科学通报 2019 年 第 64 卷 第 9 期: 963 ~ 976
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

浙江田螺山遗址剖面记录的水文环境变化

黄宪荣[1], 郑洪波[2*], 胡竹君[1*], 杨青[2], 孙国平[3], 凌光久[1], 周友胜[1], 成玥[1], 曹叶婷[1], 王平[1]

1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023;
2. 云南大学地球系统科学研究中心, 昆明 650500;
3. 浙江省文物考古研究所, 宁波 310014

* 联系人, E-mail: zhenghb@ynu.edu.cn; huzhujun86@163.com

2018-11-28 收稿, 2018-12-12 修回, 2018-12-14 接受, 2019-02-26 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2015CB953804)、国家自然科学基金(41402146)和江苏省科技厅面上项目(BK20150065)资助

摘要 浙江余姚田螺山遗址是新石器时代河姆渡文化的一处保存良好的代表性遗址, 为研究宁绍平原地区古环境变化及其对文化聚落的影响提供了良好的材料. 本研究在田螺山遗址T005探方的西壁获取了厚达263 cm的连续地层剖面, 对样品进行了系统的岩性地层描述、加速器质谱(AMS)^{14}C测年、高分辨率XRF(X射线荧光光谱分析)元素扫描、硅藻和粒度的综合分析. 研究结果表明, 该剖面反映的环境演变过程可以分为3个阶段: (1) 河姆渡第一、二期文化时期(265~211 cm, 约7.0~6.5 cal ka BP), 该层堆积混杂, 砂含量较高, 含石块及陶片, 受人类活动影响明显, 具有海相性指示意义的Ca元素强度相对较低, 优势硅藻种为淡水需氧气生种, 指示了淡水的沼泽环境, 受海水影响较小; (2) 文化层之上为黏土质粉砂与白灰色砂互层的平行层理, 与下覆文化层为不整合接触, 沉积厚度达183 cm(211~28 cm), 年代约4.2~4.0 cal ka BP, Ca元素强度较高, 硅藻组合中优势种为咸水和半咸水种, 推测该时期可能为风暴潮引起的洪水的快速沉积; (3) 第三阶段(28~0 cm)为混杂堆积, 含较多铁锰氧化物斑点, Ca元素强度低, 硅藻主要属种为淡水附生种, 可能为现代水稻田环境. 本研究主要揭示了田螺山遗址7.0~6.5 cal ka BP的水文环境背景以及4.2 cal ka BP左右的事件沉积, 对深入了解田螺山遗址先民生活的环境背景及区域极端事件具有重要意义.

关键词 田螺山遗址, 洪水, X射线荧光光谱分析, 硅藻

全新世气候环境背景变化与新石器时期文化发展关系密切[1]. 虽然整体的温度和降水变化幅度不大[2], 可能不足以影响文化聚落的兴衰. 但是, 极端气候环境事件, 例如风暴潮、洪水等带来的高水位淹没农田, 使得土地盐碱化, 危及房屋建筑, 都不利于人类生存和农业发展[3]. 全新世期间经历了数次百年尺度或千年尺度的快速增温/降温的气候波动旋回, 被称为气候突变事件[4]. 极端气候环境事件的研究及其对新石器文化的影响, 目前是人-地关系研究的热点问题[5~7]. 其中4.2 cal ka BP事件, 是一次较强的快速气候变化事件, 导致了北美洲、北非、地中海至中亚及东亚持续100~200年的干旱[8]. 在我国北方, 4.2 cal ka BP事件表现为频繁的洪水事件[9], 此后中国各地的新石器文化聚落规模都经历了不同程度的减小, 数量锐减. 例如, 钱塘江及环太湖流域的良渚文化此时消失被马桥文化所取代, 黄河中下游龙山文化突然衰落演化成后来的岳石文化[10,11]. 在我国东部沿海地区, Wang等人[12]利用鱼山遗址剖面中综合指标分析研究认为在4.5~4.2 cal ka BP发

引用格式: 黄宪荣, 郑洪波, 胡竹君, 等. 浙江田螺山遗址剖面记录的水文环境变化. 科学通报, 2019, 64: 963–976
Huang X R, Zheng H B, Hu Z J, et al. The changes of hydrological environment recorded in the section of Tianluoshan Site in Zhejiang Province (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 963–976, doi: 10.1360/N972018-01169

© 2019《中国科学》杂志社

生了重大沿海洪涝灾害. He等人[13]的研究则认为鱼山遗址5.0~4.5 cal ka BP的河姆渡晚期稻作文化因海平面的异常波动而发生中断. 对于极端环境事件的重建, 目前还需要开展更多的深入研究.

适宜的地貌环境是先民生存的前提条件. 对于沿海地区的新石器遗址而言, 地貌条件主要受到全新世海平面的控制. 目前, 全新世时期的全球海平面变化研究表明, 在7.0 cal ka BP前后, 海平面已经接近于现今的高度(−3~−5 m); 在7.0 cal ka BP之后, 全球海平面的上升速率大大减慢[14]. 而正是在7.0 ka BP左右, 位于杭州湾南岸的宁绍平原地区孕育了被誉为“中华远古文化之光”的河姆渡文化(约7.0~5.0 ka BP), 对稻作农业起源及其气候环境背景的研究产生了深远的影响. 田螺山遗址是河姆渡文化的典型代表之一, 而对于该遗址文化兴衰背景环境的研究众说纷纭[15~18], 存在较大争议, 包括海水入侵说[17]、海平面升高说[19]和水体加深说[20], 争议的原因可能是不同学者在同一遗址内选用不同剖面进行研究, 受田螺山遗址内微地貌演化过程差异的影响. 通过对田螺山遗址内剖面岩性地层细致的观察, 发现遗址不同剖面的地层所记录的沉积层序不尽相同. 就文化层而言, 遗址馆内西壁有明显的不同程度的文化层缺失, 而南壁, 特别是探方T207, 文化层序列相对较完整; 对于文化层的上覆地层, 海拔相对较高的南壁, 上覆地层沉积较薄, 仅10~15 cm, 而西壁的上覆地层沉积厚度多达180 cm. 因此, 要获得准确的文化遗址背景环境分析, 需要对地层层序有准确的认识和判断.

近年来, 基于硅藻[21,22]、XRF(X射线荧光光谱分析)元素扫描[23,24]、粒度等的综合指标分析已经成为研究海-陆环境变迁和地貌环境演化的重要手段. 周锐等人[25]对长江三角洲顶部湖泊沉积物的钻孔进行XRF全岩芯扫描和X射线荧光光谱的对比分析, 表明Ca, Ti, Fe等6种元素的XRF扫描结果能反映真实含量变化, 为三角洲沉积物中XRF扫描的测试结果提供了有力支持. 基于以上分析, 本文选取具有较厚的文化层上覆地层的田螺山遗址T005探方西壁(T005W)剖面, 进行地层岩性、XRF地球化学元素、硅藻和粒度等多指标综合分析, 结合AMS^{14}C测年, 对比前人的研究结果, 对田螺山遗址古环境以及古人类的活动背景进行初步探讨.

1 研究区概况

宁(波)绍(兴)平原由于受北部的慈南山脉和舟山群岛的屏障作用保护, 处于一个相对稳定的沉积环境, 免受大潮和风浪的直接影响, 有利于沉积物的保存, 地层相对完整连续. 田螺山遗址位于宁绍平原中东部余姚市三七市镇相岙村(30°01′26″N, 121°22′44″E)(图1), 地处慈南山南麓的余姚盆地, 向东距海岸30~40 km, 南邻余姚江河谷地, 其西南7 km是河姆渡遗址. 田螺山遗址是河姆渡文化的典型代表之一, 是河姆渡文化中地面环境保存最好、地下遗存比较完整的一处依山傍水式的史前村落遗址, 具有与河姆渡遗址相近的聚落规模和相似的年代跨度(约7.0~5.5 ka BP)[26]. 田螺山遗址出土了大量的干栏式建筑、炭化稻米、木桨等一系列先民生产和生活的遗存[27], 面积超过3万多平方米, 现代地面海拔2.3 m, 埋深2~3 m, 周围有多个低矮小山丘.

宁绍平原属于亚热带季风气候, 冬夏季风交替明显. 四季分明, 温暖湿润, 雨热同期. 夏季受北半球副热带高压的影响, 盛行东南季风, 高温多雨. 冬季受冷高压的控制, 盛行偏北风. 多年平均降水量约1480 mm, 主汛期5~9月的降水量占全年的60%, 多受台风影响. 由于该地区倚山靠海, 地势地平, 排水困难, 因而在台风季容易形成水害.

2 研究材料与方法

2.1 研究材料

浙江省文物考古研究所2004年对遗址进行发掘, 地层堆积厚度约220 cm, 地层从上向下分为9层, 其中③~⑧层为文化层[26]. 本研究于2016年4月在田螺山遗址馆内探方T005W自上而下连续取U型卡槽样品263 cm. 其中263~250 cm对应文化层⑦层, 250~210 cm对应考古文化层⑥层, 210~28 cm对应②层, 28~0 cm对应考古地层①层.

2.2 研究方法

卡槽运回实验室后, 对表面进行修刮平整, 岩性描述后, 使用XRF Core Scanning岩芯扫描仪进行拍照(成像系统)和元素扫描. 将卡槽的三分之一样品以1 cm为间隔进行分样, 用于粒度、硅藻等代用指标的分析.

(ⅰ) AMS^{14}C测年. 本次研究共挑选了7个有机测年样品. 在T005W剖面的关键层位, 如砂和粉砂互层处、文化层选取5个植物残体作为测年材料. 由于T005W剖面第②层底部测年样品量有限, 在其相邻探方剖面T006-007W上对应T005W第②层底部位置(无法

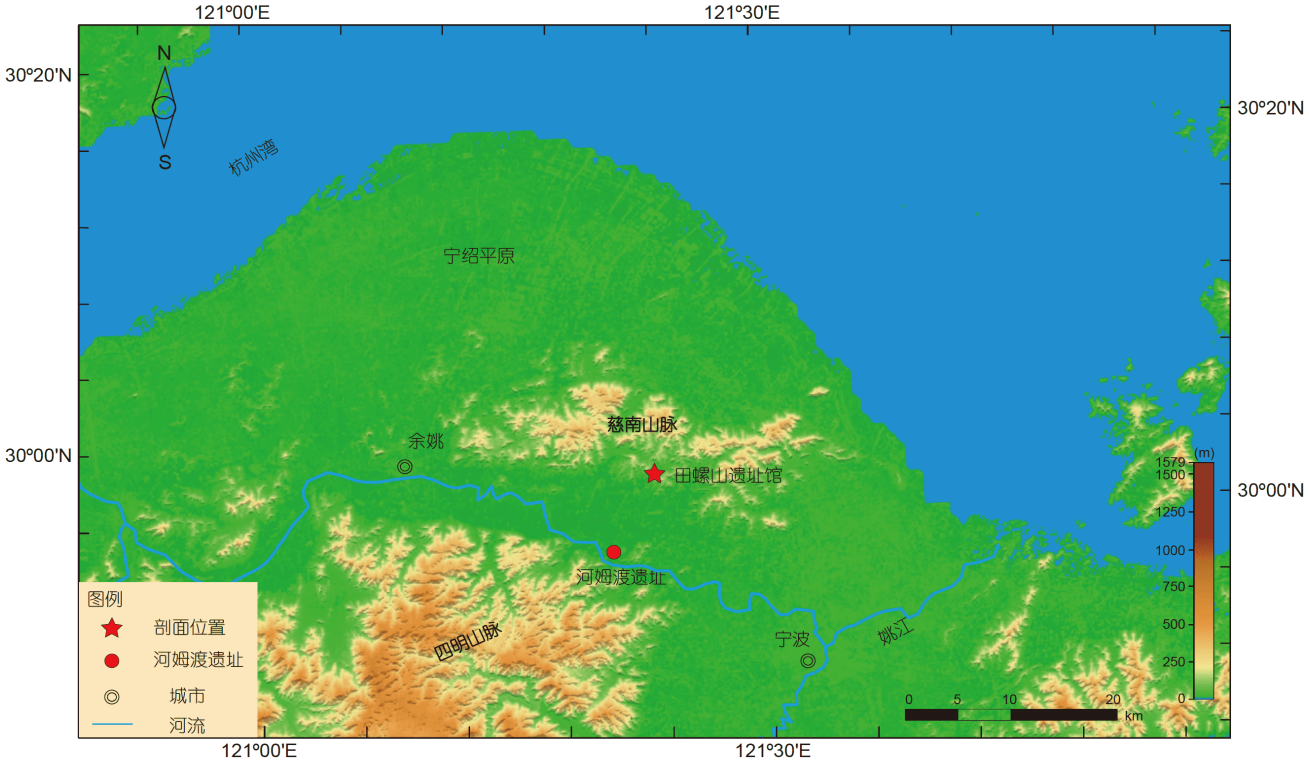


图 1 (网络版彩色)宁绍平原地貌图及采样剖面位置图
Figure 1 (Color online) Geomorphologic map of Ningshao Plain showed the sampling profile location

对应到T005W的具体深度)挑选了2个测年样品. 采集的样品经过水洗筛选和烘干后, 送至美国Beta实验室, 采用加速器质谱法(AMS)^{14}C测年的方法进行年代的测定.

(ⅱ) 硅藻提取与鉴定. 以20 cm为间隔采样, 共选取12个样品. 样品按照标准进行前期处理, 步骤如下: 称取5~6 g土样, 在60℃水浴锅中加热, 用10%HCl和30%H_2O_2分别去除样品中的碳酸盐和有机质; 加去离子水静置24 h, 抽去上层清液, 再加水静置, 重复3次洗样至中性; 用溴化锌配置比重2.3 g/mL的重液, 浮选2次, 通过重液浮选的上清液置于50 mL离心管中, 离心清洗3次至中性, 最后利用中性树胶制片. 在OLYMPUS BX51显微镜下(放大倍数×1000)进行硅藻鉴定和数量统计, 每个样品至少鉴定300粒硅藻(除特殊层位硅藻非常稀少). 硅藻属种的鉴定主要参照Krammer和Lange-Bertalot[28]、郭玉洁和钱树本[29]及金德祥等人[30]的鉴定系统.

(ⅲ) 地球化学元素分析. T005W剖面的元素使用英国Geo Tek公司生产的MSCL-S岩芯扫描仪(Multi-Sensor Core Logger)获得, 在南京师范大学XRF岩芯扫描实验室完成. 仪器测试电压选择10和40 kV, 每个电压测试10 s, 以2 mm为分辨率对卡槽样品进行元素扫描分析. 扫描结果为元素的相对强度, 以cps为计量单位. 岩心扫描仪同时可测量并记录激光平整度(laser profiler). 处理数据时, 首先根据样品的激光平整度将受到表面不平整因素影响的数据删除, 这些数据表现为激光平整度为负值. 然后用SigmaPlot12.5对数据进行分析处理, 得到各元素的变化曲线.

(ⅳ) 粒度分析. 粒度分析以2 cm为分辨率进行测试, 共计132个样品. 样品前处理包括除有机质、除钙胶结物、洗酸、分散等, 具体步骤如下: 取适量样品于烧杯中, 加约10 mL浓度为10%的H_2O_2, 置于温度为60℃的水浴锅中加热, 使有机质充分氧化分解; 待烧杯中无气泡产生时, 加入浓度为10%的HCL去除样品中的碳酸盐; 待充分反应, 取出样品加去离子水静置24 h, 抽去上层清液, 再加水静置, 重复3次洗样至中性, 待测. 上机测试前, 抽去上清液, 加入浓度为0.5 mol/L的分散剂六偏磷酸钠($(NaPO_3)_6$)10 mL, 摇匀后置于超声波分散仪中震荡30 min, 使其成为高度分散的颗粒悬浊液, 在Mastersizer2000粒度分析仪上测试完成, 其测量粒径

范围为0.02~2000 μm, 重复测量相对误差＜3%, 分辨率为0.01ψ. 本次实验采用温氏粒级作为粒度粒级划分的标准: <0.004 mm为黏土, 0.004~0.063 mm为粉砂, >0.063 mm为砂.

3 实验结果

3.1 地层岩性描述

根据岩性特征将该剖面自上而下分为Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ带, 其中Ⅱ带根据层理发育特征又可进一步划分为3个亚带(图2).

Ⅰ带: 263~211 cm, 粉砂质黏土: 黑色, 含砾石、炭屑、木头、植物根系, 底部可见瓦片. 该层与上覆地层有不整合接触面, 有沉积间断. 该阶段的粒径变化范围较大, 黏土、粉砂和砂混合堆积, 富含黑色有机质以及陶器碎片, 受人类活动的影响较明显. 中值粒径在15~30 μm之间, 240~210 cm处, 中值粒径较其他层位高, 以粉砂含量为主, 约为70%~80%, 砂含量也较其他阶段高.

Ⅱ带: 211~28 cm, 整体为棕灰色的粉砂与黏土的互层, 具水平层理和波状层理. 该带的粒径变化范围较小, 相对细粒的黏土质粉砂与相对较粗的粉砂交替出现, 有较明显的平行层理. 黏土以及粉砂含量较为均匀, 分别约为16%和80%, 而砂在局部层位含量略高,

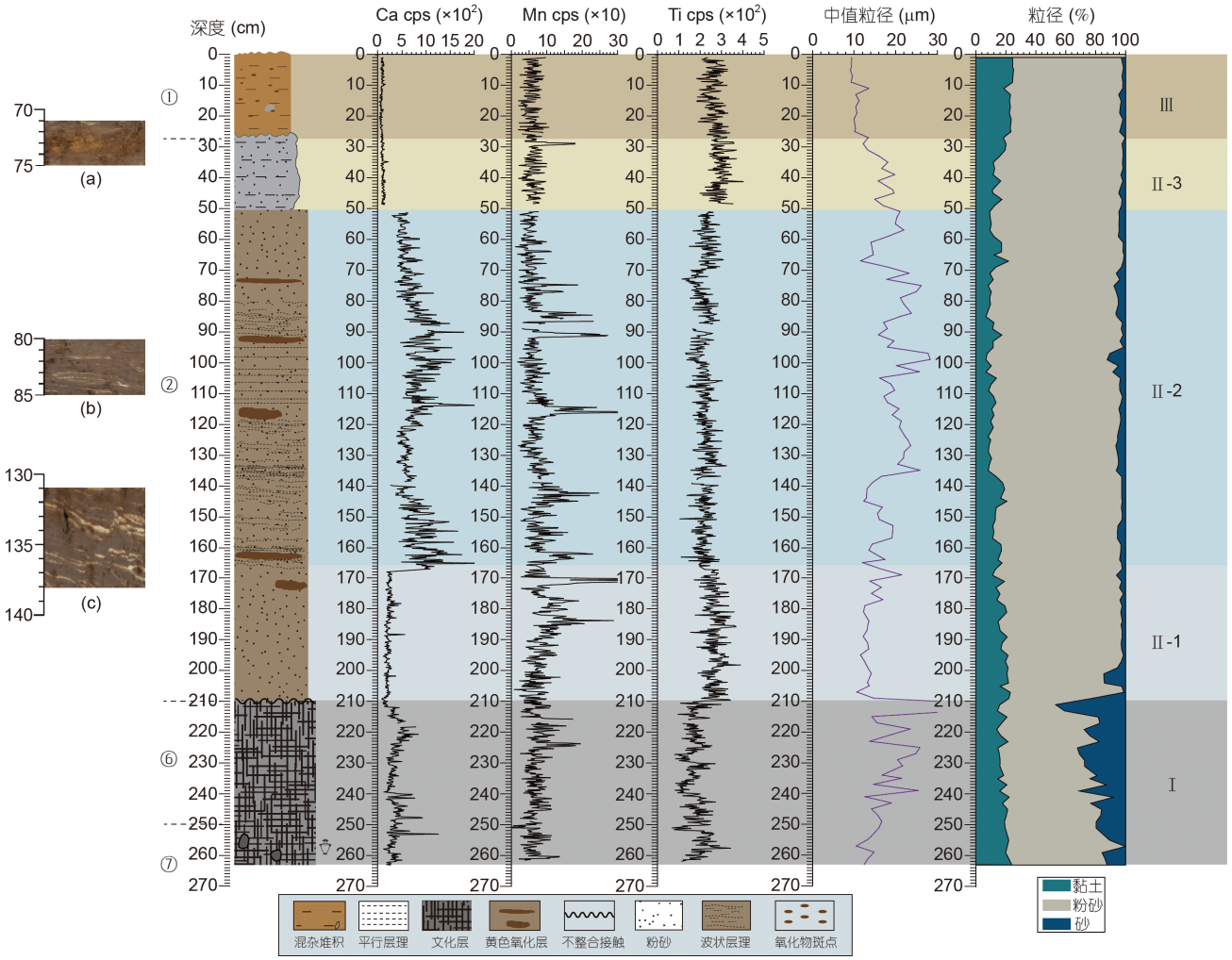


图 2 (网络版彩色)田螺山遗址T005W剖面综合柱状图, 包括典型岩性照片 ((a) 黄色铁锰结核; (b) 平行层理; (c) 波状层理)、岩性柱状图、元素强度曲线(Ca, Mn, Ti)、粒度组分

Figure 2 (Color online) General section of T005W profile in Tianluoshan Site, including typical lithology photos ((a) Yellow iron manganese nodules; (b) parallel layering; (c) wavy layering), lithology histogram, elemental strength curve (Ca, Mn, Ti), particle size components

约超过10%. 中值粒径约在15~20 μm. 因为层理发育程度不同, 该带分为3个亚带.

Ⅱ-1带: 211~166 cm, 棕灰色粉砂质黏土层: 局部见砂质团块, 非均质. 170~172 cm处可见黄色氧化层. 198~204 cm处有大块砾石和团状砂. 该带有相对较低的砂含量, 中值粒径值也较低.

Ⅱ-2带: 166~50 cm, 棕灰色黏土质粉砂与白灰色砂层互层: 孔隙度较高, 分选好. 平行层理发育(图2(b)). 其中50 cm处样品采集时为遗址馆内方便剖面工作修葺的平台面, 可能存在少量样品缺失. 72~74 cm, 89~92 cm两处为明显的黄色氧化层(图2(a)), 含有铁锰质结核. 98~108 cm处具有明显平行层理, 且向上变粗. 108~132 cm层理较发育, 有受强烈扰动的砂层, 砂层厚度为毫米级, <1 mm. 132~138 cm处, 有明显受扰动的砂层, 白灰色砂层厚约2 mm.

Ⅱ-3带: 50~28 cm, 青灰色黏土质粉砂: 含水量较高, 可见少量点状铁锰氧化物, 有较弱似水平层理, 发育垂直层面的黄色根系. 28~35 cm处为不整合沉积, 有扰动.

Ⅲ带: 28~0 cm, 混杂的棕色黏土、粉砂、砂和砾石混杂堆积, 含水量较低, 含较多铁锰氧化物斑点, 顶部有少量现代垃圾. 受现代人类耕作的影响.

3.2 AMS^{14}C测年结果

本文选取7个样品完成年代测试, 得到表1中的测年数据.

结果显示, T005W中Ⅱ带3个植物残体的年龄为4120~4140, 4088~4188和4370~4390 cal a BP, T006-007W中相邻层位的2个植物残体的年龄为4080~4240和4065~4181 cal a BP. 综合测年结果及沉积相, Ⅱ带年龄约为4000~4200 cal a BP, 且堆积较厚达180 cm. Ⅰ带包括文化层第⑥和⑦层, 2个炭化木头年龄为6975~7165和6580~6640 cal a BP, 存在倒置现象, 由于Ⅰ带为文化层, 可能存在混杂堆积. 考古资料记载这两层的年龄约为7.0~6.6 cal ka BP[26], 本次获得的两个测年结果, 也在这个范围内. 此外李明霖等人[19]研究剖面记录的⑥层年代为6591±53 cal ka BP, 与本研究的年代相近. 因此认为这两个年龄是可用的, 相当于河姆渡文化第一期和第二期.

3.3 地球化学元素分析结果

本次XRF扫描实验共获得Ca, Si, Al, Fe, P, K, Ti等21种元素的相对含量. 现仅展示Ca, Mn, Ti元素, 并结合岩性的变化对元素结果进行分析(图2).

Ⅰ带(263~211 cm), Ca强度整体较低, 在240~225 cm段有缓慢上升的趋势, 但变化较不明显. Ti元素强度较低, 且有明显波动.

亚带Ⅱ-1(211~166 cm), 具有较低水平的Ca强度, 且无明显变化, 变化趋势较稳定. Ti元素较Ⅰ带略高, 并无明显波动, 变化趋势较稳定. 亚带Ⅱ-2(166~50 cm), 该带具有较高水平的Ca强度, 由于Ⅱ-2底部样品有部分缺失, 亚带Ⅱ-1顶部与亚带Ⅱ-2底部的Ca强度表现为快速增加. Mn元素在整个剖面中变化趋势并不明显, 但在该带中的个别层位有所增加, 且与岩性中的黄色氧化层部位(图2(a))相吻合. Ti元素含量较亚带Ⅱ-1略低, 且略高于Ⅰ带, 除70 cm处有细微波动外, 整体无明显变化. 亚带Ⅱ-3(50~28 cm), Ca元素强度极低, 且无明显变化趋势. 其中亚带Ⅱ-3底部和亚带Ⅱ-2顶部采样过程中存在部分地层样品的缺失.

Ⅲ带(28~0 cm), Ca元素强度在整个剖面中呈最低

表 1 浙江余姚田螺山遗址T005W的AMS^{14}C年龄数据[a)]

Table 1 Results of AMS^{14}C dating in T005W at Tianluoshan Site of Yuyao, Zhejiang Province

剖面	实验室编号Beta-	样品编号	深度(cm)/层位	测年材料	^{14}C年龄(a BP)	校正年龄(Cal a BP)
T005W	460891	154	126/②层	植物残体(杆)	3830±30	4370~4390
	461028	189	161/②层	植物残体(杆)	3710±30	4110~4150
	464958	191	163/②层	植物残体(杆)	3800±30	4088~4288
T006-007W	464960	182	-/②层底	植物残体(种子)	3770±30	4088~4240
	464961	190	-/②层底	植物残体(种子)	3750±30	4065~4181
T005W	460892	250	222/⑥层	木头	6170±30	6795~7165
	460893	276	248/⑦层	木头	5730±30	6580~6640

a) BP为距1950年的^{14}C年龄, ^{14}C年龄计算所用半衰期为5568年(美国Beta实验室), -: 代表样品没有深度数据

水平, 且变化平稳. Mn, Ti元素强度较亚带Ⅱ-3并无明显变化.

3.4 硅藻分析结果

硅藻鉴定结果表明, 12个硅藻样品中, 10个样品中的硅藻浓度可达到统计要求, 但保存情况较差, 存在溶蚀现象(例如, 图3(d)中该种边缘不可见). 此外43 cm处仅鉴定硅藻22个, 63 cm样品几乎无可鉴定的硅藻, 偶见碎片, 因而图4中仅放入43 cm的样品统计结果供参考, 63 cm处硅藻百分含量数据缺失. 该剖面样品中硅藻属种中, 海洋种主要包括沿岸种*Coscinodiscus radiatus* Ehrenberg, *Actionptychus undulatus*(Bailey)Ralfs, *Trybliopty chus cocconeiforms* Hendy; 半咸水种主要包括*Cyclotella striata* var. *striata* (Kuetz.) Grunow, *Coscinodiscus blandus* A. Schmidt, *Nitzschia granulata* Grunow, *Diploneis smithii* var. *dilatata* (Peragallo) Terry: 淡水种主要包括*Amphora montana* Krasske, *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) W. Smith, *Gomphonema insigne* Gregory, *Pinnularia* spp. 其中*H. amphioxys*, *A. montana* 为需氧气生种, 生长在好氧潮湿表土中[31], 或出现在海拔较低的沼泽和潮泥滩中[32]. *Aulacoseira granulate* (Ehrenberg) Simonsenh和*Cyclotella badanica* var. aff *lemarvica*(O. Müller ex Schröter)为浮游种, 其余为底栖附生种. 一些主要硅藻属种的照片见图3.

通过分析硅藻组合的变化特征和聚类分析, 自下而上可分为3个带, 与地层的岩性划分基本一致(图4).

D1 (263~200 cm): 淡水种*H. amphioxys*为主要的优势种(约占80%), 淡水种主要包括*A. montana*, *H. amphioxys*, *Nitzschia scalaris* (Ehrenberg) W. Smith, 其中*H. amphioxys*是淡水气生种, 还有大量的*Hantzschia*属碎片. 海水或者半咸水种少见, 仅在203 cm处出现, 约占5%, 以*C. striata* var. *striata*, *A. undulatus*为主.

D2(200~50 cm)硅藻发生明显变化, 表现为D1带的淡水种含量急剧下降, 优势种转变为咸水和半咸水种. 其中半咸水种类的硅藻含量较高(约占70%), 种类丰富, 主要的半咸水浮游种类有*C. striata* var. *striata*, *Cyclotella stylorum* Hustedt. 半咸水附生植物种类有*D. smithii* var. *dilatata*, *N. granulate*(生活于海水泥质滩涂). 咸水种含量次之, 约占25%. 最主要的咸水浮游种为*A. undulates*, *Actioncyclus splendens* (Skadbolt)Ralfs, *C. radiatus*等, 主要的咸水附生植物种为*Melosira sulcata* var. *sulcata*(Ehr.)Kütz, *Trybliopty chus cocconeiforms* Hendy. 淡水种类硅藻含量较少(约占5%), 仅有少量的浮游种类*A. granulate*, 需氧气生种类*H. amphioxys*, 以及少量附生植物属*Pinnularia* spp. 该带60~50 cm处硅藻浓度急剧减少, 偶见硅藻碎片, 碎片以*Coscinodiscus*属为主.

D3(50~0 cm)该带在50~40 cm处硅藻含量同D2带顶部, 含量稀少, 完整硅藻个数极少, 多为碎片, 其中有少量咸水硅藻碎片(*Coscinodiscus*属). 其余层位硅藻浓

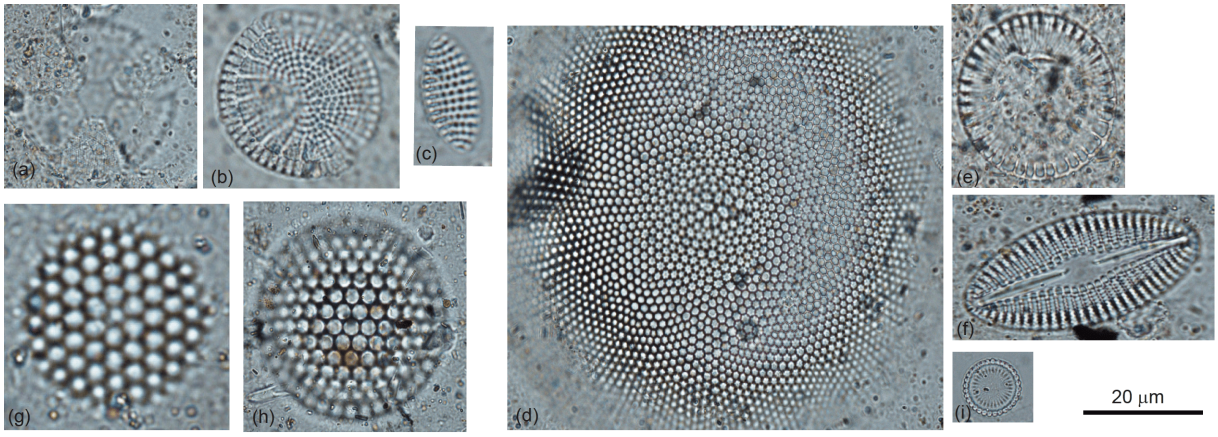
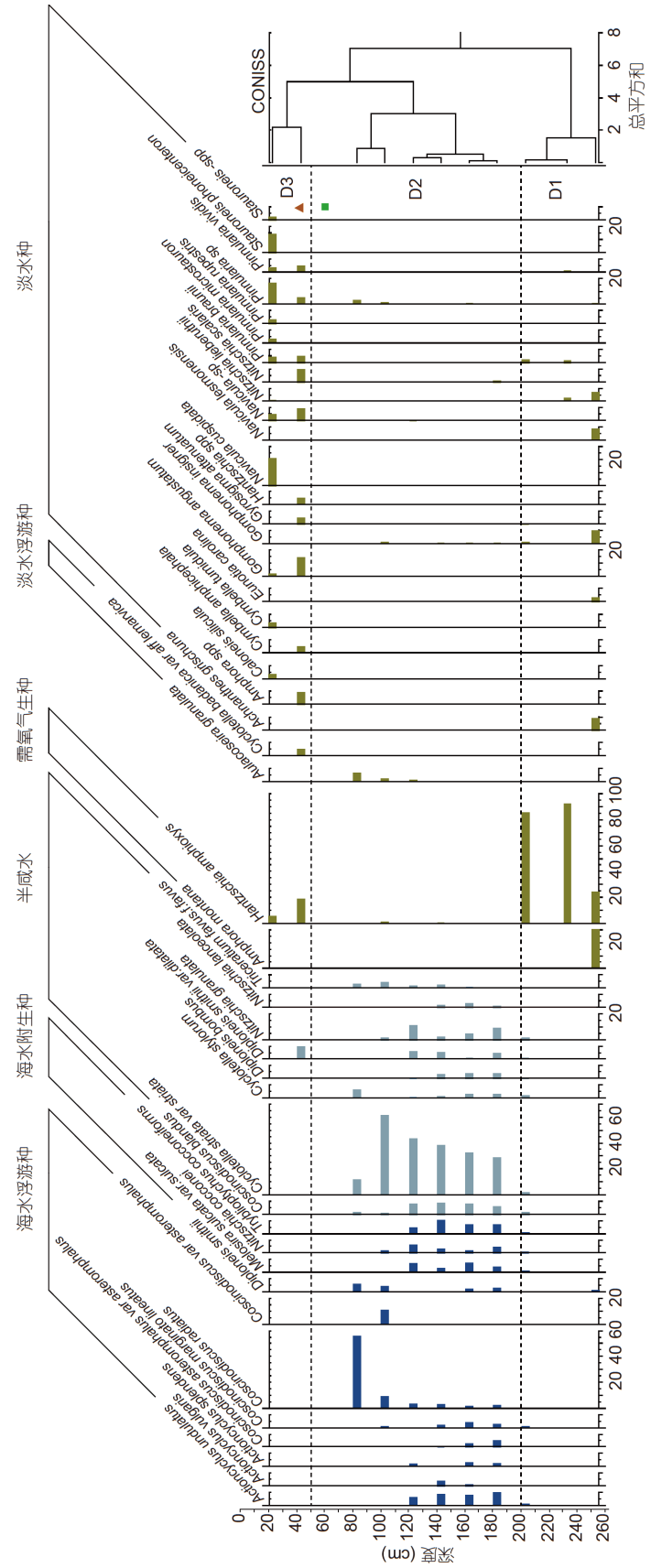


图 3 (网络版彩色)田螺山遗址T005W剖面中主要硅藻属种光学显微镜下照片. (a) *Actinoptychus undulatus*; (b) *Trybliopty chus cocconeiformisv*; (c) *Nitzschia granulata*; (d) *Coscinodiscus asteromphalus var. asteromphalus*; (e) *Cyclotella stylorum*; (f) *Diploneis smithii var. dilatata*; (g) *Coscinodiscus blandus*; (h) *Coscinodiscus marginatolineatus*; (i) *Melosira sulcata var. sulcata*

Figure 3 (Color online) Photomicrograph of the main diatom species in the T005W fossils of the Tianluoshan Site. (a) *Actinoptychus undulatus*; (b) *Trybliopty chus cocconeiformis*; (c) *Nitzschia granulata*, (d) *Coscinodiscus asteromphalus* var. *asteromphalus*; (e) *Cyclotella stylorum*; (f) *Diploneis smithii* var. *dilatata*, (g) *Coscinodiscus blandus*; (h) *Coscinodiscus marginatolineatus*; (i) *Melosira sulcata* var. *sulcata*


海水浮游种
海水附生种
半咸水
需氧气生种
淡水浮游种
淡水种
Actinocyclus undulatus
Actinocyclus vulgaris
Coscinodiscus subsalsus
Coscinodiscus asteromphalus
Coscinodiscus marginatus
Coscinodiscus lineatus
Coscinodiscus radiatus
Coscinodiscus asteromphalus var asteromphalus
Diploneis smithii
Mastogloia smithii var lanceolata
Mastogloia sulcata var sulcata
Trigonopyxidia concentrica
Cocconeis scutellum
Cocconeis coronata
Cocconeis heteroidea
Cocconeis placentula
Cocconeis placentula var euglypta
Cocconeis placentula var lineata
Cocconeis placentula var pseudolineata
Cocconeis placentula var placentula
Cocconeis placentula var klinoraphis
Cocconeis placentula var lineata
Cocconeis placentula var pseudolineata
Cocconeis placentula var euglypta
Cocconeis placentula var placentula
Cocconeis placentula var klinoraphis
Cocconeis scutellum var scutellum
Cocconeis scutellum var parva

度高, 种类丰富, 以淡水附生植物种类居多(约占75%), 主要包括*Pinnularia vividis* (Nitzsch) Ehrenberg, *Navicula cuspidate* Kützing(附植物种), 以及需氧气生种*H. amphioxys*. 此外, 还有少量半咸水附生植物种类*D. smithii* var. *dilatata*.

4 分析与讨论

4.1 T005W剖面反映的沉积环境变化

XRF扫描获得的元素中, 本文主要分析指示意义明确的Ca, Ti, Mn的变化. 三角洲地区XRF扫描获得的Ca和Ti的元素强度, 具有较高的可靠性[25], 因此可用于分析环境演变过程. Ca元素有生物成因和碎屑成因两种主要来源, 在海洋沉积物中生物来源的Ca占主要优势, 主要来自有孔虫、颗石藻等海相或半咸水微体生物化石[33]. 因此, Ca在一定程度上可以作为海洋环境的一个代用指标, 用来指示海水的影响[34]. 在T005W剖面的结果中可发现Ca元素强度变化与咸水和半咸水硅藻的含量同向变化, 与淡水硅藻含量变化趋势相反(图5), 因此认为在本研究中Ca可以作为指示海相性的指标. Ti是较为稳定的造岩常量元素, 一般不形成可溶性化合物[35], 其在海水中含量很低, 在沉积物中的含量变化和粗颗粒陆源碎屑组分含量变化一致, 因而Ti可以用于指示陆源物质的输入. Mn元素是一种微量元素, 在地壳中含量丰富, 在氧化环境中极容易富集[33]. 在T005W剖面中, Mn的峰值与岩性中的黄色氧化层具有较好的一致性(图2(a)), 指示了地层的暴露氧化. 根据以上3种元素变化, 结合岩性地层、硅藻和粒度指标分析T005W剖面反映了3个阶段的沉积环境.

第一阶段(7.0~6.5 cal ka BP), 黏土、粉砂和砂混杂堆积且砂含量较高, 可见石块及陶片. Ca元素的强度较低, 但略高于亚带Ⅱ-1带. 而硅藻组合以淡水硅藻为主(占95%以上), 优势种为需氧气生种*H. amphioxys*. 咸水及半咸水硅藻含量较低(图4), Ti强度变化稳定且处于较低值, Mn元素在个别层位强度增加(图2), 说明当时的环境为淡水沼泽沉积环境, 但是经常暴露地表. 该带对应考古文化层⑥和⑦层, 受当时古人类活动的影响较大, 考古发掘报告中记载遗址中第二期文化发掘出大量鱼骨和骨器[26], 因此推断可能由于古人类丢弃的贝壳或鱼骨类残留物(主要由$CaCO_3$组成)造成该带的Ca强度较高.

第二阶段(约4.2~4.0 cal ka BP)整体为棕灰色的黏土与白色粉砂互层堆积, 黏土、粉砂、砂含量变化相对稳定. 由于缺少测年样品, 该剖面顶部50~28 cm无准确年代, 但该段在岩性上也表现为大量层理, 与下部岩性一致, 因此推断为4.2~4.0 cal ka BP同一时期的沉积.

Ⅱ-1带上部硅藻属种由淡水种向咸水和半咸水种快速转变, 而Ca强度则表现为低值(图5). 硅藻由于个体小, 较容易被远距离搬运, 咸水和半咸水硅藻可能为搬运沉积[36]. 而有孔虫等较少发生远源搬运, 这可能是造成Ca在此时表现为低值, 与咸水硅藻含量变化不一致的原因. 该带Ti元素含量增加, 表明此时陆源输入增加, 可能为淡水洪水造成的水体冲刷, 使得陆源物质增加.

Ⅱ-2带在该剖面的沉积厚度可达100 cm, Ca元素强度高是该带最显著的特征, 该带岩性特征为棕灰色黏土质粉砂与白灰色砂层互层的平行层理(图2(b)和(c)), 其中白灰色粉砂粒度较粗, 多为条状带, 棕灰色黏土质粉砂较细, 其中多夹杂富含有机质的灰黑色点状或团状黏土以及植物残体. 平行层理通常是强洪水过后流速近为零的静水上涨状态下的沉积表现. 该带的岩性特征可能是代表了强洪水后期比较稳定时期的洪泛沉积, 白灰色粉砂与棕灰色黏土质粉砂的交替频繁出现, 代表着洪水的多发性[37]. 硅藻组合特征显示, 该带硅藻种含量丰富, 主要优势种为半咸水种*C. striata* var. *striata*. *C. striata* var. *striata*为广布性种, 属于沿岸浮游种和附着生活, 常见于半咸水河口地带[29]. 淡水硅藻含量较低, 仅占3%~10%, 推测此时环境可能为较稳定的咸水或半咸水沉积环境. 结合该带沉积相特征, 推测当时可能有风暴潮带来的咸水水体的后期稳定阶段. 该带多处有黄色铁锰结核(图2(a)), 根据岩性特征并结合Mn元素变化趋势, 推测可能是洪水过后沉积物的短暂暴露而被氧化的结果. 83 cm处咸水浮游种*C. radiatus*百分含量快速增加, 半咸水种*C. striata* var. *striata*减少, 指示了水体加深、盐度增加的环境[38,39], 且浮游种*A. granulata*由下到上逐渐增加, 该种通常生活在受扰动的水体中, 指示较强的水动力条件[40]. 因而, 推测此时水体盐度上升, 水动力变强, 可能再次发生风暴潮, 带来搬运沉积. 由于此处无年龄数据, 在本研究中不深入讨论. 其中Ⅱ-2带顶部63 cm处硅藻缺失, 且此段Ca强度呈下降趋势, Ti元素强度有所增加, 在沉积相上表现为较多的黑色斑点, 推测可能此时发生陆地淡水洪水, 陆源物质输入增加, 可能为快速沉积的过程, 因而不利于硅藻的保存.

Ⅱ-3带为青灰色的黏土质粉砂层, 有疑似水平层

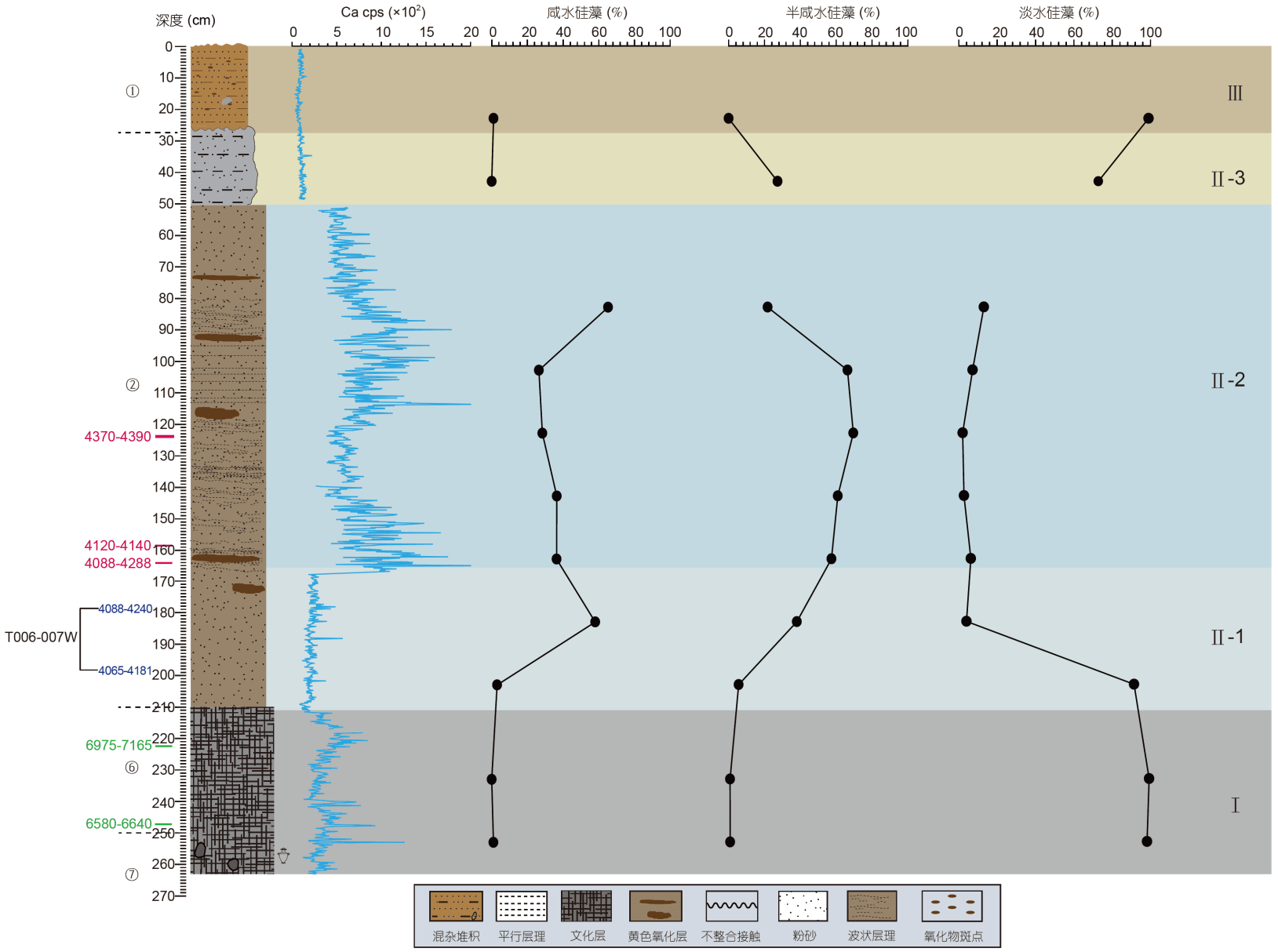


图 5 (网络版彩色)田螺山遗址T005W剖面岩性、Ca元素强度及淡水、海水和半咸水硅藻百分含量对比

Figure 5 (Color online) Comparison of lithology, Ca element intensity and percentage of freshwater, seawater and brackish water diatoms in T005W section of Tianluoshan Site

理, 但Ca元素强度却处于相对较低的水平, 且硅藻组合特征在该带表现为淡水附生硅藻种类丰富, 为优势属种, 同时伴生气生种, 仅有少量的半咸水类硅藻, 说明此时海水对该地的影响减弱, 水体变浅, 逐渐淡化, 为受淡水影响的沼泽湿地环境.

第三阶段(28~0 cm), 硅藻组合主要为淡水附生种, 咸水、半咸水硅藻含量极少. Ca元素强度低, Ti元素强度略高, 中值粒径值最低, 黏土含量相对较高, 推测为现代水稻田环境.

4.2 4.2 cal ka BP左右的咸水-半咸水环境

大量研究表明, 4.0 cal ka BP前后是史前洪水频发的时期[9,37]. 张强等人[41]通过调查实验证明, 6.0~4.0 cal ka BP在长江三角洲地区是一个小的洪水频发期. 朱诚等人[18]的研究认为河姆渡文化的消失可能与5.0~4.0 cal ka BP前后的特大洪水有关. 周宗尧等人[16]认为河姆渡第一期与第二期文化间断或废弃的原因不能简单地认为是海侵作用的结果, 该区域极易遭受海啸或风暴潮的袭击.

我们的研究结果表明4.2~4.0 cal ka BP左右, Ca元素强度与咸水和半咸水硅藻表现出一致的变化(图5). Ca元素强度在该带表现为水平明显较高, 硅藻组合由淡水气生种为优势种的组合转变成主要为咸水-半咸水种类的组合, 指示了该带的沉积环境为半咸水-咸水环境, 受海水作用明显, 与郑云飞等人[17]的研究结果相对一致. Lambeck等人[14]的研究表明全球海平面在约7 ka BP时, 已经接近于现今的高度(−3 ~ −5 m), 之后缓慢上升. 郑洪波等人[42]研究认为7.0 cal ka BP前后是全新世海平面变化与地貌演化的重要转折时期, 此后海平面上升速率大幅度降低, 宁绍平原成陆, 海面逐渐退出该区域. 因而, 4.0 cal ka BP左右的海平面已经退出田螺山遗址所在区域, 此时该地区可能受到极端环境事件带来海水影响的沉积, 并不是高海面的结果.

II-1阶段的多个年龄数据表明此时的沉积发生在4.2~4.0 cal ka BP左右, 在岩性地层上表现出较为稳定的粒度特征, 以粉砂和黏土为主, 含砂量较小, 表明该带沉积较为稳定. II-1底部的优势硅藻为湿地沼泽环境生长的淡水气生种*H. amphioxys*, 而非淡水河流硅藻属种, 推测此时沉积物中的硅藻可能主要来自雨水的冲刷. Ti在该阶段为增加, 也指示了陆源输入的增加. Li等人[43]通过对田螺山遗址馆外剖面孢粉的高分辨率研究发现, 4.4~4.0 cal ka BP期间该地区气候异常温暖, 降水量增加. 因此可以推测II-1底部为大量的降水冲刷沉积或者引发的淡水洪水, 在II-1顶部的半咸水和咸水硅藻增加, 为之后风暴潮带来了海水硅藻的搬运沉积. II-2带底部具波状层理, 代表是在水动力较强的环境下形成, 推断大量降水后洪水发生, 冲刷动力较强. II-2中顶部具大量平行层理, 表明该带沉积为洪水过后静水状态下的沉积[44,45]. 由于该区域地势低洼, 排水不畅. 2013年余姚地区受台风“菲特”影响, 暴雨、洪水共同作用下, 遭遇百年一遇的水灾, 7天后洪水才退去, 就是该地区水患的一个典型案例. II-2带多现黄色氧化层, 推测为多次暴露氧化的结果, 可能洪水频繁发生. 风暴潮沉积与内陆洪水的沉积岩性特征都表现为大量的黏土与粉砂互层[46], 与内陆洪水区别在于风暴潮引起的沿海洪水沉积会带有大量的咸水和半咸水种的硅藻[47], 与本研究中II-1和II-2带硅藻主要为咸水和半咸水属种相一致. 因此, 结合83 cm处出现咸水搬运硅藻及地层中多层氧化层, 推测T005W剖面4.2~4.0 cal ka BP左右厚达100 cm的沉积可能是受到风暴潮事件引起的多次事件性沉积.

4.3 剖面T005W文化层的环境背景

由于文化层样品的信息可能包含了沉积环境及人类活动的共同作用, 因此对于重建该时期的古气候环境不具有代表性, 但是能够为历史时期文化发展的环境背景提供重要的依据. 2004年田螺山遗址发掘简报[26]中以T103, T203, T303北壁剖面为例, 描述第⑥层文化层岩性为松散深灰色土, 夹杂较多的木炭颗粒和黑色灰烬. 第⑦层文化层为较湿软的褐色土, 并夹杂有大块陶片, 且出土了大量的木构建筑遗迹、动物的骨骼以及炭化的米粒. 这两层所代表7.0~6.5 cal ka BP的第一期和第二期文化是河姆渡文化最为兴盛的时期. 从T005W剖面来看, 该两层堆积较为混杂, 受人类活动影响较明显, 含有石块及陶片, 粒度中砂含量较其他层位明显较高; 具有海相性指示意义的Ca元素在该带相对于II-2阶段强度较低且变化甚微, 硅藻组合特征也显示该带淡水的需氧气生种*H. amphioxys*为优势种. 此时咸水和半咸水种类稀少, 所占比例小于5%, 推测该地的微地貌为淡水的湿地沼泽环境, 海水环境对遗址上先民的生活影响较小. 7 cal ka BP以来, 海面上升速率大幅下降[14], 宁绍平原由于河流沉积物供给丰富, 快速淤积, 成陆作用开始[42], 海岸线东撤, 为人类提供了适宜生活和生产的地貌条件. 李明霖等人[19]研究结果显示

田螺山遗址第⑦层古盐度为高值，说明受海水的影响，可能是人类活动影响使之与下伏地层的沉积物发生扰动混合，而第⑥层海水影响减弱. 值得注意的是，由于文化层的上覆地层②层与文化层之间岩性地层为不整合接触的沉积间断，而且上覆地层年龄为4.2~4.0 cal ka BP左右与文化层约6.5 cal ka BP的年代存在较大差异，说明该剖面文化层与上覆地层之间是不连续的沉积，不能用于探究田螺山遗址文化的衰落.

5 结论

田螺山遗址具有较完好的地下遗存，发育有多期文化遗存，本文针对T005W剖面，对于其文化层的沉积环境以及文化层上覆地层的古环境，通过地层岩性、AMS^{14}C测年、XRF元素扫描、硅藻、粒度等指标进行综合分析，结果显示第⑥和⑦层文化层(7.0~6.5 cal ka BP)可能为淡水沼泽沉积环境，此时海面已经退出该区域或该区域为山丘高地，田螺山遗址的先民适宜居住于此. 文化层上覆地层(第②层)与文化层之间是不整合接触，为约4.2~4.0 cal ka BP的快速沉积，可能受多次风暴潮引起的洪水的影响，带来大量海水，形成了咸水-半咸水特征的沉积. 由于受微地形的影响，遗址内不同剖面的地层沉积有所差异，因此对田螺山遗址的古环境研究还需要将来综合多个剖面以及遗址周围的钻孔和剖面进行系统的分析.

参考文献

1 Liu Z, Zhu J, Rosenthal Y, et al. The Holocene temperature conundrum. Proc Natl Acad Sci USA, 2014, 111: E3501–E3505

2 Lu F Z, Ma C M, Zhu C, et al. Variability of East Asian summer monsoon precipitation during the Holocene and possible forcing mechanisms. Clim Dyn, 2018, 1: 1–21

3 Wu S H, Yin Y P. Impacts of climate extremes on human systems (in Chinese). Adv Clim Changes Res, 2012, 8: 99–102 [吴绍洪, 尹云鹏. 极端事件对人类系统的影响. 气候变化研究进展, 2012, 8: 99–102]

4 Wanner H, Beer J, Bütikofer J, et al. Mid- to Late Holocene climate change: An overview. Quat Sci Rev, 2008, 27: 1791–1828

5 Marcott S A, Shakun J D, Clark P U, et al. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11300 years. Science, 2013, 339: 1198–1201

6 Zheng L J, Jiang Z, Yair R, et al. The Holocenen temperature conundrum. Proc Natl Acad Sci USA, 2014, 111: 3501–3505

7 Cobb K M, Westphal N, Sayani H R, et al. Highly variable El Niño-Southern oscillation throughout the holocene. Science, 2013, 339: 67–70

8 Wang S W. 4.2 ka BP event (in Chinese). Adv Clim Changs Res, 2010, 6: 75–76 [王绍武. 4.2 ka BP事件. 气候变化研究进展, 2010, 6: 75–76]

9 Zhang J N, Xia Z K. Deposition evidences of the 4 ka BP flood events in central China plains (in Chinese). Acta Geogr Sin, 2011, 66: 685–697 [张俊娜, 夏正楷. 中原地区4 ka BP前后异常洪水事件的沉积证据. 地理学报, 2011, 66: 685–697]

10 Shang Z W, Tian L Z, Fan C F, et al. A preliminary study of the 4.2 ka event along the coast of Bohai Bay (in Chinese). Geol Bull Chin, 2016, 35: 1614–1624 [商志文, 田立柱, 范昌福, 等. 渤海湾4.2 ka事件初步研究. 地质通报, 2016, 35: 1614–1621]

11 Liu Y H, Sun X, Guo C Q. Records of 4.2 ka BP Holocene event from China and its impact on ancient civilizations (in Chinese). Geol Sci Technol Infor, 2013, 32: 99–105 [刘浴辉, 孙霞, 郭彩青. 中国全新世4.2 ka BP气候事件及其对古文明的影响. 地质科技情报, 2013, 32: 99–105]

12 Wang Z, Ryves D B, Lei S, et al. Middle Holocene marine flooding and human response in the south Yangtze coastal plain, East China. Quat Sci Rev, 2018, 187: 80–93

13 He K, Lu H, Zheng Y, et al. Middle-Holocene sea-level fluctuations interrupted the developing Hemudu culture in the lower Yangtze River, China. Quat Sci Rev, 2018, 188: 90–103

14 Lambeck K, Rouby H, Purcell A, et al. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. Proc Natl Acad Sci USA, 2014, 111: 15296–15303

15 Wang S Y, Mo D W, Sun G P, et al. Environmental context of ancient human activity in Tianluoshan Site, Yuyao City, Zhejiang Province: Fossil evidence of phytolith and diatom (in Chinese). Quat Sci, 2010, 30: 326–334 [王淑云, 莫多闻, 孙国平, 等. 浙江余姚田螺山遗址古人类活动的环境背景分析——植硅体, 硅藻等化石证据. 第四纪研究, 2010, 30: 326–334]

16 Zhou Z Y, Yu G C, Dong X F, et al. New study of the reasona for the interruption of the earliest Hemudu culture (in Chinese). Geol Chin, 2012, 39: 550–558 [周宗尧, 余国春, 董学发, 等. 河姆渡早期文化发展间断原因新考. 中国地质, 2012. 39: 550–558]

17 Zheng Y F, Sun G P, Chen X G. Response of rice cultivation to flutuating sea level during the mid-Holocene (in Chinese). Chin Sci Bull, 2011, 56: 2888–2896 [郑云飞, 孙国平, 陈旭高. 全新世中期海平面波动对稻作生产的影响. 科学通报, 2011, 56: 2888–2896]

18 Zhu C, Zheng C G, Ma C M, et al. On the Holocene sea-level highstand along the Yangtze Delta and Ningshao Plain, East China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2003, 48: 2428–2438 [朱诚, 郑朝贵, 马春梅, 等. 对长江三角洲和宁绍平原一万年来高海面问题的新认识. 科学通报, 2003, 48: 2428–2438]

19 Li M L, Mo D W, Sun G P, et al. Paleosalinity in Tianluoshan Site and the relation between Hemudu culture and its environmental background (in Chinese). Acta Geogr Sin, 2009, 64: 807–815 [李明霖, 莫多闻, 孙国平, 等. 浙江田螺山遗址古盐度及其环境背景同河姆渡文化演化的关系. 地理学报, 2009, 64: 807–815]

20 Wen Z C, Sun G P, Xie L J, et al. The geochemical charateristics and significance of soil organic matter in the Tianluoshan Site of Hemudu cultural (in Chinese). Geochimica, 2014, 43: 166–173 [温证聪, 孙国平, 谢柳娟, 等. 河姆渡文化田螺山遗址古土壤有机质的地球化学特征及其意义. 地球化学, 2014, 43: 166–173]

21 Wu Y N, Li D L, Sha L B, et al. A diatom record of rapid sea-level rise during early to mid-Holocene in Baima Lake area, Zhejiang Province (in Chinese). Acta Palaeontol Sin, 2016, 55: 495–507 [吴燕妮, 李冬玲, 沙龙滨, 等. 浙江白马湖地区硅藻记录的早-中全新世海平面上升事件. 古生物学报, 2016, 55: 495–507]

22 Huang Y, Ran L H, Jiang H. Diatom from the south China sea during the lastest Pleistocene and their paleoenvironmental significance (in Chinese). Marine Geol Quat Geol, 2006, 26: 7–13 [黄玥, 冉莉华, 蒋辉. 南海北部陆坡晚更新世末期硅藻及其古环境意义. 海洋地质和第四纪地质, 2006, 26: 7–13]

23 Peterson L C. Rapid changes in the hydrologic cycle of the tropical Atlantic during the last glacial. Science, 2000, 290: 1947–1951

24 Arz H W, Pätzold J, Müller P J, et al. Influence of Northern Hemisphere climate and global sea level rise on the restricted Red Sea marine environment during termination I. Paleoceanography, 2003, 18: 1053–1066

25 Zhou R, Li Z, Song B, et al. Reliability analysis of X-ray fluorescence core-sanning in the Yangtze river delta limnetic sedimenta (in Chinese). Quat Sci, 2013, 33: 697–704 [周锐, 李珍, 宋兵, 等. 长江三角洲平原湖沼沉积物XRF岩芯扫描结果的可靠性分析. 第四纪研究, 2013, 33: 697–704]

26 Zhejiang Provincial Institute of Cultural Rclics and Archaeology, Yuyao Municipal Office of the Preservation of Cultural Relics, Hemudu Site Museum. Brief report of the excavation on a Neolithic Site at Tianluoshan Hill in Yuyao City, Zhejiang (in Chinese). Cultur Relics, 2007, 11: 5–24 [浙江省文物考古研究所, 余姚市文物保护管理所, 河姆渡遗址博物馆. 浙江余姚田螺山新石器时代遗址2004年发掘简报. 文物, 2007, 11: 5–24]

27 Qin J G. Palynological study of Ningshao Plain and paleoenvironmental significance since late Pleistocene (in Chinese). Doctor Dissertation. Shanghai: Tongji University, 2006 [覃军干. 宁绍平原晚更新世孢粉及古环境. 博士学位论文. 上海: 同济大学, 2006]

28 Krammer K, Lange-Bertalot L H. European Diatom Identification System (in Chinese). Guangdong: Zhongshan University Press, 2011 [Krammer K, Lange-Bertalot L H. 欧洲硅藻鉴定系统. 广州: 中山大学出版社, 2011]

29 Guo Y J, Qian S B. Flora Algarum Marimarum Sinicarum: Centricae (in Chinese). Beijing: Science Press, 2003 [郭玉洁, 钱树本. 中国海藻志: 中心纲. 北京: 科学出版社, 2003]

30 Jin D X, Cheng Z D, Liu S C. Chinese marine benthic diatoms (Volume II) (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 1992 [金德祥, 程兆第, 刘师成. 中国海洋底栖硅藻类(下卷). 北京: 海洋出版社, 1992]

31 Bathurst R R, Zori D, Byock J. Diatoms as bioindicators of site use: Locating turf structures from the Viking Age. J Archaeol Sci, 2010, 37: 2920–2928

32 Qin B, Zheng M, Chen X, et al. Diatom composition of epiphytic bryophytes on trees and ecological distribution in Wuhan City (in Chinese). Chin J Ecol, 2016, 11: 2983–2990 [秦波, 郑敏, 陈旭, 等. 武汉市树生苔藓硅藻组成及其生态分布. 生态学杂志, 2016, 11: 2983–2990]

33 Yao X Y. Application of XRF core scanning technology in Holocene sea level change reconstruction in Ningshao Plain (in Chinese). Master Dissertation. Nanjing: Nanjing Normal University, 2016 [姚鑫雅. XRF岩芯扫描技术在宁绍平原全新世海平面变化重建中的应用. 硕士学位论文. 南京: 南京师范大学, 2016]

34 van Rooij D, Blamart D, Richter T, et al. Quaternary sediment dynamics in the Belgica mound province, Porcupine Seabight: Ice-rafting events and contour current processes. Int J Earth Sci (Geol Rundsch), 2007, 96: 121–140

35 Zhang J R, Jia Y L, Shen H Y, et al. Element features in different grain size fraction of lacustrine sediment and their environmental implication: A case study of Huangqihai Lake (in Chinese). Acta Sedimentol Sin, 2001, 29: 381–387 [张静然, 贾玉连, 申洪源, 等. 湖泊沉积物不同粒级组分的元素含量特征及其环境指示意义——以内蒙古黄旗海为例. 沉积学报, 2001, 29: 381–387]

36 Hemphill-Haley E. Diatom evidence for earthquake-induced subsidence and tsunami 300 years ago in southern coastal Washington. Geol Soc Am Bull, 1995, 107: 367–368

37 Xia Z K, Yang X Y. Preliminary study on the flood events about 4 ka BP in north China (in Chinese). Quat Sci, 2003, 6: 667–674 [夏正楷, 杨晓燕. 我国北方4 ka BP 前后异常洪水事件的初步研究. 第四纪研究, 2003, 6: 667–674]

38 Liu S J, Li Q X, Tao J H. Ecological study of phytoplankton in Bohai Bay (in Chinese). Environ Sci Technol, 2007, 30: 4–7 [刘素娟, 李清雪, 陶建华. 渤海湾浮游植物的生态研究. 环境科学与技术, 2007, 30: 4–7]

39 Zhang J P. Late Holocene sedimentary diatoms in the coastal waters of central Fujian (in Chinese). Master Dissertation. Xiamen: Xiamen University, 2009 [张金鹏. 福建中部近岸海域晚全新世沉积硅藻研究. 硕士学位论文. 厦门: 厦门大学, 2009]

40 Bradbury J P. Diatom stratigraphy and human settlement in Minnestoa. Geol Soc Am Bull, 1975, 74: 71–74

41 Zhang Q, Jiang T, Shi Y F, et al. Relationship between climatic changes and the flooding occurrence since the Holocene in the Yangze river delta

region (in Chinese). Marine Geol Quat Geol, 2003, 23: 11−15 [张强, 姜彤, 施雅风, 等. 长江三角洲地区1万年以来洪水与气候变化的关系. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23: 11−15]

42 Zheng H B, Zhou Y S, Yang Q, et al. Spatial and temporal distribution of Neolithic sites in coastal China: Sea level changes, geomorphic evolution and human adaption. Sci China Earth Sci, 2017, 61: 123–133 [郑洪波, 周友胜, 杨青, 等. 中国东部滨海平原新石器遗址的时空分布格局——海平面变化控制下的地貌演化与人地关系. 中国科学: 地球科学, 2017, 48: 127−137]

43 Li C H, Li Y X, Zheng Y F, et al. A high-resolution pollen record from East China reveals large climate variability near the Northgrippian-Meghalayan boundary (around 4200 years ago) exerted societal influence. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2018, 512: 1−10

44 Li C A, Zhang Y F. Flood sedimental characteristic and its mark on the middle reaches of Yangtze River (in Chinese). Adv Water Sci, 2004, 4: 485−488 [李长安, 张玉芬. 长江中游洪水沉积特征与标志初步研究. 水科学进展, 2004, 4: 485−488]

45 Wu L, Fu P, Duan L M. Palaeofloods sedimentary characterristics of Qinhe River (in Chinese). Yellow River, 2010, 32: 43−45 [邬龙, 付鹏, 段利民. 沁河古洪水沉积特征. 人民黄河, 2010, 32: 43−45]

46 Bai C G. Study on the frequency of storm surge in the mid-global warm period of the central coast of Jiangsu Province (in Chinese). Master Dissertation. Nanjing: Nanjing Normal University, 2003 [柏春广. 江苏中部海岸全新世中期温暖期风暴潮频率的研究. 硕士学位论文. 南京: 南京师范大学, 2003]

47 Pisaric M F J, Thienpont J R, Kokelj S V, et al. Impacts of a recent storm surge on an Arctic delta ecosystem examined in the context of the last millennium. Proc Natl Acad Sci USA, 2011, 108: 8960–8965

Summary for “浙江田螺山遗址剖面记录的水文环境变化”

The changes of hydrological environment recorded in the section of Tianluoshan Site in Zhejiang Province

Xianrong Huang[1], Hongbo Zheng[2*], Zhujun Hu[1*], Qing Yang[2], Guoping Sun[3], Guangjiu Ling[1], Yousheng Zhou[1], Yue Cheng[1], Yeting Cao[1] & Ping Wang[1]

[1] *School of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nangjing 210023, China;*
[2] *Earth System Science Research Center, Yunnan University, Kunming 650500, China;*
[3] *Zhejiang Institute of Cultural Relics and Archaeology, Ningbo 310014, China*
* Corresponding authors, E-mail: zhenghb@ynu.edu.cn; huzhujun86@163.com

The Tianluoshan Site of Yuyao City in Zhejiang Province is a typical Neolithic site with a complete preservation of the Hemudu culture (ca. 7–5 ka). This culture is well-known for its important role in studies on early rice domestication. Studying samples from the Tianluoshan Site provides a good opportunity to understand regional paleoenvironmental changes and their impact on Neolithic settlement. In this study, 263 cm samples were obtained from the T005W profile in the Tianluoshan Site Museum. The profile samples were subjected to lithologic stratigraphic description, accelerated mass spectrometry (AMS)^{14}C dating, high-resolution X-ray fluorescence (XRF) spectrometry, elemental scanning (2 mm/sample), diatom (20 cm/sample) and particle size analysis (2 cm/sample). The paleoenvironmental changes reflected by this profile could be divided into three stages based on multi-proxy analysis. (1) In the first stage (263–211 cm, about 7.0–6.5 cal ka BP), or the first and second cultural periods of Hemudu, the cultural layer was stacked and mixed with high contents of sand, gravel, and pottery pieces, thereby showing obvious disturbance from human activities. The diatom assemblage was dominated by aerophilous species, such as *Hantzschia amphioxys*, which live in shallow swamp. These findings indicated that this period was dominated mainly by a freshwater swamp environment. The geomorphic condition provided Neolithic people with a suitable environment to colonize and develop rice cultivation. (2) In the second stage (211–28 cm, around 4.2–4.0 cal ka BP), the layer had a thickness of approximately 180 cm. However, five AMS ^{14}C dates from this stage were between ca. 4.2 and 4.0 cal ka BP, and the lithology of these overlying strata were inconsistent with the cultural layer underneath. As such, a hiatus existed between the two stages. The lithological feature of this stage mainly consisted of a parallel layer with a couplet of interbedded clay silt and white-gray sand layer, which represented deposition under hydrostatic conditions after flooding. This part also contained multiple yellow oxide layers, possibly indicating transient exposure. The intensity of Ca between 211 and 166 cm was low, but this value increased rapidly above 166 cm and stabilized at a higher level than that of the first period. The dominant diatom assemblage changed from a freshwater group (*H. amphioxys*) at the bottom of this part to a marine and brackish group (e.g., *Cyclotella striata* var. *striata* and *Actionptychus undulates*). In this period, the rapid deposition of flooding events likely occurred as initiated by heavy precipitation (211–166 cm), which was indicated by low Ca and freshwater aerophilous diatom assemblage. Afterward, multiple storm surges resulted in sedimentation (166–50 cm) with marine-brackish characteristics. (3) In the third stage (28–0 cm, no date), the layer was characterized by a mixture of brown clay, silt, sand, and gravel with low contents of water, iron, and manganese oxide spots. Ca was weak, and clay content was high. This period was mainly dominated by freshwater epiphytic diatom species, such as *Pinnularia vividis* and *Navicula cuspidate*, and affected by modern farming. This study revealed the background of the hydrological environment during the first and second cultural periods of the Tianluoshan Site and the flooding events around 4.2–4.0 cal ka BP, which were essential for the understanding of the environmental background of Neolithic people and the extreme regional events in the Tianluoshan Site. The stratigraphic deposits of different sections in the site varied because of the influence of microtopography. Therefore, studies on the paleoenvironment of the Tianluoshan Site should involve a systematic analysis of multiple sections and cores around this site.

Tianluoshan Site, flood, X-ray fluorescence, diatom

doi: 10.1360/N972018-01169