孔虫丰度的均值,但变异系数较大(表 2)。

表 2 宁德三沙湾表层沉积物有孔虫及沉积成因地化元素特征 Table 2 Characteristics of foraminifera and sedimentary geochemical elements in the surficial sediments of Sansha Bay, Ningde area

_								
样品 位置	统计 特征	有孔虫	Sr	Ba	S.,	Mn	Fe	Ma
		丰度/枚・	/μg•	/μg•	Sr /Ba	/μg •	/μg •	Mn /Fo
		( 100 g) $^{-1}$	$g^{-1}$	$g^{-1}$	/ Da	$g^{-1}$	$g^{-1}$	/16
潮 间 带	最小值	202	10.74	0.87	9.48	318.67	3587.54	0.07
	最大值	24 576	20.21	2.12	12.38	1161.14	6589.55	0.22
	平均值	9048	17.12	1.65	10.52	812.89	5091.94	0.16
	变异系数	0.94	0.21	0.25	0.10	0.42	0.21	0.33
海湾	最小值	1699	26.95	1.57	14.79	342.76	3192.76	0.08
	最大值	9374	57.82	2.56	33.62	1082.60	5748.38	0.33
	平均值	6137	41.78	1.87	22.90	801.35	4575.44	0.18
	变异系数	0.55	0.28	0.18	0.34	0.30	0.19	0.46

## 5 讨论

## 5.1 基于沉积成因地化元素的闽北海湾晚 第四纪沉积相辨识

由于 Sr 和 Ba 元素从河流入海后会发生沉积分

异, Ba 更易在河口处析出沉淀, Sr 则会在海水中 富集,使得海水中 Sr/Ba 值远大于淡水环境,因此 Sr/Ba 值经常被用来辨识海陆相沉积环境(蓝先洪 等, 1987; 王爱华, 1996; Chen et al., 1997; Chen et al., 2000)。值得注意的是,沉积物全岩组分中 硅酸盐矿物所含的 Ba 基本值过大,很容易掩盖 Sr/Ba 值的微小变化,因此全量 Sr/Ba 值在中国沿 海地区第四纪钻孔中沉积相识别的应用效果并不理 想(王建华等,2009;夏非等,2012;陈慧娴等, 2014)。王爱华等(2019,2020)对沉积物不同相 态中的 Sr/Ba 值进行了研究,发现利用稀醋酸提取 的酸溶相组分(沉积成因)中 Sr/Ba 值对沉积相 变化最为敏感,其由陆向海比值不断增大,可以有 效区分海陆相沉积环境。同样,对氧化还原环境敏 感的 Mn、Fe 元素,从陆向海沉积过程中 Fe 的沉 淀早于 Mn, 使得 Mn/Fe 值随着海水水深加深而逐 渐增大(熊小辉和肖加飞,2011;伏美燕等,

2017; Herndon *et al.*, 2018)。沉积成因的地球化学 元素指标相对其他指标来说操作简单,无生物生长 条件限制,受埋藏环境的影响小。

宁德三沙湾 NDGK2 孔和霞浦 NDQK11 孔的 3 层深灰色黏土层(图 5, I、Ⅲ 和 V 层) 均有明显 的"富 Sr 贫 Ba"特征, Sr/Ba 值远高于 1, 和三 沙湾现代表层沉积物接近,具有典型的海相特征; 两孔中 II 层的 Sr/Ba 值均小于 1,且和三沙湾现代 表层沉积物偏离,具有典型的陆相沉积特征(图 2, 图 5)。两孔中 IV 层的岩性为杂色硬黏土,为典型 的陆上氧化特征(图 2),但其 Sr/Ba 值却稍高于 1,呈现为海相沉积的特征(图 5),这一矛盾很可 能指示了该层来源于其前期海相沉积物,这和长江 三角洲末次冰盛期形成的硬黏土层及珠江三角洲的 花斑黏土非常相似(秦蕴珊和赵松龄,1987; 蓝 先洪,1996; 王张华等,2004; Liu *et al.*,2013)。 自生的黄铁矿高值以及海相沟鞭藻同样出现于 2 个







147

钻孔的 I、Ⅲ和 V 层中,指示当时该区受到海水 影响(图 6;刘喜停等,2020;于俊杰等,2021)。

总体上看, 霞浦 NDQK11 孔3 层海相沉积层的 Sr/Ba 和 Mn/Fe 值均高于三沙湾 NDGK2 孔同期层 位,可能是由于其所处海湾相对外海开放,更容易 受到海水影响(图1,图5)。两孔中V层的 Sr/Ba 和 Mn/Fe 值最高,接近于现代三沙湾海湾环境, I 层比值最低,基本低于现代三沙湾的潮滩环境, 说明V 层时期海侵最强,最大海侵时为海湾环境, I 层时期海侵较弱,基本处于潮上带环境,Ⅲ层海 侵强度总体上介于两者之间(图5,图6)。

综上,通过对2个钻孔沉积物和三沙湾表层 沉积物沉积成因地化元素指标的分析,结合海相 沟鞭藻和自生黄铁矿含量,可推断沉积成因的 Sr/Ba和 Mn/Fe 值可以有效地辨识该区海相地 层。

5.2 有孔虫等微体古生物化石在闽北海湾 晚更新世地层沉积相识别中应用的局 限性

在海陆相互作用地区的地层沉积相辨识中,有 孔虫化石经常被用来作为海相地层的标志。在中国 东部沿海第四纪海侵研究中,有孔虫化石也是最主 要且有效的海相沉积地层的判别依据,尤其是在细 颗粒沉积物中其保存较好(汪品先等,1988; 汪 品先,1992; Liu *et al.*,2010,2017; Wang *et al.*, 2013)。

宁德三沙湾和霞浦地区 5 个钻孔(NDGK2、 NDQK2、NDQK6、NDQK8 和 NDQK11) 中的有孔 虫和介形虫沉积记录显示,顶部黏土层(相当于 NDGK2 孔 V 层) 中普遍存在有孔虫和介形虫(图 2)。这些钻孔的有孔虫以底栖有孔虫为主,主要 为玻璃质壳和瓷质壳,同现孔轮虫、亚洲筛九字虫 和异地希望虫较多,介形虫以广盐性河口滨岸属种 中华美花介、美山双角花介和欢乐新单角介为主, 指示沉积环境为滨海—浅海(图 3; 汪品先等, 1988)。这和钻孔中沉积成因的 Sr/Ba 和 Mn/Fe 值 指示的结果较为一致(图 6)。结合年代地层框架, 可确定顶部黏土层基本为 8000 年以来形成的,属 于 MIS1 时期全新世海侵的沉积物(图 6; 于俊杰 等,2021)。而钻孔下部的晚更新世地层中,宁德 三沙湾 4 个钻孔的 2 期黏土层(相当于 NDGK2 孔 I 和Ⅲ层) 中均未发现有孔虫和介形虫, 霞浦钻 孔仅在第2层黏土层(Ⅲ层) 出现有孔虫化石(图 2)。沉积成因的 Sr/Ba 和 Mn/Fe 值显示这2 期地 层也均为海相地层(图5,图6)。可见,该区利用 有孔虫化石指示海侵地层有一定的难度。这种有孔 虫化石缺失现象在福建沿岸的晚更新世地层中普遍 存在,相对来说硅藻化石以及沟鞭藻却有出现 (韩书华和张静,1992; 曾从盛,1997; 张璞, 2005; 陈慧娴等,2014)。

究其原因,其一,可能是有孔虫生长环境受限。本研究发现宁德地区表层沉积物和钻孔沉积物中多数有孔虫壳体大小在 50~200 μm,相对于长 江三角洲等区域明显偏小。前人研究显示,与外海 连通性受到制约的海湾和无障壁海岸环境条件不同 会造成两地有孔虫群体存在差异(张良等, 2020)。本研究中宁德半封闭性三沙湾和开放性霞 浦海湾钻孔中第2层黏土层中的有孔虫化石记录也 不一致,很可能意味着半封闭性海湾的水体环境不 利于有孔虫生长(图2,图5)。其二,可能是受埋 藏条件影响,如有孔虫壳体埋藏后被溶蚀等。有孔 虫壳体的溶蚀作用主要在热带一亚热带湿热气候的 河口海岸区域较常见,尤其当沉积物粒度细,有机 质含量高,水体或沉积物多呈酸性还原状态时 (汪品先,1992; 朱晓东等,1996)。

综上,福建半封闭海湾晚更新世海侵地层中有 孔虫存在缺失,在判定该区域沉积环境时具有一定 的局限性,需结合其他指标综合判断。

# 5.3 闽北海湾 MIS5 期和 MIS3 期海侵地层 发现的意义

福建沿岸地区第四系沉积物基本以晚第四系沉 积物为主,直接覆盖于基岩之上。除了顶部全新世 (MIS1期) 海侵层外,晚更新世普遍存在1期海 侵,尽管形成年代还具有一定的争议性。有人认为 其发生于 MIS3 期,也有研究认为是 MIS5 期(童 永福和徐书勇,1989;韩书华和张静,1992;曾从 盛,1997;郑荣章等,2005;陈聪等,2016; Shang *et al.*,2018)。本研究中 NDGK2 孔的光释光 和 AMS <sup>14</sup>C 年代数据显示,底部海相沉积物(I 层)年龄约90000 cal.a BP,Ⅲ层海相沉积物的年 龄基本晚于 60 000 cal.a BP。顶部海相沉积物(V 层)年龄均未超过 10 000 cal.a BP,属于全新世沉 积物(图 6; 于俊杰等,2021)。因此,宁德海湾晚 第四纪钻孔地层中记录的3层海相沉积物可能自下 而上对应于晚更新世 MIS5、MIS3 和全新世 MIS1 期。这说明晚第四纪以来,该区至少经历了晚更新 世的2期和全新世的1期海侵过程,和全球海平面 的高海平面时期较为一致(Shackleton,1987; Linsley,1996; Chapman *et al.*,2000; Lambeck and Chappell,2001; Siddall *et al.*,2003)。

本研究中 NDGK2 和 NDQK11 孔记录的全新世 和晚更新世晚期的 2 次海侵地层和前期研究较为一 致,但底部记录的海侵层(图 6; MIS5 期, I 层) 在福建沿海地层记录中较少出现。早期文献中曾提 及在霞浦地区(和 NDGK11 孔位置接近)可能存 在这期海侵层,但是限于年代技术以及缺少沉积环 境代用指标并未深入研究(王雨灼,1990)。同 时,这期海侵记录显示其海侵强度明显较弱,很可 能和当时该地的古地势较高有关。因此,本研究所 辨识的晚更新世 2 期海侵地层对今后深入研究该区 构造沉降历史提供了可能。

#### 6 结论

闽北海湾晚第四纪地层中发育的3套深灰色黏 土层具有海相特征,但有孔虫和介形虫在晚更新世 地层中存在缺失,有孔虫在判定闽北海湾晚更新世 海侵地层上存在局限性。结合三沙湾现代表层沉积 物的相关特征,沉积成因的地球化学元素 Sr/Ba 和 Mn/Fe 值可以有效指示3层海侵地层。结合年代框 架,3层海侵层自钻孔从下而上分别对应于 MIS5、 MIS3 和 MIS1 期,受控于全球海平面变化和区域构 造沉降的共同影响。可见,沉积成因地球化学元素 指标可以有效辨识闽北海湾晚更新世海侵地层,这 将有助于进一步了解该区晚第四纪海侵过程及其控 制因素。

#### 参考文献(References)

- 陈聪,万秋池,郑卓,余风玲,A Switzer,万一兴. 2016. 福建平潭岛晚 第四纪沉积序列及 MIS5 海侵旋回特征. 热带地理,36(3): 406 -416. [Chen C, Wan Q C Zheng Z, Yu F L, A Switzer, Wan Y X. 2016. Late Quaternary sediment stratigraphy and marine cycles in the Pingtan Island, Fujian Province. Tropical Geography, 36(3): 406-416]
- 陈慧娴 骆美美,王建华,苏志华,金刚雄,瓦西拉里,杨小强,曹玲珑. 2014. 福建九龙江河口第四纪沉积物特征及沉积环境演变. 古

地理学报,16(2): 263-273. [Chen H X, Luo M M, Wang J H, Su Z H, Jin G X, Wa X L L, Yang X Q, Cao L L. 2014. Sedimentary characteristics and depositional environmental evolution of the Quaternary in Jiulongjiang estuary, Fujian Province. Journal of Paleogeoraphy(Chinese Edition), 16(2): 263-273]

- 陈园田. 1991. 福建沿海晚第四纪海相地层的初步研究. 地层学杂志, 15(4): 285-290. [Chen Y T. 1991. A preliminary study of the Late Quaternary marine strata along the coast of Fujian. Journal of Stratigraphy, 15(4): 285-290]
- 伏美燕,李娜,黄茜,刘磊. 2017. 滨岸—浅海混合沉积对海平面与气候变化的响应:以塔里木盆地巴麦地区石炭系为例. 沉积学报, 35(6): 1110-1120. [Fu M Y Li N Huang Q Liu L. 2017. Shoreline-neritic mixed sedimentation response to sea level change and paleoclimate: a case study from carboniferous in Tarim Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 35(6): 1110-1120]
- 韩书华 涨静. 1992. 福州市马尾地区第四纪地层划分及海相层分析. 海洋地质与第四纪地质, 12(1): 85-95. [Han S H, Zhang J. 1992. Quaternary stratigraphic division and marine bed analysis of Mawei area, Fuzhou. Marine Geology & Quaternary Geology, 12(1): 85-95]
- 蓝先洪. 1996. 珠江三角洲晚第四纪沉积特征. 沉积学报,14(2): 157-164. [Lan X H. 1996. Sedimentary characteristics of Late Quaternary in the Zhujiang river delta. Acta Sedimentologica Sinica, 14(2): 157-164]
- 蓝先洪,马道修 徐明广,周清伟,张光威. 1987. 珠江三角洲若干地 球化学标志及指相意义. 海洋地质与第四纪地质,7(1):39-49. [Lan X H, Ma X D, Xu M G, Zhou Q W, Zhang G W. 1987. Some geochemical indicators of the pearl river delta and their facies significance. Marine Geology & Quaternary Geology,7(1):39-49]
- 刘喜停,李安春,马志鑫,董江,张凯棣,徐方建,王厚杰. 2020. 沉积 过程对自生黄铁矿硫同位素的约束. 沉积学报,38(1): 124-137. [Liu X T Li A C Ma Z X Dong J Zhang K L Xu F J Wang H J. 2020. Constraint of sedimentary processes on the sulfur isotope of authigenic pyrite. Acta Sedimentologica Sinica, 38(1): 124-137]
- 秦蕴珊 赵松龄. 1987. 晚更新世以来长江水下三角洲的沉积结构与 环境变迁. 沉积学报, 5(3): 105-112. [Qin Y S,Zhao S L. 1987. Sedimentary structure and environmental evolution of submerged delta of Changjiang River since Late Pleistocene. Acta Sedimentologica Sinica, 5(3): 105-112]
- 童永福. 1985. 福建省第四系沉积概况. 第四纪研究, 6(1): 99-106. [Tong Y F. 1985. A outline of the Quaternary deposits of Fujian Province. Quaternary Research, 6(1): 99-106]
- 童永福 徐书勇. 1989. 福建省沿海第四系与活动构造. 福建地质, 8(2): 81-99. [Tong Y F, Xu S Y.1989. The Quaternary and active fault in coastal area of Fujian. Geology of Fujian, 8(2): 81-99]
- 王爱华. 1996. 不同形态锶钡比的沉积环境判别效果比较. 沉积学报, 14(4): 169-174. [Wang A H. 1996. Discriminant effect of sedimentary environment by the Sr/Ba ratio of different exising

forms. Acta Sedimentologica Sinica , 14(4): 169-174]

- 王爰华,刘建坤,许乃岑,张飞,李华玲. 2019. 陆源碎屑沉积物中沉 积成因锶钡的选择性提取新技术. 中国地质,46(3):670-671. [Wang A H, Liu J K, Xu N C Zhang F, Li H L. 2019. A new technology for selective extraction of sedimentogenic Strontium and Barium from terrigenous clastic sediments. Geology in China,46(3): 670-671]
- 王爱华,叶思源,刘建坤,丁喜桂,李华玲,许乃岑. 2020. 不同选择性 提取方法锶钡比的海陆相沉积环境判别探讨:以现代黄河三角 洲为例. 沉积学报,38(6): 1226-1238. [Wang A H,Ye S Y, Liu J K, Ding X G, Li H L, Xu N C. 2020. Discrimination between marine and terrestrial sedimentary environments by the selectively extracted Sr/Ba ratio: a case of sediments in the Yellow River delta. Acta Sedimentologica Sinica, 38(6): 1226-1238]
- 王建华,曹玲珑,王晓静 杨小强 阳杰 苏志华. 2009. 珠江三角洲万 顷沙地区晚第四纪沉积相与古环境演变. 海洋地质与第四纪地 质,29(6): 35-41. [Wang J H,Cao L L,Wang X J,Yang X Q, Yang J Su Z H. 2009. Evolution of sedimentary facies and paleoenvironment during the Late Quaternary in Wanqingsha area of the Pearl River delta. Marine Geology & Quaternary Geology, 29(6): 35-41]
- 汪品先. 1992. 微体化石在海侵研究中的应用与错用. 第四纪研究, 12(4): 321-331. [Wang P X. 1992. The use and misuse of microfossils in marine transgression studies. Quaternary Sciences, 12(4): 321-331]
- 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 成鑫荣. 1981. 中国东部第四纪海侵地层的 初步研究. 地质学报 (1): 1-13. [Wang P X ,Min Q B ,Bian Y H ,Cheng X R. 1981. Strata of Quaternary transgressions in east China: a preliminary study. Acta Geologica Sinica (1): 1-13]
- 汪品先,章纪军,赵泉鸿,闵秋宝,卞云华,郑连福,成鑫荣,陈荣华.
  1988. 东海底质中的有孔虫和介形虫.北京:海洋出版社,1-438. [Wang P X Zhang J J Zhao Q H ,Min Q B ,Bian Y H Zhen L F ,Cheng X R ,Chen R H. 1988. Foraminifera and ostracods in the East China Sea. Beijing: Ocean Press,1-438]
- 王雨灼. 1990. 福建省第四纪地层的划分. 福建地质, 9(4): 289-306. [Wang Y Z. 1990. The classification of Quaternary strata in Fujian Province. Geology of Fujian, 9(4): 289-306]
- 王张华,丘金波,冉莉华,严学新,李晓. 2004. 长江三角洲南部地区 晚更新世年代地层和海水进退. 海洋地质与第四纪地质, 24(4):1-8. [Wang Z H,Qiu J B,Rang L H,Yan X X,Li X. 2004. Chronosratigraphy and transgression/regression during Late Pleistocene in the southern Changjiang(Yangtze) River delta plain. Marine Geology & Quaternary Geology 24(4): 1-8]
- 夏非 殷勇,王强 涨永战 刘敬圃. 2012. MIS3 晚期以来江苏中部海 岸的层序地层. 地质学报,86(10): 1696-1712. [Xia F, Yin Y, Wang Q, Zhang Y Z, Liu J P. 2012. Sequence stratigraphy of the central part North Jiangsu coasts since Late MIS3, Eastern Chian. Acta Geologica Sinica, 86(10): 1696-1712]
- 熊小辉,肖加飞. 2011. 沉积环境的地球化学示踪. 地球与环境, 39(3): 405-414. [Xiong X H Xiao J F. 2011. Geochemical indi-

cators of sedimentary environments: a summary. Earth And Enviroment, 39(3): 405-414]

- 姚庆元 涨虎男 涨景文 赵希涛. 1985. 闽南沿海晚更新世地层的初 步研究. 地震地质,7(4): 32-40. [Yao Q Y Zhang H N Zhang J W Zhao X T. 1985. A preliminary study on the Late Pleistocene stratigraphy along the coastal areas of southern Fujian. Seismology and Geology,7(4): 32-40]
- 于革,叶良涛,廖梦娜,王龙升,李永飞. 2016. 中国沿海平原晚更新 世海侵的定量重建、模拟与机制研究. 第四纪研究, 36(3): 711 -721. [Yu G, Ye L T, Liao M N, Wang L S, Li Y F. 2016. Quantitative reconstruction, simulation and mechanism study on the Late Pleistocene marine transgressions in the coastal plains of China. Quaternary Sciences, 36(3): 711-721]
- 于俊杰,彭博,兰佑,武彬,王继龙,丁大林,劳金秀,李帅丽,戴璐. 2021. 孢粉证据揭示 MIS5a 以来福建东北沿海地区人类活动、 海平面及气候变化. 地球科学,46(1): 281-292. [Yu J J ,Peng B ,Lan Y ,Wu B ,Wang J L ,Ding D L ,Lao J X ,Li S L ,Dai L. 2021. Palynological records revealed anthropogenic deforestation ,sea level and climate changes since marine isotope stage 5a in the northeastern coast of Fujian Province. Earth Science, 46(1): 281-292]
- 曾从盛. 1997. 闽东北沿海晚第四纪海侵与海面变动. 福建师范大学 学报(自然科学版),13(4):96-103. [Zeng C S. 1997. Transgressions and sea level changes along the northeast coast of Fujian during the Late Quaternary. Journal of Fujian Teachers University (Natural Science),13(4):96-103]
- 张良 陆诗阔,刘佳,闫徐坤,黄丽娟,张树海. 2020. 唐岛湾、金沙滩 潮间带沉积底质中的有孔虫.见:中国古生物学会化石藻类专 业委员会第十九次学术年会、中国古生物学会微体学分会第十 一届会员代表大会暨第十八次学术年会、江苏省古生物学会 2020 年学术年会论文摘要集.中国云南玉溪: 1. [Zhang L Lu S K ,Liu J, Yan X K, Huang L J Zhang S H. 2020. Foraminifera in the intertidal sediments of Tangdao Bay and Jinshatan Beach. In: 19th Annual Meeting of Fossil Algae Committee of Chinese Palaeontological Society, 11th Annual Meeting of Microbiology Branch of Chinese Palaeontological Society, 18th Annual Meeting of Microbiology Branch of Chinese Palaeontological Society ,and 2020 Annual Meeting of Jiangsu Palaeontological Society. Yuxi, Yunnan ,China: 1]
- 张璞. 2005. 福建漳州晚第四纪以来的环境演变. 中国地质大学(北京)博士论文: 76-98. [Zhang P. 2005. Environment evolution since Late Quaternary in Zhangzhou of Fujian. Doctoral Dissertation of China University of Geosciences(Beijing): 76-98]
- 郑荣章 陈桂华 徐锡伟 朱金芳 黃宗林 ,李建平. 2005. 福州盆地埋藏晚第四纪沉积地层划分. 地震地质, 27(4): 556-565.
  [Zheng R Z, Chen G H, Xu X W, Zhu J F, Huang Z L, Li J P. 2005.
  Strata division of buried Late Quaternary of Fuzhou basin. Seismology and Geology, 27(4): 556-565]
- 周洋,谢叶彩 陈芳,龙桂,陈炽新,吴聪,郑志敏,黄雪飞. 2015. 珠江
   三角洲 ZK201-2 孔晚更新世以来微体生物群与古环境. 海洋地
   质与第四纪地质, 35(4): 113-123. [Zhou Y Xie Y C ,Chen F ,
   Long G ,Chen C X ,Wu C Zheng Z M ,Huang X F. 2015. Microfau-

nas in hole ZK201-2 Late Pleistocene and their implications for paleoenvironments. Marine Geology & Quaternary Geology , 35(4): 113-123]

- 朱晓东 施晓冬 潘少明. 1996. 影响沉积物中有孔虫丰度的死态因 素探讨. 南京大学学报(自然科学版), 32(4): 118-127. [Zhu X D Shi X D Pan S M. 1996. Postmortemological factors responsible for foraminiferal abundance in sediment. Journal of Nanjing University(Natural Science), 32(4): 118-127]
- Berkeley A Perry C T Smithers S G Horton B P Lundy A B. 2009. Foraminiferal biofacies across mangrove-mudflat environments at Cocoa Creek North Queensland Australia. Marine Geology , 263(1): 64– 86.
- Chapman M R Shackleton N J ,Duplessy J C. 2000. Sea surface temperature variability during the last glacial-interglacial cycle: assessing the magnitude and pattern of climate change in the North Atlantic. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 157(1-2): 1 -25.
- Charrieau L M , Filipsson H L , Ljung K , Chierici M , Knudsen K L , Kritzberg E. 2018. The Effects of multiple stressors on the distribution of coastal benthic foraminifera: a case study from the Skagerrak-Baltic Sea region. Marine Micropaleontology , 139: 42–56.
- Chen Z Y ,Chen Z L ,Zhang W G. 1997. Quaternary stratigraphy and trace-element indices of the Yangtze delta ,eastern China ,with special reference to marine transgressions. Quaternary Research , 47(2): 181–191.
- Chen Z Y Song B P ,Wang Z H ,Cai Y L. 2000. Late Quaternary evolution of the sub-aqueous Yangtze Delta ,China: sedimentation stratigraphy ,palynology ,and deformation. Marine Geology , 162(2-4): 423-441.
- Gao L ,Long H ,Tamura T ,Hou Y D ,Shen J. 2021. A similar to 130 ka terrestrial-marine interaction sedimentary history of the northern Jiangsu coastal plain in China. Marine Geology 435.
- Herndon E M ,Havig J R ,Singer D M ,Mccormick M L ,Kump L R. 2018. Manganese and iron geochemistry in sediments underlying the redoxstratified Fayetteville Green Lake. Geochimica Et Cosmochimica Acta , 231: 50–63.
- Lambeck K ,Chappell J. 2001. Sea level change through the last glacial cycle. Science , 292: 679–686.
- Li Y Shang Z W ,Tsukamoto S ,Tamura T ,Yi L ,Wang H ,Frechen M ,Li J F ,Jiang X Y. 2018. Quartz and K-feldspar luminescence dating of sedimentation in the North Bohai coastal area( NE China) since the late pleistocene. Journal of Asian Earth Sciences , 152: 103–115.
- Lin J X Zhang S L Qiu J B , Wu B Y , Huang H Z , Huang H Z , Xi J G , Tang B G , Cai Z R , He Y B. 1989. Quaternary marine transgressions and paleoclimate in the Yangtze River delta region. Quaternary Research , 32(3): 296–306.

- Linsley B K. 1996. Oxygen-isotope record of sea level and climate variations in the Sulu Sea over the past 150000 years. Nature, 380(6571): 234-237.
- Liu C L ,Franz T F ,Wu J ,Dong Y X ,Yang T T ,Yin J ,Wang Y ,Liu M. 2013. Late Quaternary palaeoenvironmental changes documented by microfaunas and shell stable isotopes in the southern Pearl River delta plain South China. Journal of Palaeogeography ,2(4): 344–361.
- Liu J ,Saito Y ,Kong X H ,Wang H ,Wen C ,Yang Z G ,Nakashima R. 2010. Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea. Marine Geology , 278(1-4): 54-76.
- Liu J ,Ye S Y ,Allen Laws E ,Xue C T ,Yuan H M ,Ding X G Zhao G M , Yang S X ,He L ,Wang J ,Pei S F ,Wang Y B ,Lu Q Y. 2017. Sedimentary environment evolution and biogenic silica records over 33000 years in the Liaohe delta ,China. Limnology and Oceanography , 62(2): 474-489.
- Liu J Zhang X H Mei X Zhao Q H Guo X W Zhao W N Liu J X Saito Y Wu Z Q Li J Zhu X Q Chu H X. 2018. The sedimentary succession of the last similar to 3. 50 Myr in the western South Yellow Sea: paleoenvironmental and tectonic implications. Marine Geology , 399: 47–65.
- Shackleton N J. 1987. Oxygen isotopes ice volume and sea level. Quaternary Science Reviews , 6(3-4): 183-190.
- Shang S ,Fan D D ,Yin P ,Burr G Zhang M Y ,Wang Q. 2018. Late Quaternary environmental change in Oujiang delta along the northeastern Zhe-Min Uplift zone( Southeast China) . Palaeogeography , Palaeoclimatology , Palaeoecology , 492: 64–80.
- Siddall M , Rohling E J , Almogi-Labin A , Hemleben C , Meischner D , Schmelzer I Smeed D A. 2003. Sea-level fluctuations during the last glacial cycle. Nature , 423(6942): 853-858.
- Wang P X Chappell J. 2001. Foraminifera as Holocene environmental indicators in the south Alligator River ,Northern Australia. Quaternary International , 83–85: 47–62.
- Wang Z H Jones B G , Chen T Zhao B C Zhan Q. 2013. A raised OIS 3 sea level recorded in coastal sediments , southern Changjiang delta plain , China. Quaternary Research , 79(3): 424–438.
- Yi L ,Yu H J ,Ortiz J D ,Xu X Y ,Chen S L ,Ge J Y ,Hao Q Z ,Yao J ,Shi X F ,Peng S Z. 2012. Late Quaternary linkage of sedimentary records to three astronomical rhythms and the Asian monsoon ,inferred from a coastal borehole in the south Bohai Sea ,China. Palaeogeography , Palaeocclimatology , Palaeoecology , 329: 101–117.
- Yue Y F Zheng Z ,Rolett B V ,Ma T ,Chen C ,Huang K Y ,Lin G W Zhu G Q ,Cheddadi R. 2015. Holocene vegetation ,environment and anthropogenic influence in the Fuzhou Basin ,southeast China. Journal of Asian Earth Sciences , 99: 85–94.

(责任编辑 李新坡;英文审校 徐 杰)