

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019010703

温州沿海平原晚更新世以来的海相地层特征及沉积环境

吴同^{1,2}, 杨振京², 王一鸣³, 王攀², 彭培好¹, 张培新^{1,2}, 仓飞³

1. 成都理工大学, 成都 610059

2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061

3. 浙江省第十一地质大队, 温州 325000

摘要:沿海地区的海相地层记录了极其丰富的环境信息, 研究海相层的地层特征和沉积环境, 对理解古环境演变的过程、探讨沉积记录对海陆变迁的响应机制具有重要意义。QTZ1 孔位于温州瓯江口北侧平原, 根据岩石地层和磁性地层资料, 钻孔 34 m 处为 Q_h/Q_p^3 界线, 91.5 m 处为 Q_p^3/Q_p^2 界线。综合考虑刺甲藻、环纹藻的环境意义, 钻孔沉积物粒度及微体化石组合的分析结果表明, 温州沿海平原晚更新世以来共识别出 3 套海相地层单元, 第二海相层和第三海相层之间发育有完整的陆相沉积层。沉积动力条件经历了低能(Q_p^3)→中低能(Q_p^2)→中高能(Q_p^3)→低能(Q_p^3)→高能(Q_p^3)→中低能(Q_p^3)→中低能(Q_p^3)→低能(Q_p^3)→低能(Q_h)的演化过程。受海平面变化影响, 研究区晚更新世沉积相变化频繁, 以海陆过渡相、陆相和局部的浅海相为主, 全新世沉积相以浅海相为主, 全新世末期逐渐转为滨海相。

关键词: 粒度分析; 微体化石组合; 海相地层; 沉积环境; 温州

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

Marine stratigraphy since Late Pleistocene on Wenzhou coastal plain and its depositional environment

WU Tong^{1,2}, YANG Zhenjing², WANG Yiming³, WANG Pan², PENG Peihao¹, ZHANG Peixin^{1,2}, CANG Fei³

1. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. Institute of Hydrogeology and Environment Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China

3. 11th Geological Brigade in Zhejiang Province, Wenzhou 325000, China

Abstract: Coastal deposits are critical important for revealing sedimentary environmental changes and their mechanisms. The Hole QTZ1 is a borehole located in the coastal plain of the northern Oujiang estuary of the Wenzhou city. Lithostratigraphy and paleomagnetic stratigraphy of the cores suggest that the boundary of Q_h/Q_p^3 is located at 34 m in depth, while the boundary of Q_p^3/Q_p^2 at 91.5 m. The microfossil assemblages of dinoflagellates and cyclostriatum, and the grain size data of the sediments suggest that there are three marine stratigraphic units since late Pleistocene in the coastal plain of Wenzhou, with a continental deposit between the 2nd and 3rd marine layers, which recorded an evolutionary process from low energy(Q_p^3) to medium low energy (Q_p^2), medium high energy(Q_p^3), low energy (Q_p^3), high energy(Q_p^3), high energy (Q_p^3), medium low energy(Q_p^3) and low energy (Q_h). With sea level changes, the Late Pleistocene deposits vary frequently by alternation of marine and continental transitional facies, continental facies and local neritic facies. The Holocene sediments are dominated by neritic facies, which gradually turn to coastal facies at the end of Holocene.

Key words: particle size analysis; microfossil assemblage; marine strata; sedimentary environment; Wenzhou

在全球变暖的气候背景下, 海平面变化作为全球变化研究的重要课题之一, 受到国内外学者的广泛关注^[1,2]。基于全球变化研究, 地球系统科学已

成为新的研究热点^[3]。沿海平原地区作为地球陆地系统和海洋系统的重要界面, 其沉积环境研究具有举足轻重的学术地位^[4]。在强烈的海陆相互作用的

资助项目:浙江省地质矿产专项资金项目“浙江省温州市城市群环境地质调查”([省资]2016008);中国地质科学院基本科研业务费项目(YY-WF201627)

作者简介:吴同(1993—),男,硕士研究生,研究方向为第四纪地质学, E-mail: wtsycamore@163.com

通讯作者:杨振京(1966—),男,博士,研究员,研究方向为第四纪地质学, E-mail: yangzhenjing1966@163.com

收稿日期:2019-01-07; **改回日期:**2019-04-21. 文凤英编辑

影响下,沿海地区的古环境变迁对海平面变化的反应极其敏感^[5-8]。晚第四纪以来,受气候及海平面变化影响,浙江东南沿海平原地区存在交替性的海进-海退^[9,10],导致区域内产生了多个海相层,其复杂的沉积地层中包含了很多沉积环境和沉积演化过程信息。此前对浙江沿海全新世海滩岩的研究,进一步反映出海平面变化对沉积相的影响^[11,12]。因此了解该地区的沉积地层研究,可以对研究全球变化及地球系统科学的研究提供重要信息。

20 世纪 80 年代,对温州沿海地区海相沉积地层有较多的研究。汪品先等对浙江东部沿海地区的海侵地层进行过集中研究^[13-15],并对海相地层的判别依据进行过详细的论述^[16-18]。然而当时的研究主要依据微体化石组合和岩相特征,缺乏孢粉资料、粒度数据、古地磁数据,因而未曾进行多指标对比分析^[14]。近年来温州地区的研究重点大多是针对全新世气候变化和古环境演变等问题进行的讨论^[19-21]。基于此背景,对温州沿海平原的海相地层研究,在多指标对比的基础上,进行综合分析将会取得更可靠的成果。

沉积物粒度特征是判别沉积环境的良好标志,粒度分析方法在研究沉积环境演变、沉积水动力条件等方面有着广泛的应用^[22,23]。沉积物中不同颗粒粒径的百分含量及其粒度分布特征,不仅具有地层学意义,而且可以为探讨沉积环境的成因及演变提供依据^[24,25]。研究沉积物的粒径分布对探索天然水生态系统环境下沉积物产生、运输和沉积过程具有重要意义^[26]。近几年来,Weltje 等提出对沉积物粒度数据进行分解的端元分析模型,在反演沉积动力环境方面效果显著^[27],由 Efron 等运用统计方法提出的 Bootstrap 分析方法也得到了认可^[28]。然而这些方法的研究样本尚缺乏沿海地区的研究成果,对于沿海平原地区,特别是有河流作用介入的复杂滨海沉积环境,是否具有可靠的参考价值尚不明确,因此本文采用图解参数法进行沉积物粒度分析。20 世纪 50 年代以来,Folk-Ward 图解参数法成为了粒度分析的经典方法,CM 图、粒度参数离散图以及因子分析方法得到了广泛应用,经过数十年研究,对该方法的研究已相当成熟并沿用至今^[29],众多研究者运用频率分布曲线、概率累积曲线等图式的变化规律分析探讨了各地区滨海、河流、湖沼相沉积环境^[30-32],具有充分的参考依据。同时,张璞等通过在福建省的厦门、漳州、泉州三地的研究,分别对当地的沉积环境作出了解释^[33-35],表明图解参数法在沿海地区的普适性。

粒度特征对水动力细微变化的反应虽然灵敏,但难以用于单独解释沉积环境。部分研究人员为了尽可能获取古地理的全貌,在粒度分析的同时,加入了其他环境指标进行综合分析^[10,36]。由于海洋微体古生物对环境依赖性较强,其生态特征具有典型的海洋环境指示意义^[37]。分析化石分布特征可作为海岸线变迁、相对海深等指示标志^[38],对温州地区海相地层的研究具有重要意义。因此,作者基于浙江省温州市瓯江入海口北侧海岸 QTZ1 孔的沉积物粒度分析,结合微体化石垂向上的分布特征,研究温州沿海平原晚第四纪以来的海相地层,并综合考虑岩石地层资料,运用磁性地层学方法确定海相层地质年代,重建该地区沉积环境演变过程,探讨河口湾附近的海相地层与其他海岸的沉积地层有何异同。

1 区域地质概况

温州地区地势自西南向东北倾斜,平原海拔约 5~30m,以冲洪积地层为主,滨海地区低洼地带则广泛发育河流相、海相、滨海湖沼相沉积^[39]。沿海平原地貌发育深受构造运动、岩性、气候、河水、海流、潮汐等诸多因素影响,第四纪以来在东南部沉积了广袤海积平原,沉积物由长江入海泥沙经沿岸流搬运至河口落淤^[40]。

瓯江为浙江省第二大河流,发源于龙泉县,止于东海。河道全长 388km,流域面积可达 $1.79 \times 10^4 \text{ km}^2$,河口属于强潮环境,具有广阔的潮间带^[41]。表层沉积物以淤泥质为主。根据前人研究成果,温州地区第四系疏松沉积层厚度可达 150m 左右^[14],其中下更新统普遍缺失^[42],中更新统存在部分缺失,而上更新统厚度较大,通常缺失较少。全新统发育最为完整,厚度也最为稳定,海相标志沉积层发育较为良好,可为海相地层识别与划分以及研究区微沉积环境的划分提供有利条件^[43,44]。沿海平原第四系发育主要受地貌、新构造运动和海平面变化控制。全新世以来,原湾内平原渐次淤积,由陆向海逐渐增厚,前缘地带持续淤涨,海相地层发育,形成广阔的滨海平原^[40]。根据前人研究成果。全新统厚度为 30~60m^[40,45],其岩性、组成结构体态、后生变化等方面均具有明显的分段特征。

2 样品采集与方法

本次研究样品来源于浙江省温州市第四纪地质钻孔 QTZ1(图 1)。钻孔坐标位置为 $28^{\circ}00'11.2''\text{N}$ 、

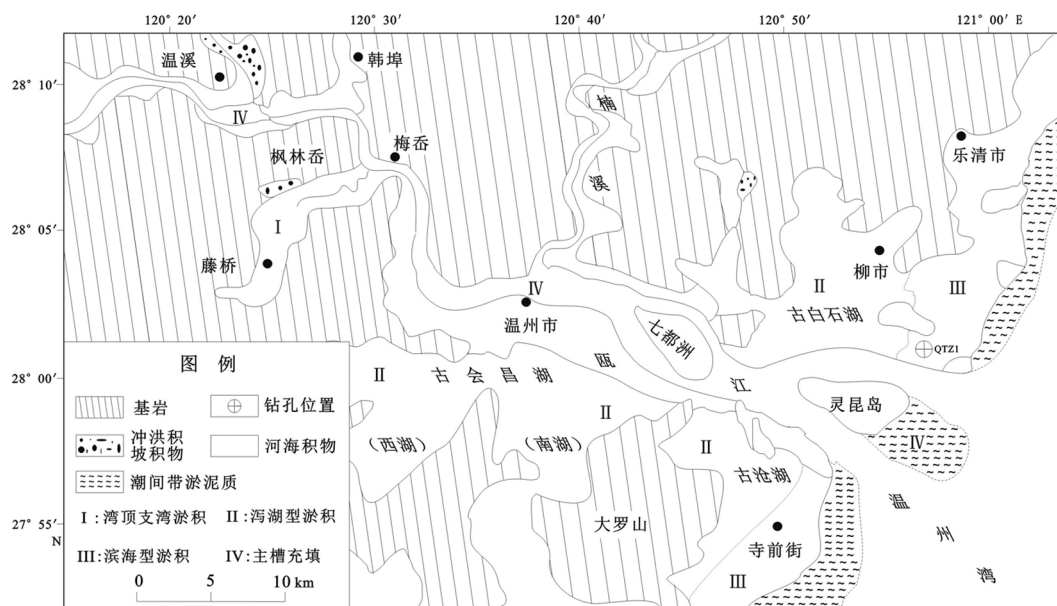


图1 温州湾沿海平原沉积地貌图及钻孔位置(改自文献[45])

Fig.1 Geomorphological map of Wenzhou Bay and borehole location (modified from reference [45])

120°56'58.6"E,共取得岩芯 126.3m,选取深度为 2~91.5m 的岩芯进行沉积物粒度测试、微体古生物化石鉴定及古地磁测试。

目前,沉积物粒度的测试方法有很多种,其中激光粒度分析法是目前国际上应用最为广泛的粒度测试方法^[46,47]。样品的粒度测试在中国地质科学院水文地质环境地质研究所粒度实验室进行,使用的设备是 MALVERN 公司研发的 MasterSizer 2000 型激光粒度仪。该设备的粒径测量范围为 0.2~2000 μm ,重复测量的相对误差 $<1\%$,具备高效的数据采集与信息处理功能,并具有智能化的操作模式^[48]。烧杯中加入约 2g 样品,使用浓度为 30% 的 H_2O_2 约 10mL 处理样品中的有机质,再以过量浓度为 38% 的 HCl,在加热条件下处理碳酸盐组分。至清洗样品溶液至中性,加入六偏磷酸钠作为分散剂进行超声震荡,确保样品颗粒呈分散状态后上机测试^[49]。

微体古生物样品的鉴定是在中国地质科学院水文地质环境地质研究所实验室完成,鉴定内容包括有孔虫和介形虫。将沉积物样品在不超过 80℃ 的条件下进行烘干。称取 50g 样品,置入烧杯中,并加入适量蒸馏水浸泡约 2~3d,使样品充分散开。将样品用孔径为 63 μm 的筛网进行多次筛分,仅保留直径 $>63\mu\text{m}$ 的样品,并再次以 $\leq 80^\circ\text{C}$ 的条件进行烘干及称重。称重后,样品用 SZX16 体视显微镜进行微体古生物化石鉴定。本文所用微体古生物化石均进行全样鉴定,以期取得更加准确的鉴定结

果。

3 沉积物粒度分析

本文的粒级划分方案采用国际上应用较为广泛的伍登-温特华斯粒级标准(Udden-Worth Grade Scale)^[50,51],并以谢帕德法为标准对沉积物进行命名^[52]。

在岩芯 91.5~2m 区间内处理样品 117 件。根据实验结果,绘制粒度参数变化图和钻孔柱状图(见图 2、图 3),按照沉积物粒度参数曲线变化规律将其自下而上划分为 4 个粒度带,并通过频率分布曲线、概率累积曲线、众数曲线,结合粒度参数变化探讨沉积动力条件,并对沉积环境进行初步分析。

QTZ1 钻孔沉积物粒径范围变化较大,按 MasterSizer 2000 激光粒度仪的测试要求,筛除粒径 $>2000\mu\text{m}$ 的颗粒后,样品粒径在 0.2~2000 μm 均有出现。沉积物岩性以淤泥质的粉砂质黏土、砂质粉砂、粉砂质砂为主,沉积物颗粒成分变化相对频繁,推测与钻孔位置处在河口附近有关。

3.1 频率分布曲线特征

QTZ1 钻孔的频率分布曲线变化较大,曲线形态以单峰为主,对称性较好,同时存在少量双峰形态曲线,双峰频率曲线主要呈现出驼峰状的“伪单峰”形态。双峰形态在 89~76 和 69~53m 层段较为集中,表明该时期研究区存在两次其他物源参与沉积

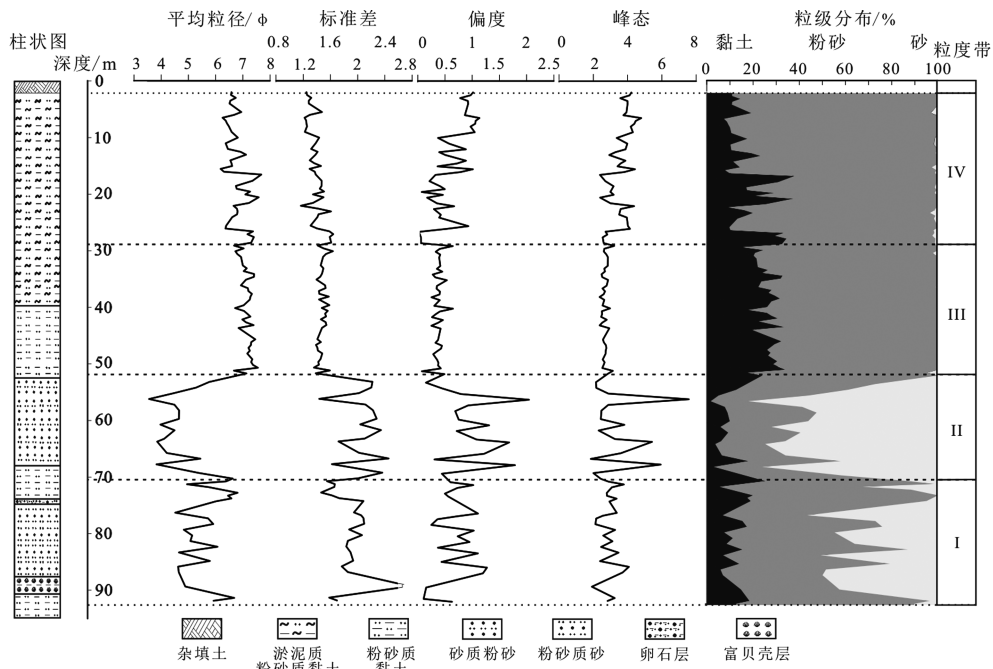


图 2 沉积物粒度参数图

Fig.2 The column diagram of grain size parameters

的过程。各粒度带的沉积物粒度参数见表 1。

粒度带 I:埋深 91.5~70m,共 21 个样品。本带沉积物各粒级含量变化非常频繁,频率分布曲线形态复杂。该粒度带底部,深度 91.5~89m,频率曲线为单峰,且近正态分布,峰态较宽,岩性对应粉砂质黏土;该粉砂质黏土层之上,覆盖厚度达 2.6m 的贝壳富集层,贝壳占比达 80%。富贝壳层的粒度样品在使用 2000 μm 的筛网过筛后,测试所得曲线形态表现为近似单峰形态的三峰曲线,为异常结果。富贝壳层样品的粒径分布无实际意义,但可据此推测该时期存在海侵事件;该粒度带中上部,87~74m 范围,曲线形态过渡到双峰,次峰不明显,峰值为 9~11 μm ,众数 70~80 μm ,岩性为粉砂质砂,其中粉砂含量占明显优势,平均含量 52.68%,砂含量稍低,平均含量 35.26%。该层段样品偏度为正偏,对称性不好,在细粒端可见明显长尾,本段自下而上黏土含量逐渐增加,砂含量逐渐减少,在 74m 处黏土

含量超过砂粒级组分。本带顶部砂含量降低,频率曲线回归单峰形态。

粒度带 II:埋深 70~53m,共 16 个样品。该段下部为粉砂质黏土,曲线形态为单峰,与粒度带 I 相比,平均粒径增加,砂含量极高,平均值为 54.75%,总体粒径变化存在波动但幅度较小;频率曲线以双峰形态为主,峰值粒径较粒度带 I 有明显增加。本段粒径范围变化较大,变化范围 7.6~112.8 μm ,偏度均属正偏态,形态差异较大。本带分选性较差,水动力条件为高能。

粒度带 III:埋深 53~29.5m,共 36 个样品。该层段曲线形态均为单峰,众数范围 7~14 μm ,平均粒径 10.63 μm 。与粒度带 I、II 相比,该段砂含量发生突变,平均含量仅 0.28%,粉砂平均含量增加,达到 72.62%,黏土含量增至 27.05%,各粒级组分含量变化小。偏度值较小,近似正态分布,峰态较宽。砂质沉积物消失,沉积水动力由高能突变为低能,并

表 1 沉积物粒度参数

Table 1 Grain size parameters of the borehole

	平均粒径/ ϕ	标准差	偏度	峰态	黏土/%	粉砂/%	砂/%
粒度带 IV	6.82	1.38	0.55	3.50	18.82	80.42	0.76
粒度带 III	7.15	1.4	0.37	2.66	27.05	72.62	0.33
粒度带 II	4.67	2.07	0.88	3.32	10.48	34.77	54.75
粒度带 I	5.57	1.88	0.62	2.93	13.20	60.90	25.90

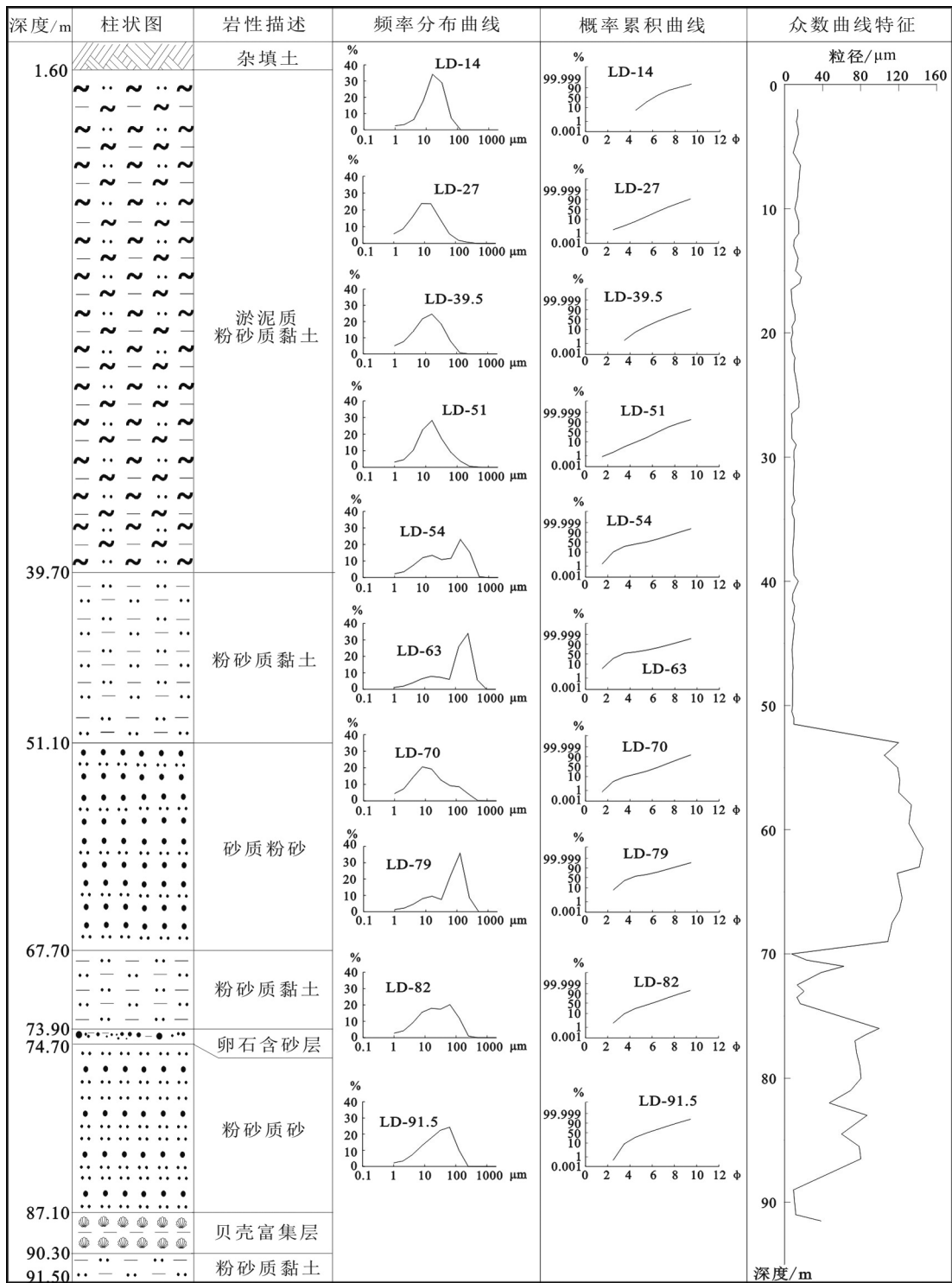


图3 QTZ1 钻孔柱状图及典型频率分布曲线、概率累积曲线

Fig.3 Column of QTZ1 borehole with typical frequency distribution curves and probability accumulation curves

逐渐趋于稳定。推测钻孔地区由陆相沉积过渡为滨海相沉积,保持稳定且较低能的水动力条件。

粒度带 IV:埋深 29.5~2m,共 46 个样品。频率曲线均为单峰态,平均粒径增加至 13.51 μm ,粉砂平均含量增至 81.22%,黏土平均含量稍有降低,为 17.95%,砂含量仍趋于 0。众数范围 6.957~17.672 μm ,偏度值有所增加,均为正态分布,岩性为

淤泥质粉砂质黏土。与粒度带 III 相比,水动力条件有所增强,且存在波动。推测该时期为河、海交互沉积,以海相为主。

3.2 概率曲线特征

概率累积曲线分析方法,采用曹伯勋提出的以 3ϕ (粒径 $d=0.125\text{mm}$) 为界,将正态分布的概率累

积曲线第一截点所对应的粒径 $<3\phi$,且砂砾含量大于 50% 的称为粗粒型,反之则称细粒型,概率累积曲线的不同特征具有不同的环境意义^[51]。

QTZ1 钻孔粒度样品的概率累积曲线符合滨海河口沉积相的基本特征,根据样品的概率累积曲线特征可分为三组,91.5~74m 粉砂质砂层主要为细二段型;74~53m 砂质粉砂为粗三段型,53~2m 淤泥质粉砂质黏土均为细一段、细二段型。

第一组:91.5~74m,对应于粒度带 I,以细二段型为主,少数为粗三段型。细粒型样品第一截点约在 3.5 ϕ ,跳跃组分占 40%~50%,滚动组分偏少,悬移总体略少于跳跃总体,但跳跃总体的分选性好于悬移总体。粗粒型样品仅在 74 和 89m 处出现,第一截点均在 1.8 ϕ 左右,跳跃组分占 50% 以上,悬移组分较少。本段沉积环境变化大,水动力较强。

第二组:74~53m,对应于粒度带 II 层段,该段全部样品均为粗三段式,第一截点约 2.5 ϕ ,其跳跃组分达到 57%,悬移组分稳定在 12%,跳跃组分分选性较好,整体粒径偏粗,水动力条件较高能。该层段样品表现为河流相的砂含量较高的砂质粉砂沉积物,跳跃总体含量在 74~69m 段由低到高,滚动总体含量极低。而该层段上部跳跃总体则呈由高到低变化趋势,滚动总体含量变化较大。相应沉积动力条件表现为弱→强的过程。

第三组:53~2m,对应于粒度带 III、IV,该段样品多为细一段或细二段式,第一截点 4~6 ϕ ,跳跃组分占比较高,滚动组分极少。该层段自下而上跳跃组分呈逐渐增加,第一截点粒径逐渐变细,表明水动力较低能且逐渐增强。

综上所述,QTZ1 钻孔区域晚第四纪以来其水动力条件的整体变化与频率分布曲线表现出的结果基本一致。

3.3 众数分布特征

众数是频率曲线上具有明显集中趋势点的粒径值。众数的变化控制了沉积物的分选性、峰态、偏度等粒度参数变化^[53],对沉积物物源区域研究影响深远,同时能反映沉积物的沉积趋势。

QTZ1 钻孔的总体众数粒径为 7~145 μm ,在垂向上具有明显的变化规律,自下而上可分为三组:第一组:91.5~70m,对应粒度带 I。自深度 86.5m 向上,岩性主要为粉砂质砂,由于粉砂和砂含量的变化,该组众数曲线波动明显;第二组:70~53m,对应粒度带 II,岩性为砂质粉砂,众数出现峰值,砂含量高且稳定;第三组:53~2m,对应粒度带 III、IV,平

均众数粒径仅为 10.62 μm ,底部为粉砂质黏土,中上部为淤泥质粉砂质黏土,整体粒径偏细。

观察发现,钻孔在 86.5~53m 范围出现两段砂含量极高的地层,可划分出高能且不稳定的水动力条件下形成的两个沉积旋回,这一结果与钻孔岩芯柱状图中的岩性描述一致。含砂层沉积动力复杂,推测有洪积、冲积等作用参与,其沉积特征为瓯江口地区的河流沉积和滨海波浪沉积共同作用的结果。

浙江东部沿海平原地区,均不同程度遭受过第四纪海侵影响。末次海侵后,内陆架泥砂经河流搬运在河口落淤,借助波浪和潮汐作用向滨海平原区搬运^[40]。钻孔中全新统具有典型的滨海淤积沉积特征,这与前文所得出的全新世水动力条件低能且逐渐增强的结论相吻合。温州沿海平原地区粒度变化自下而上呈较粗→中等→粗→细→较细的沉积韵律,水动力条件具有由高能且动荡过渡为低能且稳定的演化趋势。

4 微体古生物特征及沉积环境分析

4.1 微体古生物分布特征

根据微体化石鉴定结果,QTZ1 钻孔有孔虫见 38 属 117 种,介形虫见 22 属 27 种。基于有孔虫在垂向上的分布特征,自下而上可划分为 5 个含有微体化石组合带,以及 2 个微体化石缺乏带 I_L 和 II_L (图 4),微体化石群组合特征及环境意义如下:

组合带 I:本带埋深 90~78m,地层岩性为青灰色粉砂质砂,底部贝壳富集,局部富含贝壳碎片。有孔虫丰度为 136~360 瓣/20g, *Ammonia beccarii* 毕克卷转虫 10.71%、*Ammonia aomoriensis* 奥茅卷转虫 10.13%、*Cribronion gnythosuturatum* 凹坑筛诺丁虫 8.26%。其他有孔虫以陆架浅海种为主,主要成分为 *Elphidium advenum* 异地希望虫、*Elphidium hispidulum* 粗糙希望虫、*Bolivina robusta* 强壮箭头虫等种, *Ammonia tepida* 暖水卷转虫出现较少。本带底部存在 *Ammonia beccarii* 含量峰值(36.45%),化石数量自下而上逐渐减少, *Ammonia aomoriensis* 在本带顶部显著增加(18.32%)。本带介形虫优势种为 *Sinocytheridea impressa* 凹陷中华美花介、*Bicornucythere bisanensis* 皮桑双角花介、*Neomonoceratina dongtaiensis* 东台新单角介,均为浅海或滨岸环境指示种(孔维瀚)。基于类彦立等(2015)对 *Ammonia beccarii* 和 *Ammonia aomoriensis* 分布特征的研究,并根据地层岩性,综

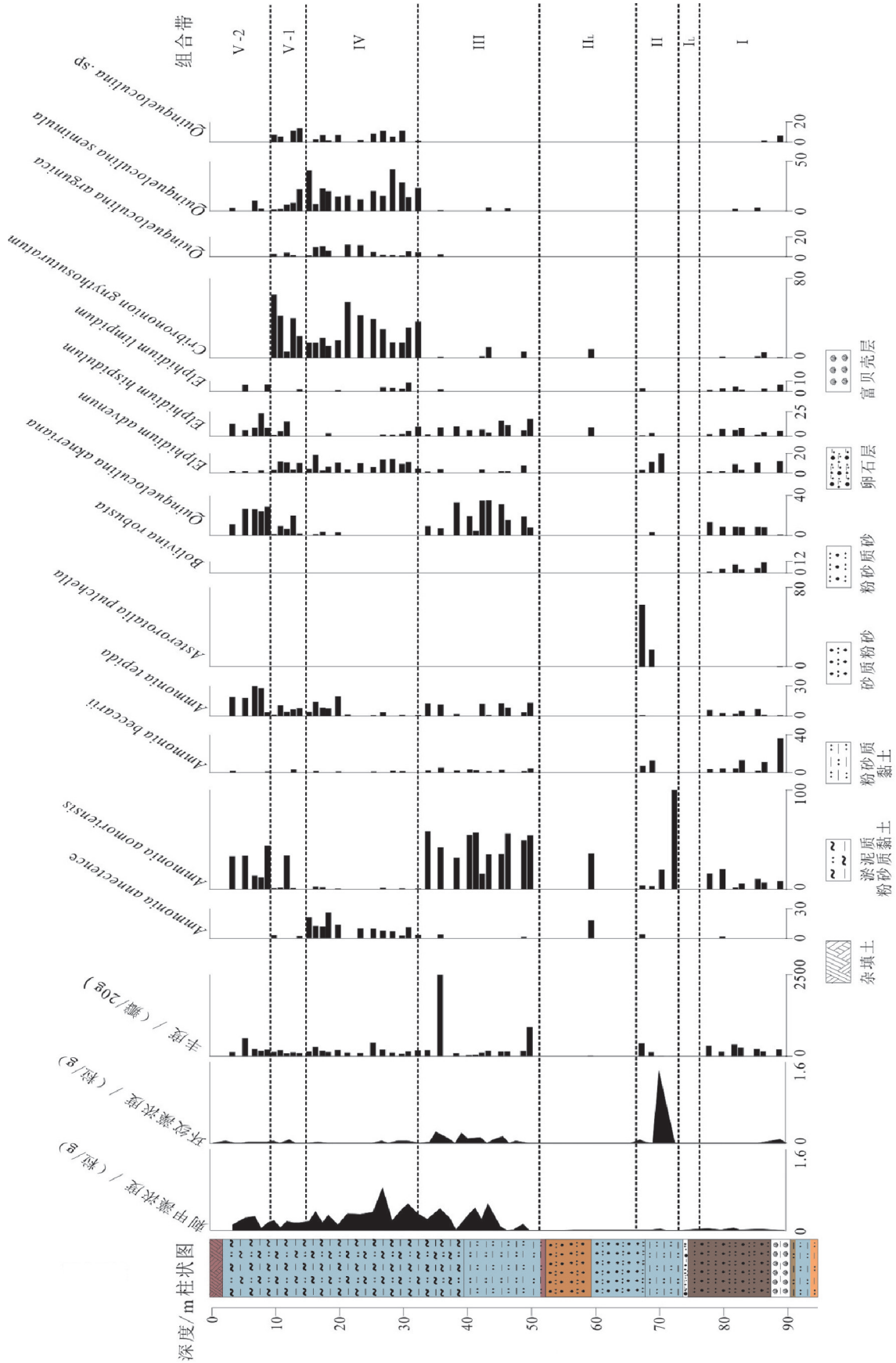


图4 QTZ1孔特殊藻类及主要有孔虫化石分布图式

Fig.4 Distribution of special algae and foraminifera fossils in QTZ1 borehole

合考虑微体古生物分布特征,可认为本带底部为潮间带,逐渐过渡为水深<20m的浅海陆架环境。由于 *Ammonia beccarii* 分布特征与海水温度呈负相关,故推测该时期海水温度具有变暖的趋势。

组合带 II:本带埋深 72.5~67.5m,地层岩性底部为青灰色粉砂,中部为青灰色粉砂质砂,顶部为青灰色砂质粉砂,局部可见钙质结核、贝壳类碎片。有孔虫丰度较低,为 5~396 瓣/20g,优势种为 *Asterorotalia pulchella* 普勒星轮虫(26.79%)、*Elphidium advenum* 异地希望虫(11.44%)、*Ammonia aomoriensis* 奥茅卷转虫(9.08%),*Asterorotalia pulchella* 垂向分布具有差异性,底部未发现该种,但顶部含量极高。本带有孔虫种类较少,除上述优势种,仅见少量 *Ammonia beccarii*、*Ammonia annectence*、*Ammonia maruhassii* 等种。本带几乎不含介形类化石,且有孔虫丰度变化较大,仅 69、67.5m 两处具有代表性,根据其分布特征分析,推测本带为浅海陆架环境。

组合带 III:本带埋深 50~34m,地层岩性为青灰色粉砂质黏土,上部存在淤泥质沉积物,局部可见贝壳碎片。有孔虫丰度为 31~2496 瓣/20g,本带 *Ammonia aomoriensis* 奥茅卷转虫占绝对优势(46.59%),其次为 *Cribrononion gnythosuturatum* 凹坑筛诺丁虫(18.33%)、*Elphidium hispidulum* 粗糙希望虫(8.01%)、*Ammonia tepida* 暖水卷转虫(7.44%)、*Elphidiella kiangsuensis* 江苏小希望虫(5.11%)、*Ammonia beccarii* 毕克卷转虫分布极少。介形类化石中广生种 *Sinocytheridea impressa* 凹陷中华美花介占绝对优势,同时在本带顶部出现了大量 *Loxoconcha binhaiensis* 滨海湾背介和 *Bicornucythere bisanensis* 皮桑双角花介。因此,根据 *Ammonia aomoriensis* 分布和本带顶部介形类化石特征,推测本带以潮间带环境为主,顶部为水深较浅的滨海沉积环境。

组合带 IV:本带埋深 34~15.5m,地层岩性为淤泥质青灰色粉砂质黏土,贝壳类碎片丰富。有孔虫丰度为 77~416 瓣/20g,优势种为 *Quinqueloculina akneriana* 圆形短五块虫(26.74%)和 *Quinqueloculina semimula* 半缺五块虫(21.26%)。同时本带 *Ammonia aomoriensis* 奥茅卷转虫和 *Cribrononion gnythosuturatum* 凹坑筛诺丁虫化石几乎消失, *Ammonia annectence* 同现卷转虫(10.52%)成为 *Ammonia* spp.卷转虫诸种的主要成分,另可见少量 *Elphidium advenum* 异地希望虫(8.67%)和 *Ammonia tepida* 暖水卷转虫。本带介

形虫化石主要为 *Sinocytheridea impressa* 凹陷中华美花介、*Wichmannella bradyi* 布氏威契曼介、*Wichmannella* sp.威契曼介未定种、*Bicornucythere bisanensis* 皮桑双角花介。根据微体化石分布特征,可推断本带为浅海相环境,水深 20~50m, *Quinqueloculina* spp.五块虫诸种极高的含量表明该时期水温较暖,海水盐度较高。

组合带 V:本带埋深 15.5~3.5m,地层岩性为淤泥质青灰色粉砂质黏土。有孔虫丰度为 94~556 瓣/20g,本带 *Ammonia aomoriensis* 奥茅卷转虫和 *Cribrononion gnythosuturatum* 凹坑筛诺丁虫重新出现,分别占 17.7%和 15.68%,*Ammonia tepida* 暖水卷转虫占比达到峰值(12.98%)。其他有孔虫主要为 *Elphidium hispidulum* 粗糙希望虫、*Quinqueloculina akneriana* 圆形短五块虫、*Quinqueloculina semimula* 半缺五块虫和 *Elphidium advenum* 异地希望虫。介形虫化石主要为 *Sinocytheridea impressa* 凹陷中华美花介和 *Loxoconcha binhaiensis* 滨海湾背介。

根据本带 *Quinqueloculina* spp.五块虫诸种、*Elphidium advenum* 异地希望虫、*Loxoconcha binhaiensis* 滨海湾背介的分布特征,将本带划分为两个亚带:

组合亚带 V-1(15.5~9.5m):本带 *Quinqueloculina* spp.五块虫诸种占绝对优势,*Elphidium advenum* 异地希望虫含量稳定,*Ammonia* spp.卷转虫诸种较少。介形虫主要为 *Sinocytheridea impressa* 凹陷中华美花介和 *Neomonoceratina dongtaiensis* 东台新单角介,其他介形类化石极少。推测本带为温暖高盐的度浅海环境,水深较组合带 IV 略浅。

组合亚带 V-2(9.5~3.5m):本带 *Quinqueloculina* spp.五块虫诸种和 *Elphidium advenum* 异地希望虫几乎消失,*Ammonia aomoriensis* 奥茅卷转虫、*Ammonia tepida* 暖水卷转虫、*Cribrononion gnythosuturatum* 凹坑筛诺丁虫、*Elphidium hispidulum* 粗糙希望虫显著增多。介形虫分布特征表明,*Loxoconcha binhaiensis* 滨海湾背介含量显著增加,表明本带沉积环境已趋向于浅海—海湾相,顶部表现出潮间带环境特征。

4.2 海相地层划分及沉积环境分析

第四纪沉积物中微体藻类化石类型丰富,某些特殊藻类的沉积记录能作为第四纪海相划分的依据。*Spiniferitaceae* 刺甲藻属咸水种,多分布于近海地区,具有典型的海相地层指示意义^[54]。Con-

centricystis 环纹藻为淡水种,通常分布于湖相或河漫滩相沉积物中^[54,55]。基于 QTZ1 钻孔特殊藻类在垂向上的浓度图式(图 4),结合微体古生物组合特征,自上而下可划分出 3 个海相层。其中第一海相层与第二海相层在垂向上沉积连续,但微体化石组合特征存在显著差异,故将其划为两个不同的海相地层。

第一海相层(对应微体化石组合带 IV、V)

本层的 *Spini feritaceae* 刺甲藻化石浓度较高,基本具有海相地层指示意义,底部出现峰值,自下而上浓度逐渐减小。*Concentricystis* 环纹藻化石极少,主要集中在本层中上段。有孔类和介形类化石的浓度和分异度均有较高水平,其中喜温暖高盐环境的 *Quinqueloculina* spp. 五块虫诸种含量极高,海相程度较高。综合考虑化石特征,第一海相层海相程度较高,海水温暖,为盐度较高的浅海陆架沉积环境,局部可能发育河口湾或湖沼等淡水环境,同时本层海水深度表现出逐渐变浅的趋势。

第二海相层(对应微体化石组合带 III)

本层 *Spini feritaceae* 刺甲藻化石总体浓度略高于第一海相层,其分布特征与第一海相层中上段相仿,海相地层指示意义明确。*Concentricystis* 环纹藻化石浓度较第一海相层显著增加,且垂向分布相对均匀,与第一海相层存在显著的差异性,表明该层淡水环境存在相当规模。结合本层微体古生物分布特征,可推断第二海相层以潮间带环境为主,局部发育滨海湖沼,顶部过渡为浅海—滨岸环境。该时期海水温度略低于第一海相层所对应的时期,盐度基本正常。

第三海相层(对应微体化石组合带 I、II)

本层可见少量 *Spini feritaceae* 刺甲藻化石,其分布主要集中在 90~73m,在 71~55m 仅零星出现。*Concentricystis* 环纹藻化石浓度较低,垂向上波动极大。在本海相层中仅 73.5~70.5m 可见,且在 73.5m 处出现峰值,*Concentricystis* 在地层上的分布特征与组合带 I 和组合带 II 之间不含有孔虫的层位对应。有孔虫化石以浅海陆架种为主, *Ammonia* spp. 卷转虫诸种的丰度表明该时期存在海相地层。特殊藻类浓度较低,说明第三海相层的水深较浅,海相程度不高,属于温度盐度正常的近岸海区,中部发育滨海湖沼相沉积,以淡水环境为主。

5 讨论

5.1 海相层对比

在温州平原已有的资料中,汪品先通过研究温

州、黄岩平原 4 个钻孔的海相地层,发现了 4 个海侵层的记录,并指出该地区第四纪以来海侵地层的海相程度自下而上逐渐增强^[14]。本文研究发现,QTZ1 孔的海相层能够与其他海相层进行良好的对比(图 5),QTZ1 孔第一、第二海相层与温黄 29 孔、温 2 孔的第 I、II 海侵层对应,其岩性特征及地层埋深的吻合度较高。QTZ1 孔第三海相层可对应温黄 29 孔的第 III 海侵层,海相性较弱,该层在与 QTZ1 孔地理位置更近的温 2 孔中没有记录,表现出了一定的差异性。

需要说明的是,QTZ1 孔的微体化石具有丰富的广盐广温性的有孔虫记录,但明显缺少窄盐海相化石,这一特征在第三海相层中尤其明显。因此可以认为,QTZ1 孔具有海相地层指示意义,但其地理位置邻近瓯江河口,海相沉积存在一定干扰,微体组合带 I、II 化石稀少。因此根据有孔虫化石组合认定 QTZ1 孔的“海相”地层存在误判,第三海相层应以海陆过渡相为主^[15]。

5.2 海相层的年代

基于对海相层的划分与对比研究,为了确定 QTZ1 孔海相层的地质年龄,本文以岩石地层资料为基础^[43,44],结合磁性地层方法进行年代分析。结果显示,钻孔剖面上部为一套颗粒较细的灰色淤泥质沉积层,沉积连续,基本符合已有岩石地层资料的描述。同时,根据前人对浙江沿海平原海侵层的研究,普遍认为第一海相层发育在 10ka 左右^[9],而 QTZ1 孔第一海相层的微体化石组合中突然出现大量暖水种有孔虫,该种群结构突变所反映的气候变化,与全新世气候变暖的趋势及前人研究结果相吻合。因此,综合考虑 QTZ1 钻孔 Q_h/Q_p^3 界线约在 34m。由于缺乏 AMS¹⁴C 测年结果,在仅用古地磁数据和岩石地层资料的情况下,对全新统范围的准确界定显得尤为重要。为验证 QTZ1 孔 Q_h/Q_p^3 界线划分的准确性,需要与浙江沿海地区其他钻孔进行对比。已知浙江沿海泥质沉积物在全新世的平均沉积速率约为 3.47m/ka^[56],在此基础上,通过对温州^[45]、宁波^[55,57]、杭州^[58]等地的研究,发现全新统底界埋深均位于 30~50m。因此,可认为本文对 Q_h/Q_p^3 界线的界定具有合理性。

基于以上分析,不难推断 QTZ1 孔磁性序列中 40m 处的磁性倒转事件是哥德堡极性亚时(Gothenburg, 12ka)(图 6)。按照时间序列分析,拉尚极性亚时(Laschamp, 41ka)约在 57m,第三海相层底部对应的极性亚时为布莱克事件(Blake, 114~

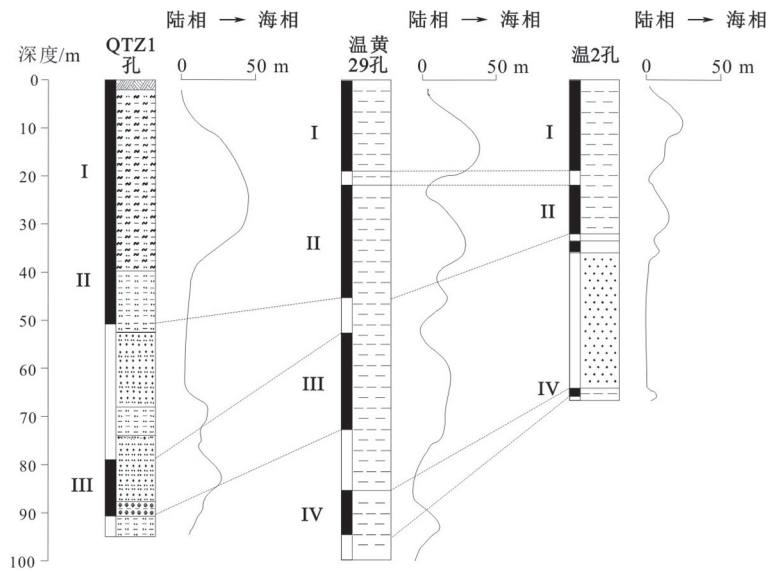


图 5 QTZ1 孔海相层与温州邻近地区其他钻孔海相层对比(温黄 29 孔和温 2 孔资料引自汪品先等^[14])
 Fig.5 Correlation of marine strata in QTZ1 borehole and other boreholes in the vicinity of Wenzhou (Data of Wenhuang 29th borehole and Wen 2nd borehole from Wang Pinxian, et al.^[14])

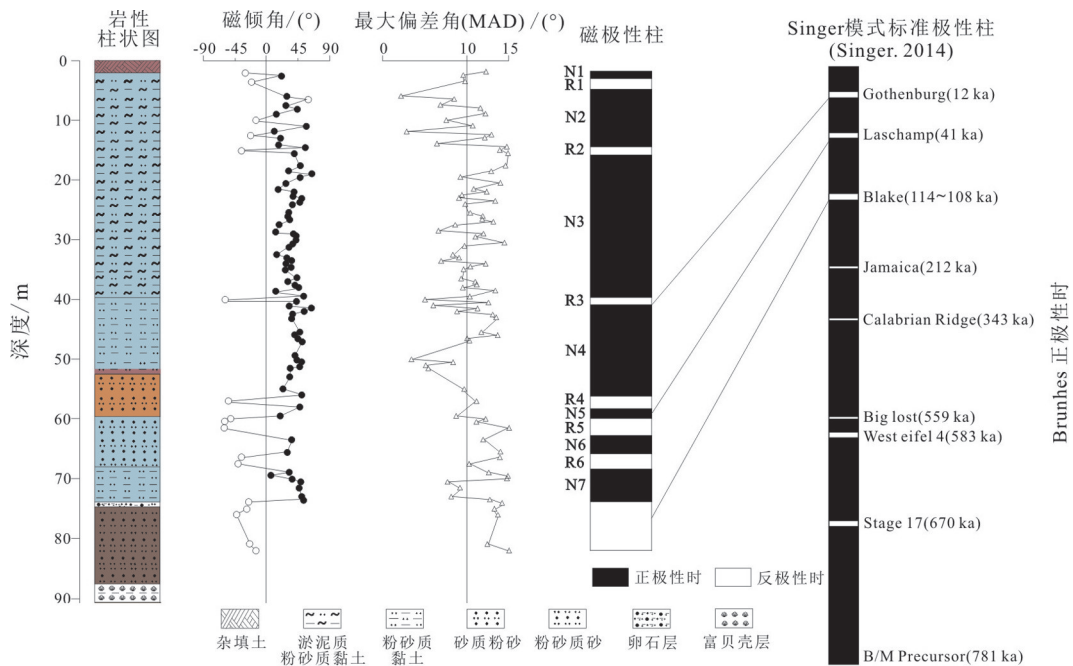


图 6 QTZ1 孔磁性序列及与标准极性柱的对比(标准极性柱采用 Singer 模式为标准^[14])
 Fig.6 Magnetic polarity sequence in QTZ1 borehole and correlation with standard polarity column (Standard polarity column from Singer^[14])

108ka),可作为 Q_3^3/Q_2^2 界线的判定依据。此外,在深度 10~15m 范围内出现的多次极性倒转记录,可能与“宁波亚时”有关^[57]。

5.3 粒度特征和微体化石组合综合分析

粒度带 I 能够与微体化石带 I、微体化石带 II

及两个微体带之间的层段良好对应。微体带 I 以广盐广温性的滨岸种—浅海种化石为主,海相指示意义明确。但本带出现的双峰频率曲线及概率累积曲线揭示的较高能且动荡的水动力条件,均反映出对应的第三海相层除海相沉积特征外,还存在其他沉积作用及物源。因此沉积环境不完全表现为海相沉

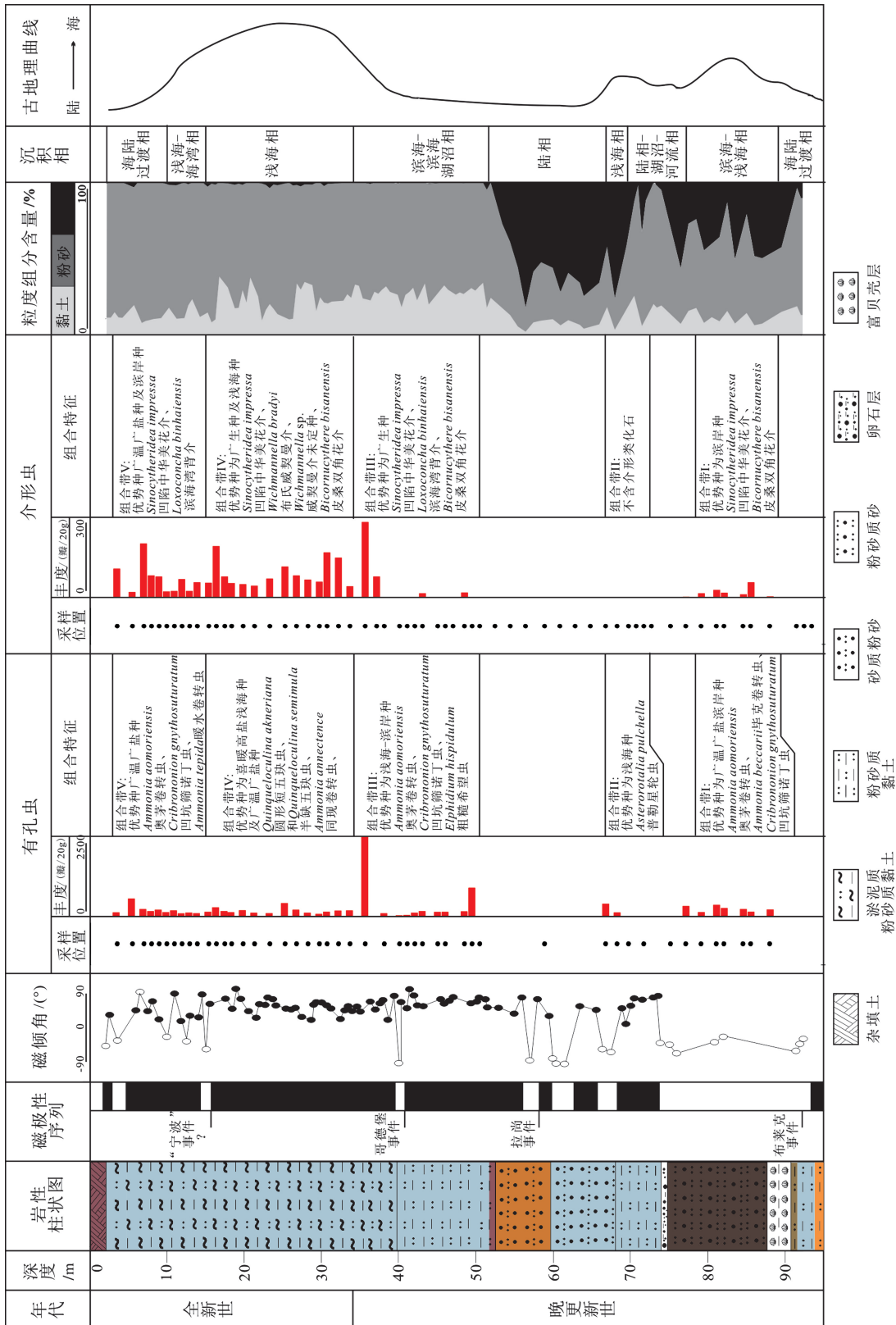


图 7 QTZ1孔沉积环境综合图
Fig.7 Comprehensive column diagram of sedimentary environment of QTZ1 borehole

积,以海陆过渡相为主,推测河口湾地区存在河流作用影响。微体化石带 II 化石较少,特定层位高丰度浅海种化石可以指示浅海相沉积环境,在微体化石带 I 和带 II 之间,环纹藻化石的含量表明该层存在湖沼沉积环境。

微体化石带 II 和带 III 之间不含微体化石的层段可以对应粒度带 II,高能但稳定的沉积动力及极少的微体化石,表明该带为陆相沉积。

粒度带 III 可对应微体化石带 III 和带 IV 底部。该时期物源单一,水动力低能且稳定,刺甲藻和环纹藻均有一定浓度,微体化石以广盐广温种为主。以上特征表现为典型的河口湾—潮间带环境,滨海—滨海湖沼相广泛发育,局部发育浅海相。

粒度带 IV 对应微体化石带 IV 的中上部和带 V。全新世温度变暖,喜暖高盐种化石大量沉积,同时由于全新世存在多次局部海平面变化^[59],相较于粒度带 III,相对不稳定的粒度特征和略有增加的沉积物粒径,为全新世局部变化的响应。第二海相层和第一海相层,在时间尺度上能够很好地与汪品先等学者的研究成果相对应^[14]。

综上所述,沉积物粒度与微体化石特征分析的结果基本吻合。因此,综合考虑 QTZ1 孔的沉积物粒度、微体化石分析结果,结合岩石地层、磁性地层对海相层年代的划分,总结温州沿海平原晚第四纪以来的沉积环境记录见图 7 所示。

6 结论

(1) 根据海相地层的对比分析,结合岩石地层、磁性地层资料,认为 QTZ1 孔的 Q_h/Q_p^3 界线在 34m, Q_p^3/Q_p^2 界线在 91.5m 附近。

(2) 根据对 QTZ1 孔的微体古生物分布特征及特殊藻类分析结果,温州沿海平原晚更新世以来发育三套海相沉积单元,海相程度自下而上逐渐增加。第一海相层属全新世,为浅海—海湾沉积相,微体化石组合以喜暖高盐种和广温广盐种为主,符合中国东部沿海全新世气候变暖趋势;第二海相层属晚更新世晚期,为滨海—滨海湖沼沉积相,微体化石组合以广温广盐种为主。该层与第一海相层在沉积地层上连续,但其化石组合具有显著差异;第三海相层为晚更新世早期,以海陆过渡相为主,局部发育河流—湖沼等淡水沉积相。微体化石较少,多为广生种,海相程度不高。

(3) QTZ1 钻孔地层剖面自下而上,黏土含量普遍较低,且相对稳定;粉砂含量总体较高,与砂含

量呈此消彼长的态势;砂含量经历两次低—高一低的变化过程,在深度 53m 处降低至 0。平均粒径随深度的改变变化较大,整体分选性较差,偏度以正偏为主,且近似正态分布居多,峰态有逐渐增大的趋势。沉积水动力条件自下而上经历了低能(Q_p^3)→中低能(Q_p^3)→中高能(Q_p^3)→低能(Q_p^3)→高能(Q_p^3)→中低能(Q_p^3)→中低能(Q_p^3)→低能(Q_p^3)→低能(Q_h)的变化过程。

(4) 晚更新世以来的气候变化引起的海平面升降是该区域沉积环境的主要控制因素。温州沿海平原地区晚更新世沉积特征复杂,以海陆过渡相、陆相为主,局部存在海相沉积层,全新世属于滨海—浅海相沉积。晚更新世以来其沉积环境经历了如下演化过程:海陆过渡相(Q_p^3)→滨海—浅海相(Q_p^3)→河流—湖沼相(Q_p^3)→浅海相(Q_p^3)→陆相(Q_p^3)→滨海—滨海湖沼相(Q_p^3)→浅海相(Q_h)→浅海—海湾相(Q_h)→海陆过渡相(Q_h)。

(5) QTZ1 孔的微体化石特征和沉积环境与前人研究存在一定的差异性,与浙江沿海地区诸多钻孔相比,其差异性主要表现在微体化石的丰度和分异度普遍低于正常滨海平原剖面,窄盐海相有孔类化石缺失。因此可以认为,瓯江河流作用对 QTZ1 孔的沉积相存在一定程度的干扰。

综上所述,本次对 QTZ1 钻孔的海相地层研究为瓯江入海口、温州沿海平原地区的沉积环境演变研究补充了粒度、特殊藻类和古地磁数据。然而沉积环境是自然地理、构造、气候、沉积介质条件共同作用的结果,目前,尚缺乏 AMS¹⁴C 测年数据对地层的年龄进行精确划分,本文对地质年代划分的精确程度仍存在疑虑,如能在现有基础上进一步补充测年数据和孢粉资料,运用多种分析手段,应当能取得更可靠的沉积环境解释。

参考文献 (References)

- [1] 仇建东,刘健,白伟明. 深海氧同位素第 3 阶段古气候—海平面变化研究进展[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(11): 12-16. [QIU Jiandong, LIU Jian, BAI Weiming. Progress of the studies of Paleoclimate and Sea level changes in the marine oxygen isotope stage 3[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(11): 12-16.]
- [2] 孙志林,卢美,聂会,等. 气候变化对浙江沿海风暴潮的影响[J]. 浙江大学学报:理学版, 2014, 41(1): 90-94. [SUN Zhilin, LU Mei, NIE Hui, et al. Effects of climate change on storm surges along in coastal Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2014, 41(1): 90-94.]
- [3] 汪品先,田军,黄恩清,等. 地球系统与演变[M]. 科学出版

- 社, 2018. [WANG Pinxian, TIAN Jun, HUANG Enqing, et al. Earth Systems and Evolution[M]. Science Press, 2018.]
- [4] 刘锐. 宁绍—杭嘉湖地区末次冰消期以来的古气候环境演化与早期人类文明[D]. 南京: 南京大学, 2017. [LIU Rui. Paleo-environmental evolution and the ancient human civilization in the Ningshao-Hangjiahu plain since Last Deglacial[D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.]
- [5] 李志勇. 长江口第四纪地层划分及环境演变[D]. 上海: 华东师范大学, 2005. [LI Zhiyong. Strata of Quaternary and evolution of sedimentary environment in Yangtze Estuary [D]. Shanghai: East China Normal University, 2005.]
- [6] 陈东景, 李培英, 刘乐军, 等. 我国沿海城市海底地质灾害易损性评价[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(11): 11-17. [CHEN Dongjing, LI Peiying, LIU Lejun, et al. Evaluation on submarine geological hazard vulnerability of coastal cities in China[J]. China Safe Science Journal, 2010, 20(11): 11-17.]
- [7] 印萍, 林良俊, 陈斌, 等. 中国海岸带地质资源与环境评价研究[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 843-856. [YIN Ping, LIN Liangjun, CHEN Bin, et al. Coastal zone geo-resources and geo-environment in China[J]. Geology in China, 2017, 44(5): 843-856.]
- [8] 唐迎迎, 高瑜, 毋瑾超, 等. 海岸带生境破坏影响因素及整治修复策略研究[J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(9): 57-61. [TANG Yingying, GAO Yu, WU Jinchao, et al. Research on the influence factors and renovation restoration strategies of coastal habitats destruction[J]. Ocean Development and Management, 2018, 39(9): 57-61.]
- [9] 陈荣华. 浙江沿海地区第四纪海侵[J]. 海洋学报, 1992, 14(3): 76-85. [CHEN Ronghua. The Quaternary transgression in coastal areas of Zhejiang Province[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1992, 14(3): 76-85.]
- [10] 尚帅, 范代读, 王强, 等. MIS 3 以来浙江温瑞平原 YQ0902 孔古环境与古气候变化记录[J]. 古地理学报, 2013, 15(4): 551-564. [SHANG Shuai, FAN Daidu, WANG Qiang, et al. Records of paleoenvironment and paleoclimate changes since the MIS 3 in borehole YQ0902 at Wenrui plain, Zhejiang Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(4): 551-564.]
- [11] 赵建康, 陈介胜. 浙江全新世海滩岩及其古地理意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(1): 35-42. [ZHAO Jiankang, CHEN Jiasheng. Holocene beachrock in Zhejiang Province and its paleogeographic significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1994, 14(1): 35-42.]
- [12] 江大勇, 杨守仁. 浙江沿海中全新世古气候、古环境初步分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1996, 32(2): 199-205. [JIANG Dayong, YANG Shouren. A preliminary study on mid-Holocene paleoclimate and paleoenvironment along the coastal of Zhejiang Province[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1996, 32(2): 199-205.]
- [13] 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. A preliminary study of Quaternary transgression strata in Eastern China[J]. Acta Geological Sinica, 1981(1): 1-13.]
- [14] 汪品先, 闵秋宝, 卞云华. 温州、黄岩平原第四纪海侵地层[J]. 海洋通报, 1982(3): 29-36. [WANG Pinxian, MIN Qiubao, BIAN Yunhua. Quaternary transgression formation of Wenzhou plain and Huangyan plain[J]. Marine Science Bulletin, 1982(3): 29-36.]
- [15] 汪品先, 闵秋宝, 卞云华. 我国东部第四纪的海陆过渡相地层[J]. 第四纪研究, 1985(1): 35-43. [WANG Pinxian, MIN Qiubao, BIAN Yunhua. Quaternary transitional facies strata in Eastern China[J]. Quaternary Sciences, 1985(1): 35-43.]
- [16] 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等. 东海表层沉积中有孔虫、介形虫组合分布的初步研究[J]. 同济大学学报, 1979(2): 90-108. [WANG Pinxian, MIN Qiubao, BIAN Yunhua, et al. A preliminary study on the assemblage and distribution of foraminifera and ostracoda in the surface sediments of the East China Sea[J]. Journal of Tongji University, 1979(2): 90-108.]
- [17] 汪品先, 闵秋宝. 我国第四纪海侵研究中的几个基本问题[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5(1): 15-25. [WANG Pinxian, MIN Qiubao. Quaternary marine transgressions in China: Some basic questions[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1985, 5(1): 15-25.]
- [18] 汪品先. 微体化石在海侵研究中的应用与错用[J]. 第四纪研究, 1992, 12(4): 321-331. [WANG Pinxian. The use and misuse of microfossils in marine transgression studies[J]. Quaternary Sciences, 1992, 12(4): 321-331.]
- [19] Wu L, Zhu C, Zheng C G, et al. Impact of Holocene climate change on the prehistoric cultures of Zhejiang region, East China[J]. Journal of Geographical Science, 2014, 24(4): 669-688.
- [20] 郑丽波, 郝秀东, 嵇彬, 等. 全新世以来浙江余姚河姆渡——田螺山遗址的古环境演变及人类活动[J]. 古地理学报, 2016, 18(5): 879-893. [ZHENG Libo, HAO Xiudong, ZHOU Bin, et al. Holocene palaeoenvironment evolution and human activity of the Hemudu——Tianluoshan sites in Yuyao of Zhejiang Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(5): 879-893.]
- [21] 陈斌, 印萍, 徐刚, 等. 浙江内陆架表层沉积物粒度分析特征及运移趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 95-100. [CHEN Bin, YIN Ping, XU Gang, et al. Suspended sediment transport patterns in the Zhejiang inner continental shelf in summer[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(6): 95-100.]
- [22] 高勇, 杨桦. 粒度分析资料在沉积环境研究中的应用[J]. 化工管理, 2017(26): 237-238. [GAO Yong, YANG Hua. The application of particle size analysis data in sedimentary environment[J]. Chemical Enterprise Management, 2017(26): 237-238.]
- [23] 赵利, 彭学超, 钟和贤, 等. 南海北部陆架区表层沉积物粒度特征与沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 111-122. [ZHAO Li, PENG Xuechao, ZHONG Hexian, et al. Characteristics of grain size distribution of surface sediments and depositional environments in the Northern shelf region of the South China sea[J]. Marine Geology & Quater-

- nary Geology, 2016, 36(6): 111-122.]
- [24] 吕文哲. 海岸带至深海典型海洋沉积物粒度特征研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2017. [LV Wenzhe. Study on grain size characteristics of sediments from different marine environments[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, Soa, 2017.]
- [25] 卫蕾华, 蒋汉朝, 何宏林, 等. 末次冰期山西洪洞高分辨率粒度和磁化率记录的 H₅ 事件及其气候演化意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(4): 193-202. [WEI Leihua, JIANG Hanchao, HE Honglin, et al. Heinrich-5 event revealed by high-resolution grain-size and magnetic susceptibility records and its significance of climate evolution in last glacial at Hongtong, Shanxi, China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(4): 193-202.]
- [26] Seyed H S, Vijay P S, Mahboobeh K H, et al. Analysis of sediment rating loops and particle size distributions to characterize sediment source at Mid-sized plot scale[J]. Catena, 2018, 167: 221-227.
- [27] 张晓东, 季阳, 杨作升, 等. 南黄海表层沉积物粒度端元反演及其对沉积动力环境的指示意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, (10): 1515-1523. [ZHANG Xiaodong, JI Yang, YANG Zuosheng, et al. The surface sediment particle size inversion of the south yellow sea surface and its significance to the sedimentary dynamic environment[J]. Science China: Earth Science, 2015, (10): 1515-1523.]
- [28] Tatsushi M. An application of bootstrap method for analysis of particle size distribution[J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(6): 1404-1408.
- [29] 于秋莲, 张展适, 杜后发. 粒度分析在古环境中的应用[J]. 能源研究与管理, 2010(2): 49-52. [YU Qiulian, ZHANG Zhanshi, DU Houfa. Application of particle size analysis in paleoenvironmental study[J]. Energy Research and Management, 2010(2): 49-52.]
- [30] 赵强, 王乃昂, 程弘毅, 等. 青土湖沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 干旱区地理, 2003, 26(1): 1-5. [ZHAO Qiang, WANG Naiang, CHENG Hongyi, et al. Grain size characteristics of Qingtu lake sediments and its paleoenvironment explanation[J]. Arid Land Geography, 2003, 26(1): 1-5.]
- [31] David W C, John F B, Richard C C, et al. A sediment record of barrier estuary behaviour at the mesoscale: Interpreting high-resolution particle size analysis[J]. Geomorphology, 2014, 221(11): 51-68.
- [32] 张钰东, 石建省, 周爱国. 激光粒度分析法在深圳市第四纪沉积环境分析中的应用[J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(4): 517-523. [ZHAGN Yudong, SHI Jiansheng, ZHOU Aiguo. Application of laser particle size analysis in environment analysis of Quaternary sediments in Shenzhen[J]. Journal of University of Chinese Academy of Science, 2014, 31(4): 517-523.]
- [33] 张璞, 陈建强, 田明中, 等. 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, 2005, 27(1): 88-94. [ZHANG Pu, CHEN Jianqinag, TIAN Minzhong, et al. Application of sediment grain size analysis in Quaternary environment research and its stratum compartmentalization and contrast function in Xiamen island, Fujian Province[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005, 27(1): 88-94.]
- [34] 张璞, 陈建强, 田明中, 等. 福建省漳州市第四纪沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 沉积学报, 2005, 23(2): 275-283. [ZHANG Pu, CHEN Jianqinag, TIAN Minzhong, et al. Grain size characteristics of Quaternary sediments in Zhangzhou City, Fujian Province and their environment implication[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(2): 275-283.]
- [35] 张璞, 陈建强, 田明中, 等. 福建省泉州市第四纪沉积物粒度特征及沉积环境分析[J]. 盐湖研究, 2005, 13(2): 25-33. [ZHANG Pu, CHEN Jianqinag, TIAN Minzhong, et al. Grain size characteristics of Quaternary sediments and Its sedimentary environment implication in Quanzhou City, Fujian Province[J]. Journal of Salt Lake Research, 2005, 13(2): 25-33.]
- [36] 毕志伟, 杨振京, 徐建明, 等. 塔里木盆地腹地第四纪沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 干旱区地理, 2009, 32(3): 335-339. [BI Zhiwei, YANG Zhenjing, XU Jianming, et al. Grain size characteristics and sediment environment of Quaternary sediments in the central Tarim basin[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(3): 335-339.]
- [37] 陈木宏. 中国新生代海洋微体古生物学研究现状与发展[J]. 古生物学报, 2009, 48(3): 577-588. [CHEN Muhong. Progress of Cenozoic marine micropaleontology in China over the last fifty years[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2009, 48(3): 577-588.]
- [38] 孔维翰. 下辽河平原第四纪微体古生物和气候[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2014. [KONG Weihuan. Quaternary's micropaleontology and climate of the Lower-Liaohe Plain[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2014.]
- [39] 秦志军. 温州市区域地壳稳定性评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2008. [QIN Zhijun. Estimation on regional crustal stability in Wenzhou[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.]
- [40] 黄兆清. 温州近岸沉积物的来源[J]. 台湾海峡, 1984, 3(2): 159-165. [HUANG Zhaoqing. Origin of sediment on the nearshore areas off Wenzhou[J]. Taiwan Strait, 1984, 3(2): 159-165.]
- [41] 张梦莹, 范代读, 吴国瑄, 等. 瓯江三角洲南翼晚第四纪孢粉、藻类记录及其古气候意义[J]. 第四纪研究, 2012, 32(6): 1236-1247. [ZHANG Mengying, FAN Daidu, WU Guoxuan, et al. Palynological characters of late Quaternary in the South Flank of the Oujiang river delta and their paleoclimate implications[J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(2): 1236-1247.]
- [42] 秦志军, 马润则, 龚新法. 温州市区域地壳稳定性评价[J]. 资源环境与工程, 2007, 21(3): 280-283. [QIN Zhijun, MA Runze, GONG Xinfu. Estimation on regional crustal stability in Wenzhou[J]. Resources Environment and Engineering, 2007, 21(3): 280-283.]
- [43] 浙江省地质矿产局. 浙江省区域地质志[M]. 地质出版社,

1989. [Bureau of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province. Regional Geology of Zhejiang Province[M]. Geological Publishing House, 1989.]
- [44] 浙江省地质矿产局. 浙江省岩石地层[M]. 中国地质大学出版社, 1996. [Bureau of Geology and Mineral Resources of Zhejiang Province. Stratigraphy (Lithostratic) of Zhejiang Province[M]. 1996.]
- [45] 张叶春. 温州湾地区全新世沉积环境演变[J]. 西北师范大学学报:自然科学版, 1991, 27(4): 71-77. [ZHANG Yechun. The evolution of the Holocene sedimentary environment in Wenzhou bay area[J]. Journal of Northwest Normal University(Natural Science Edition), 1991, 27(4):71-77.]
- [46] 丁喜贵, 叶思源, 高宗军. 粒度分析理论技术进展及其应用[J]. 世界地质, 2005, 24(2): 203-207. [DING Xigui, YE Siyuan, GAO Zongjun. Development and applications of grain size analysis technique[J]. Global Geology, 2005, 24(2): 203-207.]
- [47] 倪寿亮. 粒度分析方法及应用[J]. 广东化工, 2011, 38(2): 223-227. [NI Shouliang. Particle size analysis method and Its application[J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 38(2): 223-227.]
- [48] 舒霞, 吴玉程, 程继贵, 等. Mastersizer 2000 激光粒度分析仪及其应用[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2007, 30(2): 164-167. [SHU Xia, WU Yucheng, CHENG Jigui, et al. Mastersizer 2000 laser particle size analyzer and its applications[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science Edition), 2007, 30(2): 164-167.]
- [49] 刘秀明, 李文宝, 邢春颖. MS2000 激光粒度分析仪在沉积物分析中的应用[J]. 实验技术与管理, 2007, 24(9): 49-52. [LIU Xiuming, LI Wenbao, XING Chunying. Application of laser grain analyzer MS2000 to deposit analysis[J]. Experimental Technology and Management, 2007, 24(9): 49-52.]
- [50] 龚一鸣, 张克信. 地层学基础与前沿[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2007. [GONG Yiming, ZHANG Kexin. Basics and Frontiers in Stratigraphy[M]. Wuhan: China Geological University Press, 2007.]
- [51] 曹伯勋. 地貌学及第四纪地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1995. [CAO Boxun. Geomorphology and Quaternary Geology[M]. Wuhan: China Geological University Press, 2007.]
- [52] 赵东波. 常用沉积物粒度分类命名方法探讨[J]. 海洋地质动态, 2009, 25(8):41-46. [ZHAO Dongbo. Study on classification and nomenclature of sediment grain size in common use [J]. Marine Geology Letters, 2009, 25(8):41-46.]
- [53] 徐彬. 烟台市滨海平原全新世沉积物粒度特征及沉积环境分析[D]. 烟台: 鲁东大学, 2014. [XU Bin. The grain size characteristic of Holocene sediment and its sedimentary environment implication from coastal area in Yantai City[D]. Yantai: Ludong University, 2014.]
- [54] 唐领余, 毛礼米, 吕新苗, 等. 第四纪沉积物中重要蕨类孢子和微体藻类的古生态环境指示意义[J]. 科学通报, 2013, 58(20): 1969-1983. [TANG Lingyu, MAO Limi, LV Xinmiao, et al. The paleoecological indication of important fern spores and microalgae in quaternary sediments[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(20): 1969-1983]
- [55] 张培新. 宁波东南沿海平原晚第四纪孢粉组合与沉积环境分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2018. [ZHANG Peixin. Late Quaternary sporopollen assemblages and sedimentary environment in the coastal plain of southeast Ningbo[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.]
- [56] 徐方建, 李安春, 李铁刚, 等. 末次冰消期以来东海内陆架沉积速率及其气候环境响应[J]. 地层学杂志, 2011, 35(1): 66-74. [XU Fangjian, LI Anchun, LI Tiegang, et al. Sedimentation rate and typical climatic events recorded in the inner shelf of the East China sea since the Last Deglaciation[J]. Journal of Stratigraphy, 2011, 35(1): 66-74]
- [57] 潘小青, 董贤哲, 章泽军, 等. 浙江宁波地区 Z03 钻孔第四纪磁性地层研究[J]. 华东地质, 2018, 39(1): 26-31 [PAN Xiaoping, DONG Xianzhe, ZHANG Zejun, et al. Quaternary magnetostratigraphic study of the Ningbo area in Zhejiang using borehole Z03[J]. East China Geology, 2018, 39(1): 26-31.]
- [58] 林春明, 黄志城, 朱嗣昭, 等. 杭州湾沿岸平原晚第四纪沉积特征和沉积过程[J]. 地质学报, 1999, 73(2): 120-130. [LIN Chunming, HUANG Zhicheng, ZHU Sizhao, et al. Late Quaternary sedimentary characteristics and processes in the Hangzhou bay coastal plain[J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73(2): 120-130.]
- [59] 岳云章. 浙江沿海¹⁴C 测年与全新世以来的海平面变化[J]. 东海海洋, 1988, 6(2): 16-21. [YUE Yunzhang. Determination of ¹⁴C dating of Zhejiang littoral area and the change of sea level since the Holocene[J]. Donghai Marine Science, 1988, 6(2): 16-21.]