

## 宁绍平原东部新石器遗址地层碱土金属元素地球化学特征以及对海水入侵事件的指示

潘 昱,孙国平,雷 少,吴莹莹,王张华

Geochemical characteristics of alkaline earth metals in the sediments of Neolithic sites in the eastern Ningshao Plain and implications for the saltwater intrusion

PAN Yu, SUN Guoping, LEI Shao, WU Yingying, and WANG Zhanghua

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022112202

## 您可能感兴趣的其他文章

## Articles you may be interested in

## 长江与黄河黏土粒级沉积物地球化学特征及其物源指示意义

Geochemical characteristics of clay-sized sediments of the Yangtze and Yellow Rivers and their implications for provenance 海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(3): 109-118

## 日照市海岸带土壤和海底沉积物重金属分布与环境质量评价

Distribution of heavy metals in soils and surface sediments along Rizhao coast and environmental assessment 海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 59-68

## 浙中印支晚期伸展事件:NNE向带状分布A型碱性花岗岩的证据

Late Indosinian extensional event in Central Zhejiang Province:Evidence from the NNE-trending A-type alkaline granite belt 海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(4): 92-111

## 辽河口海岸带沉积物中<sup>137</sup>Cs的分布特征及来源

Distribution pattern and source of <sup>137</sup>Cs in the sediment cores from the Liao River Estuary 海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 91–99

## 西太平洋深海沉积物孔隙水稀土元素地球化学特征及意义

Rare earth element geochemistry characteristics and implications of pore-water from deep sea sediment in Western Pacific Ocean 海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(1): 75-86

## 南海琼东南海域沉积物的微量元素地球化学特征及其对天然气水合物的指示意义

TRACE ELEMENT GEOCHEMISTRY OF SEDIMENTS IN QIONGDONGNAN AREA, THE SOUTH CHINA SEA, AND ITS IMPLICATIONS FOR GAS HYDRATES

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(5): 70-81



关注微信公众号,获得更多资讯信息

潘昱,孙国平,雷少,等.宁绍平原东部新石器遗址地层碱土金属元素地球化学特征以及对海水入侵事件的指示 [J].海洋地质与第四纪地质,2023, 43(6): 169-180.

PAN Yu, SUN Guoping, LEI Shao, et al. Geochemical characteristics of alkaline earth metals in the sediments of Neolithic sites in the eastern Ningshao Plain and implications for the saltwater intrusion[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(6): 169-180.

## 宁绍平原东部新石器遗址地层碱土金属元素地球化学 特征以及对海水入侵事件的指示

潘昱1, 孙国平2, 雷少3, 吴莹莹1, 王张华1

1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241

2. 浙江省文物考古研究所, 杭州 310014

3. 宁波市文化遗产管理研究院, 宁波 315012

摘要: 宁绍平原东部地区孕育了丰富灿烂的新石器时代文化, 但目前发现的遗址地层中普遍存在着不同时期文化堆积中断现 象。选择井头山遗址和鱼山遗址两个剖面进行 AMS<sup>14</sup>C 测年、有机地球化学和碱土金属元素分析, 探讨稀醋酸提取的碱土金 属元素含量变化的特征和原因, 同时通过与研究区其他新石器遗址地层记录对比, 识别区域性的水文环境变化事件。研究结 果显示, 稀醋酸提取的碱土金属元素 Sr 和 Ca 含量对海岸带低地环境的海水入侵事件十分敏感, 是海陆过渡带有效的水文环 境代用指标; 而 Ba 含量的变化更加复杂, 在两个遗址的中全新世地层中普遍呈现为低值, 显示其不仅受水体盐度影响, 而且 与本地河流输入的泥沙量密切相关。通过区域性地层对比, 认为宁绍平原东部新石器时代中晚期存在 3 次大范围海水入侵事 件, 分别发生于大约 6300、5300 和 4500 cal. aBP, 主要由相对海平面上升或极端风暴事件造成, 是新石器遗址文化堆积中断的 主要原因。

关键词:海岸带低地; Sr; Ba; 水文环境; 河流输入; 极端风暴事件 中图分类号: P531 文献标识码: A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022112202

# Geochemical characteristics of alkaline earth metals in the sediments of Neolithic sites in the eastern Ningshao Plain and implications for the saltwater intrusion

PAN Yu<sup>1</sup>, SUN Guoping<sup>2</sup>, LEI Shao<sup>3</sup>, WU Yingying<sup>1</sup>, WANG Zhanghua<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China

2. Zhejiang Cultural Relics and Archaeology Institute, Hangzhou 310014, China

3. Ningbo Cultural Heritage Management Institute, Ningbo 315012, China

**Abstract:** The eastern Ningshao Plain has nurtured rich and splendid Neolithic cultures. However, interruption of the cultural accumulation in different periods has been found in many sites of the study area. To explore the characteristics of variation and mechanism in concentrations of alkaline earth metals extracted with diluted acetic acid (HAc) and to identify regional seawater intrusion events, two Neolithic sites - namely Jingtoushan and Yushan - were chosen for multiple laboratory analyses on AMS<sup>14</sup>C dating, organic geochemistry, and alkaline earth metals and the profiles were compared with stratigraphic records of other Neolithic sites in the study areas. Results show that the concentrations of alkaline earth metals Sr and Ca in the HAc leachates are sensitive to saltwater intrusion in coastal lowland, which were thus used as effective proxies for revealing the hydrological environment in the land-sea transition zone. However, change in Ba concentration was much more complex and Ba was generally lower in the mid-Holocene sediments, suggesting that Ba concentration was not only influenced by salinity but also by the amount of local riverine supply. In addition, three regional events of saltwater intrusion in the eastern Ningshao Plain at ca. 6300, 5300, and 4500 cal. aBP in the middle and late Neolithic Age were revealed, and we believe that they were linked to relative sea-level rise or extreme storm events and induced breaks in the accumulation of culture layers.

资助项目:浙江省重点研发计划"杭州湾沿岸文化遗存与全新世古地貌复原耦合及其三维可视化系统应用"(2022C03141)

作者简介: 潘昱(1998--), 女, 硕士研究生, 主要从事第四纪地质学研究, E-mail: 875588348@qq.com

通讯作者: 王张华(1973—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事河口海岸带古环境演变和新石器时代人地关系研究, E-mail: zhwang@geo. ecnu.edu.cn

Key words: coastal lowland; Sr; Ba; hydrological environment; riverine supply; extreme storm event

IPCC 最新报告指出全球气候变暖已成为事实, 且未来增暖幅度将继续变大,海平面加速上升,极 端天气事件的强度和频次也随之增加<sup>[1]</sup>。因此,全 球气候变暖背景下的海平面变化和极端风暴事件 一直受到研究者的广泛关注。海岸带是海洋和陆 地交互作用的关键地带,为人类社会提供了丰富的 自然资源和发展机会,但常常面临海平面上升带来 的风暴潮加剧、海水入侵等自然灾害<sup>[2]</sup>。

杭州湾南岸的宁绍平原东部地区是典型的海 岸低地,孕育了丰富的新石器文化,多个遗址存在 稻米遗存,是重要的稻作农业起源区<sup>[3]</sup>。前人研究 发现,该区域新石器遗址地层普遍存在文化层不连 续的现象,认为是由海侵或洪水等灾变事件导致<sup>[48]</sup>。 因此有必要对导致区域性文化层中断的灾变事件 进行梳理,并探明其发生的时间和范围。

前人研究认为,碱土金属元素 Sr、Ba、Ca 对海 陆过渡带沉积环境的盐度变化十分敏感,常用于定 性恢复古盐度<sup>[9-10]</sup>。Sr和Ba化学性质相似,但它们 的表生地球化学行为受沉积环境影响而存在差异, 尤其在陆海过渡环境,陆源碎屑物吸附的 Ba<sup>2+</sup>极易 与海水中的阳离子交换,从而被解吸<sup>[11]</sup>。水体中的 钡离子还易被土壤及胶体吸附和海洋藻类利用,生 成重晶石,沉积于陆地及滨海河口地区[12-13],使钡离 子无法向近海输送,因此,近海沉积中的 Ba 含量往 往明显低于淡水沉积。而 Sr 具有更强的迁移能力, 且易与Ca发生类质同象富集于生物壳体,在海洋 沉积中含量更高<sup>[14-16]</sup>。因此, Sr/Ba比值常被用作区 分海陆相沉积环境的地球化学指标[17-18]。前人研究 还表明,上述表生地球化学行为差异主要发生于碱 土金属元素的可交换态和碳酸盐态等非残渣态,因 此在使用该指标时,选择性提取碱土金属的可交换 态和碳酸盐态含量,才能更好地用于海陆相沉积环 境判别<sup>[14,19]</sup>。黄晶等<sup>[20]</sup>以及Huang等<sup>[21]</sup>用这些元素 的稀醋酸提取态,区分宁波平原表层沉积物的海陆 相端元值,并用于解释新石器遗址的古环境演变, 识别台风事件沉积。

本文利用从宁绍平原东部的井头山遗址和鱼 山遗址获取的两个地层剖面,结合沉积学、年代学 和元素地球化学等多种技术手段,同时对比其他遗 址的地层记录,揭示研究区新石器遗址地层中的碱 土金属元素地球化学特征,探讨其控制机制,并探 讨杭州湾沿岸新石器时代中晚期的区域性海水入 侵事件。

## 1 研究区域

宁绍平原东部地区(图1)地处杭州湾南翼,主 要由姚江河谷平原和宁波三江平原两部分组成。 姚江河谷平原西起余姚、东至宁波,南北夹于四明 山和慈南山之间,整体呈 NW-SE 走向;东西长 40 km, 南北宽 8 km, 平均海拔约 3 m。宁波三江平 原三面环山,东北面临海,总面积约850km²,海拔 一般低于 10 m, 是一个半封闭式海积平原<sup>[24]</sup>。该区 域属于亚热带季风气候区,雨热同期,年均气温约 16.3 ℃,7月和1月的均温分别为28.1 ℃和2.6 ℃; 年降水量约1250~1800 mm, 主要集中于 6—7 月的 梅雨期和7-9月的台风多发时段[23]。平原上河网 密布,湖泊众多,主要河流有姚江、奉化江和甬江等。 姚江和奉化江均发源于四明山区,在宁波市区三江 口汇成甬江后,呈WS-EN向注入杭州湾。由于河 流大多短小湍急,平原地势低洼,又受潮汐顶托,因 此在雨季和台风期间容易发生大面积水涝灾害。

自 20 世纪 70 年代以来,伴随着较多新石器时 代遗址的发现,宁绍平原逐渐建立起脉络清晰的史 前文化发展序列,成为我国新石器文化的一个重要 分布区。河姆渡文化和良渚文化为该地区典型的 史前文化类型,其中河姆渡文化(7000~5000 cal. aBP)根据出土的器物和年代测定分为4期;良渚文 化年代跨度为5000~4500 cal. aBP<sup>[26-27]</sup>。

井头山遗址(JTS, 30°01'35" N、121°21'49" E, 图 1)位于浙江省余姚市三七市镇三七市村,地处慈 南山麓和姚江河谷平原的交接地带,东距田螺山遗 址 2 km,南距河姆渡遗址 8 km<sup>[28]</sup>。遗址区地面海拔 约 2.5 m(85 高程),总面积 20000 m<sup>2</sup>;贝丘文化层埋 藏于现今地表以下 5~10 m,上覆深厚的海相淤积 层,浅部泥炭和黑色泥层中也见少量史前文化遗物<sup>[28]</sup>。 浙江省文物考古研究所等多个机构在完成围护遗 址发掘区的钢结构基坑建设后,于 2019 年对该遗址 进行了联合发掘。

鱼山遗址(YS, 30°02′N、121°33′E, 图1)位于 宁波三江平原北部、镇海区河头村的鱼山东南麓, 与现今海岸线直线距离约7.3 km, 是目前发现的距 离当今海岸线最近的河姆渡文化晚期遗址<sup>[29]</sup>。遗 址区地势北高南低, 地面平均海拔约2 m<sup>[30]</sup>。文化 层堆积形成于河姆渡文化、良渚文化、商周和唐宋 4 个时期, 总厚度约2.0~2.7 m<sup>[29]</sup>。



## 图 1 杭州湾沿岸地貌概况与采样点分布 JTS: 井头山(本研究), YS: 鱼山(本研究), TLS: 田螺山<sup>[6]</sup>, WGS: 乌龟山<sup>[22]</sup>, XWD: 下王渡<sup>[21]</sup>, ZL: 柘林<sup>[23]</sup>。 Fig.1 Geomorphology of lowlands along Hangzhou Bay and the sampling sites JTS: Jingtoushan (this study), YS: Yushan (this study), TLS: Tianluoshan<sup>[6]</sup>, WGS: Wuguishan<sup>[22]</sup>, XWD: Xiawangdu<sup>[21]</sup>, ZL: Zhelin<sup>[23]</sup>.

## 2 材料与方法

#### 2.1 研究材料

本研究于 2020 年 10 月对井头山遗址发掘区钢 结构围护基坑以上的浅部地层(埋深 9~290 cm;下 文均称为井头山剖面)进行采样,该采样剖面位于 发掘区南侧,共采集样品 20 个,采样间距 2~20 cm。 鱼山遗址的样品采自 2015 年 1 月,采样剖面 T0213S 位于探方 0213 的南壁,剖面深度 270 cm,本研究选 取 60~270 cm 的地层,共采集样品 42 个,采样间距 5 cm。T0213S 剖面的年代地层、孢粉和硅藻研究结 果见 He 等<sup>[30]</sup>。

## 2.2 研究方法

在井头山剖面选取2个炭屑和2个植物碎屑样品,在美国Beta公司进行加速器质谱法(AMS)<sup>14</sup>C测年。测试所得到的常规年龄采用Calib8.2软件的Intcal20数据库进行日历年龄校正,本文选择

的是 2σ 概率(>95%)、置信度大于 0.8 的年龄校正 区间,样品信息及结果见表 1。

对井头山剖面 20个样品和鱼山遗址 T0213S 剖 面 42个样品均进行有机地球化学和碱土金属元素 分析。所有预处理及分析测试均在华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室完成。

有机地球化学分析包括总碳(TC)、总氮(TN)、 总有机碳(TOC)和有机碳稳定同位素(δ<sup>13</sup>C)。样品 按照标准进行预处理,步骤如下:称取5g冻干后的 沉积物,将颗粒充分研磨至全部过200目筛后大致 分为2份。其中1份用于TC和TN的测试;另1份 样品加入20mL浓度为1mol/L的HCl并进行水浴 加热,使其充分反应去除碳酸盐,然后倒掉上层清 液并加入超纯水离心,重复这一过程直至上层清液 为中性,再将剩余样品倒入坩埚置于烘箱中烘干, 用于TOC和δ<sup>13</sup>C的测试。TC、TN、TOC含量的分 析仪器为德国 Elementar 公司生产的 Vario EL Ⅲ元 素分析仪,用地球化学标准参考样 GSD-9进行校 准,误差小于0.5%;δ<sup>13</sup>C分析采用 Delta plus XP 稳定 同位素质谱计,误差为0.1‰。C/N为TOC与TN

剖面	深度/cm	测年材料	<sup>14</sup> C年龄 /aBP	校正年龄/cal. aBP			<b>应</b> ] 人名法	举出中运
				$2\sigma$	置信水平	中值	- 头短至细亏	<b>奴</b> /店米源
井头山剖面JTS	23	富有机质泥	3960±30	4295~4520	1	4430	Beta-629 556	本研究
	95	植物碎屑	4660±30	5317~5465	1	5400	Beta-629557	
	143*	炭屑	6060±30	6835~6995	0.925	6915	Beta-629 558	
	185	植物碎屑	6020±30	6784-~6947	0.988	6860	Beta-629 559	
鱼山遗址T0213S	125~130	种子	4300±25	4830~4883	0.933	4855	BA151805	He等 <sup>[30]</sup>
	150~155	种子	4525±25	5051~5310	1	5155	BA151806	
	180~185	种子	4785±25	5476~5584	1	5 5 2 5	BA151807	
	215~220	种子	5495±25	6211~6390	1	6295	BA151808	
	230~235	种子	5665±25	6394~6499	0.984	6440	BA151809	
	245~250	种子	5860±25	6626~6745	0.985	6 6 9 0	BA151810	
	260~265	种子	6225±25	7011~7249	1	7105	BA151811	

表 1 井头山剖面、鱼山遗址 T0213S 的 AMS<sup>14</sup>C 测年数据及校正结果

Table 1 AMS<sup>14</sup>C ages and their calibrations of the profiles JTS and T0213S

注:\*代表年龄倒置,不参与年龄深度模型计算。

的质量比。

碱土金属元素采用醋酸提取法,以提取沉积成因的元素赋存形态,从而提高海陆相沉积环境判别的灵敏度<sup>[31]</sup>。首先,称取干燥并经研磨至全部过200目筛网后的样品 0.2000 g,置于离心管中,加入20 mL10%的醋酸溶液,多次摇匀振荡后离心;接着将上层清液倒入坩埚,并加热至仅剩极少量液体和壁上的橘红色固体;最后加入 20 mL5‰的稀硝酸溶液定容,并转移至干净的离心管,采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (Thermo ICAP 7400)测试 Sr、Ba、Ca含量,测试结果的相对标准偏差均在 2% 以下。

此外,我们还收集了前人在研究区多个新石器 遗址的 TOC 和 Sr、Ba 分析结果<sup>[21-22,32]</sup>,用于探讨碱 土金属元素含量的影响因素。

### 3 研究结果

#### 3.1 井头山剖面

该剖面主要为均质泥夹泥炭或泥炭质泥,94 cm 以下呈青灰色,以上变成灰色。泥炭和泥炭质泥出 现在 143~125、94~63 和 29~21 cm。在 185、143、 95 和 23 cm 获得 4 个 AMS<sup>14</sup>C 年龄(表 1),其中 143 cm 年龄倒置,因此用其余 3 个年龄通过 Clam 程序<sup>[33]</sup> 建立该剖面的年龄-深度模型(图 2a),下文用于界 定各阶段的年龄均出自该模型。 剖面的有机地球化学元素和碱土金属元素的 波动较为一致,根据它们的垂向变化,自下而上分 为4个阶段(图 3a)。

阶段 I(290~180 cm; > 6770 cal. aBP): TC (0.86%~1.09%)、TN(0.09%~0.11%)、TOC(0.51%~ 0.82%)含量低且波动极小, C/N 值在 5.2~8.4之间 波动,δ<sup>13</sup>C 值呈现向上增大趋势,平均值-24.45‰。 Ba、Sr和 Ca元素含量变化呈现先升高后下降的趋 势,其中 Sr和 Ca含量都处于剖面高值,平均值分别 为 18.26 mg/kg和 3.90 mg/g; Sr/Ba 值维持在较为稳 定的水平,平均值为 2.97。

阶段 II(180~68 cm; 6770~5040 cal. aBP): TC、TN、TOC 含量都显著增大并出现两次峰值,波动范围分别为 1.06%~22.17%、0.11%~0.99%和 1.08%~24.59%。C/N 值同步增大为 9.9~29.1,δ<sup>13</sup>C 值处于全剖面最低,范围为-28.33‰~-26.12‰。 Ba、Sr和 Ca元素含量都维持在低值,Sr在 155 cm (6370 cal. aBP)和 85 cm(5265 cal. aBP)有所增大, 三者均值分别为 2.27、8.59 和 1.09 mg/g; Sr/Ba 值较大,为 2.68~6.0。

阶段 III(68~25 cm; 5040~4460 cal. aBP): TC、 TN、TOC 含量较上阶段显著减小且较稳定,平均值 分别为 1.97%、0.13%、1.95%。C/N 值变化幅度小, 为 14.6~16.4,δ<sup>13</sup>C 值较低,平均值–26.73‰。Ba 含 量向上显著增大,波动范围为 2.63~11.46 mg/kg; Sr 和 Ca 含量较低,向上也略呈增大趋势,波动范围



图 2 井头山剖面(a) 与鱼山遗址 T0213S(b) 年龄深度模型 Fig.2 The age-depth model of profiles JTS(a) and T0213S(b)

分别为 8.48~12.29 mg/kg 和 0.79~1.24 mg/g。Sr/Ba 值向上呈下降趋势, 平均值为 2.4。

阶段 IV(25~9 cm; 4460~4250 cal. aBP): 底部 TC、TN、TOC 含量较高, C/N 也较明显增大,向上 快速降低,4个参数的变化范围分别为 0.82%~ 4.60%、0.08%~0.21%、0.72%~4.10%和 8.9~19.6。 δ<sup>13</sup>C 值较上阶段明显偏正,范围为-25.77‰~-24.54‰, 平均值增大至-25.10‰。Ba和 Sr 含量在底部陡然 增大后向上减小,但 Ba仍然是全剖面的高值,范围 分别为 19.42~25.95和 13.88~21.48 mg/kg; Ca 含量 较低,为 1.65~2.28 mg/g。Sr/Ba 值明显减小且维持 为剖面低值,平均 0.77。

#### 3.2 鱼山遗址 T0213S 剖面

该剖面 270~60 cm 为灰色、深灰色和蓝灰色均 质泥,其中 150~120 cm 为黑色泥炭。雷少等<sup>[29]</sup>根 据考古发掘揭示的岩性及出土器物,将该剖面共划 分 6 个地层(层 10~4,缺层 7),其中层 9 属于河姆 渡文化二期,层 6 属于河姆渡文化三期-良渚文化, 其余为自然淤积层。根据 He 等<sup>[30]</sup>的 7 个 AMS<sup>14</sup>C 测年结果,通过 Clam 程序建立剖面的年龄-深度模 型(图 2b),据此计算各地层的年龄范围。各地层单 元的有机化学和碱土金属元素特征如下(图 3b)。

层 10(270~250 cm; 7300~6760 cal. aBP): TC(0.94%~3.05%)、TN(0.11%~0.26%)、TOC (0.84%~2.97%)以及 C/N 值(7.9~11.6)均较低但呈 同步上升趋势,δ<sup>13</sup>C略高但向上明显减小,变化 范围为-27.98‰~-26.01‰。Ba含量较低,平均 3.66 mg/kg; Sr和 Ca含量较高,平均分别为 18.80 和 4.82 mg/g; Sr/Ba 范围为 4.3~6.6。

层 9(250~220 cm; 6760~6320 cal. aBP): TC、 TN、TOC 含量以及 C/N 值均明显增大,平均值分别 为 4.86%、0.34%、4.64% 和 13.1,δ<sup>13</sup>C 略有减小,范 围为-28.02‰~-26.90‰。Ba含量略有减小,平均 2.25 mg/kg; Sr 含量除底部样品较高以外,其余呈现 为剖面低值,平均为 16.16 mg/kg; Ca含量接近剖面 平均值且小幅波动,范围为 4.12~6.77 mg/g。Sr/Ba 变化范围较大,为 4.26~18.58。

层 8(220~180 cm; 6320~5500 cal. aBP): TC、 TN、TOC 含量以及 C/N 值均显著下降, 到顶部又明 显上升, 平均值分别为 1.32%、0.13%、1.17% 和 7.1。 δ<sup>13</sup>C 值明显增大, 向上又逐渐减小, 波动范围为 -28.45‰~-25.01‰。Ba 含量先增加后减少(7.15~ 18.42 mg/kg); Sr 含量为较稳定的高值, 平均 22.61 mg/kg; Ca 含量较低, 均值为 4.20 mg/g。Sr/Ba 值较小, 为 1.4~3.5。

层 6(180~120 cm; 5500~4570 cal. aBP): TC (1.9%~31.1%)、TN(0.14%~1.51%)、TOC(1.81%~29.75%)含量和 C/N(14.38~23.49)均呈现为剖面最高值,其中亚层 6a 高于亚层 6b。δ<sup>13</sup>C 值是剖面最低值,变化范围为-28.59‰~-26.56‰。Ba 含量较低,向上略有增加,变化范围为 0.79~4.04 mg/kg;



Fig.3 Stratigraphy and geochemical variation in profiles JTS (a) and T0213S (b)

Sr含量下部和顶部较低,但在170~165 cm(5400~5300 cal. aBP)出现一个较弱的峰值,在155~135 cm

(5200~4950 cal. aBP)出现显著峰值; Ca 的波动和 Sr 相似,两个元素的变化范围分别为 4.98~15.35 和

8.73~87.33 mg/kg。Sr/Ba 值呈现较大波动,平均值为15.8。

层 5 和层 4(120~60 cm; <4570 cal. aBP): TC、 TN 和 TOC 含量及 C/N 显著下降,变动范围分别为 0.44%~1.45%、0.08%~0.12%、0.36%~1.34% 和4.6~ 11.6,其中 TC 和 TOC 含量都达到剖面最低值。 δ<sup>13</sup>C 值明显增大且向上呈增大趋势,波动范围为 -26.53%~-24.82‰。Ba 含量自下往上不断增加 至剖面峰值 127.85 mg/kg; Sr 含量也处于较高水平, 平均值为 24.57 mg/kg; Ca 含量较低,但向上略有增 加,变化范围为 2.51~4.09 mg/g。Sr/Ba 值自下往上 明显下降至剖面最低值 0.2,平均值 0.9。

4 讨论

#### 4.1 醋酸提取态碱土金属元素含量变化的原因分析

鱼山遗址的自然淤积层(层 10、8、5 和 4; 阶段 I, III 和 V)都表现出 Sr 含量增加的特征(图 3b), 与 He 等<sup>[30]</sup>的硅藻分析结果即这几个地层以海洋属种 为优势种相吻合,说明 Sr 元素确实更富集于海洋沉 积物中。但是,整个剖面 Sr 的最高值出现在文化层 第6层的中部(155~135 cm; 5.2~4.95 cal. kaBP), 同步伴随 Ca 的异常高值, 该深度的 Sr 含量还显著 高于现代盐沼潮滩表层沉积物(39.9~43.8 mg/kg)<sup>[20]</sup>。 稀醋酸提取的 Sr 元素, 主要为离子交换态和碳酸盐 结合态[31]。离子交换态往往被有机质或黏土矿物 吸附,碳酸盐结合态则主要存在于海洋生物钙质壳 体或自生碳酸盐矿物中。通过多个遗址 Sr 含量与 TOC 的对比显示(图 4a),两者不存在简单的相关关系, 甚至在同为 TOC 高值的井头山剖面沉积物中, Sr含量也极低(图 3a),可见有机质含量对 Sr含量 几乎没有影响。由于第6层有机质含量极高而碎 屑矿物含量较低,即黏土矿物吸附的离子交换态含 量应该也比较低,因此推测 5.2~4.95 cal. kaBP 期间 的 Sr、Ca 高值主要由碳酸盐态即海洋生物壳体或 自生碳酸盐矿物贡献。然而,我们在该地层中未发 现贝壳及其碎屑,也没有检查到有孔虫壳体,因此 这两个元素可能主要赋存于自生碳酸盐矿物。对 照 He 等<sup>[30]</sup> 的硅藻研究结果, 第6层整体以半咸水 和淡水属种为优势种,但 5.2~4.95 cal. kaBP 期间半 咸水硅藻属种的相对含量明显增加(见He等<sup>10]</sup>的 图 5), 与本研究的 Sr 和 Ca 元素高值一致。由此可 推测,鱼山遗址地层中丰富的有机质,溶解了生物 钙质壳体,导致有孔虫结果的局限性<sup>[34]</sup>;而 Sr 和 Ca元素以自生碳酸盐矿物形态保留在地层中,能更可靠地反映海水入侵事件。

稀醋酸提取的 Ba 元素, 在井头山遗址包含文 化遗物的泥炭层(143~125 cm 和 94~63 cm)呈现 为明显的低值(图 3a);在鱼山遗址 T0213S 剖面,也 表现出海侵层(阶段Ⅲ和Ⅴ)高于文化层(阶段Ⅱ和 Ⅳ)的异常现象(图 3b)。因此,推测有以下 3 个方 面的原因。首先,前人研究显示, Ba离子在低盐环 境(1‰~2‰)就能发生显著的解吸附作用[11,35]。 Wang 等<sup>[31]</sup> 的实验也显示, 在低于 5‰的盐度环境 里, 沉积物中 Ba 的含量会随着盐度的增加迅速降 低,当盐度超过5%时,Ba含量几乎不再随盐度变 化而变化。He 等<sup>[30]</sup>的研究显示, 鱼山遗址 T0213S 剖面的文化层均存在半咸水属种的硅藻。可见研 究区的新石器文化层,多形成于滨海低盐沼泽环 境。其次, Ba含量的低值说明了研究区新石器时代 的地层主要由潮流所携带的泥沙沉积而成,即涨潮 流将长江口南下的悬沙或近海沉积物再悬浮输入 古宁波湾199,这样的海域来沙已经经过河口的解吸 附作用,因此具有较低的 Ba 含量。两个剖面顶部 (井头山遗址阶段 IV, 鱼山遗址阶段 V)Ba 含量都 明显增高,反映古宁波湾成陆后,本地河流泥沙或 坡积物的贡献明显增多。第三, TOC 含量对 Ba 含 量的影响。多个遗址 Ba 含量和 TOC 的相关分析显 示 (图 4b),在 TOC 含量较低的时候, Ba 含量随 TOC 增加而增大,可能反映有机质对 Ba 离子的吸 附作用;但是在 TOC 较高的时候,反而随 TOC 增加 而减小(图 4b)。由于 Ba 离子主要来自陆源碎屑矿 物的风化,在有机质含量丰富的地层里,陆源碎屑 矿物的含量较低,因此单位质量沉积物的 Ba 含量必然明显下降。

综合以上分析可以总结,在海陆过渡环境,低 盐水的入侵即可导致碱土金属元素醋酸提取态含 量的显著波动,不过,其含量与海水入侵的强度并 不是简单的线性关系。前人提出用 Sr/Ba 比值区分 海陆相环境<sup>[17-18]</sup>。然而,本研究显示,在 TOC 含量 异常高的地层,Ba 含量下降可导致 Sr/Ba 比值呈现 显著高值(图 3),因此必须考虑地层岩性变化对该 指标的影响。

## 4.2 宁绍平原东部地区新石器时代中晚期海水入 侵事件

根据上述碱土金属元素含量波动的原因分析、 以及两个剖面的元素地球化学研究结果,我们可以 推测剖面所在位置的水文环境变化。



乌龟山遗址及 ZK07 孔数据分别引自[21-22,32]

Fig.4 Bi-plots of Sr-TOC and Ba-TOC at Neolithic sites JTS, YS, XWD<sup>[21]</sup>, and WGS<sup>[22]</sup>, and core site ZK07 in the Liangzhu City <sup>[32]</sup>

Sr、Ca和TOC含量(图 3a)说明井头山剖面所 在的位置,直到大约 7 000 cal. aBP 海水影响才比较 明显地减弱,演变成为滨海湿地环境。Lyu等<sup>[37-38]</sup> 研究结果也显示,姚江谷地和宁波平原在全新世早





期一直为古海湾环境,尤其是在大约7600 cal.aBP 还存在一次海侵增强事件,与本研究井头山遗址阶 段 I 的 Sr、Ca 高值一致;他们的研究显示,直到大 约7000年前,古海湾才被较大面积地充填,成为滨 海平原,为河姆渡文化的兴起提供了适宜的水土资 源和环境。不过,井头山遗址和鱼山遗址两个剖面 的研究结果显示,7.0 cal. kaBP 以来,姚江河谷-宁波 平原仍然长期处于低盐环境。根据 Sr、Ba 和 Ca 含 量的变化,结合研究区其他遗址的地层记录,我们 认为宁绍平原东部区域河姆渡文化以来主要存在 3次大范围的海水入侵事件(图 5)。

第一次海水入侵事件开始于 6.4~6.3 cal. kaBP。 此时在井头山剖面, Sr 和 Ba 含量出现小幅度上升 后又较明显下降,因此 Sr/Ba 较明显增大(图 3a);在 鱼山遗址,河姆渡早期文化层(层 9)被海相地层 (层 8)叠压<sup>[30]</sup>,同时伴随 Sr 含量的上升(图 3b)。Wang 等<sup>[7]</sup>研究显示,该事件是相对海平面上升的结果, 影响范围广,在姚江河谷的田螺山遗址造成了古水 稻田的废弃<sup>[6]</sup>(图 5),甚至在研究区以西的浦阳江流 域楼家桥遗址也造成了文化层堆积的中断<sup>[39]</sup>。这 次相对海平面上升还伴随台风事件,例如杭州湾北 岸的柘林遗址此时有台风形成的贝壳砂沉积<sup>[23]</sup>, Huang 等<sup>[22]</sup>推测在杭州湾南岸的乌龟山遗址也有 大约 6 000 年前的台风沉积。但这次海侵事件的结 束时间,在各个遗址不一样,甚至在同一遗址的不 同探方也不一样,应该是和探方所在的地貌部位有 关<sup>[8]</sup>。例如,鱼山遗址位于低地平原的 T0213S 剖 面,该海侵事件结束于大约 5 600 cal. aBP(图 3b, 图 5),而位于山麓基岩风化壳上方的 T0410W 剖 面,则结束于大约 6000 年前<sup>[7-8]</sup>。

第二次海水入侵事件开始于约5.4~5.3 cal. kaBP, 结束于约4.9 cal. kaBP(图5)。此时井头山剖面Sr、 Ca含量略有上升, Ba含量略微下降(图3a);而鱼山 遗址T0213S剖面Sr和Ca含量大幅度上升(图3b), 同时伴随半咸水硅藻属种的增加<sup>[30]</sup>。在宁波平原 南部的下王渡遗址,自5315 cal. aBP发生多次低盐 水入侵、且保存大约 5145 cal. aBP 的台风事件沉 积<sup>[21,40]</sup>; 在姚江谷地的田螺山遗址, 5400~5305 cal. aBP 期间喜盐硅藻含量显著增多, 同时伴随水稻产 量下降<sup>[6]</sup>; 另外在杭州湾北岸的柘林遗址, 保存了大 约 5.2~4.9 cal. kaBP 期间由多次台风事件形成的贝 壳砂层<sup>[23]</sup>(图 5)。综合各遗址的地层记录, 推测该 阶段的海水入侵主要为台风频发、风暴潮增水导致 海水倒灌所致。

第三次海水入侵事件开始于 4.5 cal. kaBP 前后 (图 5),持续时间较长。井头山剖面的 Sr 和 Ca 含 量在大约 4460 cal. aBP 显著增加(图 3a);鱼山遗址 T0213S 剖面良渚文化层上覆的自然淤积层(层 5 和 层 4)也表现为 Sr 含量明显增加(图 3b),并伴随海 洋硅藻的显著增多<sup>[30]</sup>。此次事件,鱼山遗址有极端 风暴形成的沙脊地貌,其地层记录还指示存在相对 海平面的加速上升<sup>[7]</sup>。下王渡遗址表现为 4575~ 4330 cal. aBP 期间沉积物变粗、Sr 含量显著增加, 良渚人用人工堆土加高地面<sup>[21]</sup>;田螺山古水稻田遗 址在大约 4485 cal. aBP 后为海相地层,海侵持续时 间长达数千年<sup>[6]</sup>。

综上所述, 宁绍平原东部区域在新石器时代中 晚期共有3次区域性海水入侵事件,第一次和第三 次均与相对海平面上升有关,第二次以低盐水入侵 为主, 推测与极端风暴事件较频繁有关。根据前人 多项研究结果,我们推测引发第三次事件的相对海 平面上升与全球气候变化有关。研究显示,4.7~ 4.5 cal. kaBP 太阳辐射强度达到峰值<sup>[41]</sup>;格陵兰岛自 大约 4.5 cal. kaBP 开始出现人类定居<sup>[42]</sup>,反映此时 较暖的气候和冰盖的融化;东南极冰盖接地线于 4.3 cal. kaBP 发生后退<sup>[43]</sup>,也反映冰盖的显著融化。 因此,此阶段全球气候变暖导致全球多地相对海平 面上升。例如澳大利亚西南部的海岸带沼泽地记 录了 4.5~4.2 cal. kaBP 期间的相对高海面<sup>[44]</sup>。相对 海平面的上升还导致杭州湾沿岸地区频繁的水涝 事件,并导致良渚古城的废弃、触发良渚文化的崩 溏<sup>[32]</sup>。

另外,在井头山剖面,三次海水入侵事件都伴随 TOC 增加、出现以 C<sub>3</sub>植物贡献为主的泥炭层 (图 3a),指示滨海低盐沼泽环境的形成;而在鱼山 遗址,第一次和第三次海侵事件都导致滨海盐沼退 变为潮间带环境<sup>[6,30]</sup>(图 3b)。我们推测这是由于井 头山遗址距离当时的海岸线较远,且姚江河谷平原 已经广泛成陆<sup>[37]</sup>,因此海水的影响较弱,以咸潮入 侵为主;而鱼山遗址靠近古海岸线,海水可直接淹 没。可见海岸带低地平原不同的古地理环境对海 侵事件的响应差异显著,因此在地质历史时期海侵 事件的识别中,多地点、多指标的对比都十分必要。

## 5 结论

(1)在海陆过渡环境, Sr 和 Ba 元素的稀醋酸提 取态对海水入侵十分敏感。Sr 含量的增加主要由 海侵事件贡献; Ba 的低值不但与海水的解吸作用以 及海域来沙有关, 而且受 TOC 含量的影响。

(2)井头山遗址所在的姚江河谷平原,直到大约 7000 cal. aBP才比较明显地脱离海水影响,成为滨 海微咸水湿地环境。

(3)新石器时代中晚期,研究区发生3次大范围 海水入侵事件,分别开始于6.4~6.3、5.4~5.3和4.5 cal. kaBP,第一次和第三次事件由相对海平面上升 所致,第二次主要是频繁的台风事件。

(4)滨海平原不同地理位置对海侵事件的响应 存在明显差异,较内陆的井头山遗址3次事件都以 咸潮入侵为主,邻近海岸线的鱼山遗址在第一次和 第三次事件中被海水淹没,第二次为咸潮入侵。

#### 参考文献 (References)

- IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] Wang S, Ge J Z, Meadows M E, et al. Reconstructing a late Neolithic extreme storm event on the southern Yangtze coast, East China, based on sedimentary records and numerical modeling [J]. Marine Geology, 2022, 443: 106687.
- [3] 郑云飞. 中国考古改变稻作起源和中华文明认知[J]. 中国稻米,
   2021, 27 (4): 12-16. [ZHENG Yunfei. Consensus change of rice cultivation origination and Chinese civilization by archaeology in China [J]. China Rice, 2021, 27 (4): 12-16.]
- [4] 邵九华. 河姆渡遗址的废弃和河姆渡文化消亡原因的研究[J]. 史前研究, 2000: 345-351. [SHAO Jiuhua. Study on the abandonment of Hemudu Site and the causes of Hemudu Culture extinction [J]. Prehistoric Research, 2000: 345-351.]
- [5] 林国聪,丁友甫,谢纯龙,等.浙江省慈溪市童家岙遗址2009年试掘 简报[J].东南文化,2012(3):66-79.[LIN Guocong, DING Youfu, XIE Chunlong, et al. 2009 Report of the test excavation at the Tongjia' ao Site in Cixi, Zhejiang [J]. Southeast Culture, 2012(3):66-79.]
- [6] Zheng Y F, Sun G P, Chen X G. Response of rice cultivation to fluctuating sea level during the Mid-Holocene [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57 (4): 370-378.
- Wang Z H, Ryves D B, Lei S, et al. Middle Holocene marine flooding and human response in the south Yangtze coastal plain, East China [J].
   Quaternary Science Reviews, 2018, 187: 80-93.
- [8] 唐亮,吕晔,年小美,等.姚江-宁波平原中全新世海侵事件及古人类

活动的快速响应[J]. 第四纪研究, 2019, 39(5): 1116-1132. [TANG Liang, LÜ Ye, NIAN Xiaomei, et al. Middle Holocene seawater intrusion and human's rapid response in the Yaojiang-Ningbo coastal plain, China [J]. Quaternary Sciences, 2019, 39(5): 1116-1132.]

- [9] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术 出版社, 1993: 18-28. [DENG Hongwen, QIAN Kai. Sedimentary Geochemistry and Environmental Analysis[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993: 18-28.]
- [10] 王敏芳, 黄传炎, 徐志诚, 等. 综述沉积环境中古盐度的恢复[J]. 新 疆石油天然气, 2006, 2(1): 9-12. [WANG Minfang, HUANG Chuanyan, XU Zhicheng, et al. Review on paleosalinity recovery in sedimentary environment [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2006, 2(1): 9-12.]
- [11] Coffey M, Dehairs F, Collette O, et al. The behaviour of dissolved Barium in estuaries [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1997, 45(1): 113-121.
- [12] Stecher III H A, Kogut M B. Rapid barium removal in the Delaware estuary [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63 (7-8): 1003-1012.
- [13] 刘恒福, 徐云甫, 李善平, 等. 三十九种元素的分组及元素地球化学
   [M]. 北京: 地质出版社, 2017. [LIU Hengfu, XU Yunfu, LI Shanping, et al. Grouping of Thirty-Nine Elements and Elemental Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.]
- [14] 王爱华.不同形态锶钡比的沉积环境判别效果比较[J].沉积学报, 1996, 14 (4): 168-173. [WANG Aihua. Discriminant effect of sedimentary environment by the Sr/Ba ratio of different exising forms [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14 (4): 168-173.]
- [15] 郭志刚,杨作升,范德江,等.东海中陆架泥质区及其周边底质中钙、锶、钡的地球化学特征[J].青岛海洋大学学报,1998,28(3):481-488. [GUO Zhigang, YANG Zuosheng, FAN Dejiang, et al. The geochemical characteristics of Ca, Sr, Ba in the surface sediments of the middle continental shelf mud area and its ambient areas in the East China Sea [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1998, 28(3):481-488.]
- [16] 史忠生,陈开远,史军,等. 运用锶钡比判定沉积环境的可行性分析
  [J]. 断块油气田, 2003, 10(2): 12-16. [SHI Zhongsheng, CHEN Kaiyuan, SHI Jun, et al. Feasibility analysis of the application of the ratio of strontium to barium on the identifying sedimentary environment [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2003, 10(2): 12-16.]
- [17] 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积 环境中的应用[J]. 同济大学学报, 1979, 7(2): 51-60. [WANG Yiyou, GUO Wenying, ZHANG Guodong. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing Group (Paleogene), Jin-Hu depression, Kiangsu province [J]. Journal of Tongji University, 1979, 7(2): 51-60.]
- [18] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 360-372. [LIU Yingjun, CAO Liming, LI Zhaolin. Element Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1984: 360-372.]
- [19] 王爱华,叶思源,刘建坤,等.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[J]. 沉积学报, 2020, 38(6): 1226-1238. [WANG Aihua, YE Siyuan, LIU Jiankun, et al. Discrimination between marine and terrestrial sedimentary environments by the selectively extracted Sr/Ba ratio: a case of sediments in

the Yellow River delta [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38 (6): 1226-1238.]

- [20] 黄晶, 郑童童, 王爱华, 等. 选择性提取碱土金属元素的方法对比及 意义: 以宁波平原表层沉积物为例[J]. 华东师范大学学报:自然科 学版, 2021 (2): 73-84. [HUANG Jing, ZHENG Tongtong, WANG Aihua, et al. Comparison of different extraction methods for alkaline earth metals and its implications: a case study of the surficial sediments from Ningbo Plain [J]. Journal of East China Normal University:Natural Science, 2021 (2): 73-84.]
- [21] Huang J, Li Y N, Ding F Y, et al. Sedimentary records of mid-Holocene coastal flooding at a Neolithic site on the southeast plain of Hangzhou Bay, east China [J]. Marine Geology, 2021, 431: 106380.
- [22] Huang J, Lei S, Tang L, et al. Mid-Holocene environmental change and human response at the Neolithic Wuguishan site in the Ningbo coastal lowland of East China [J]. The Holocene, 2020, 30(11): 1591-1605.
- [23] Wu Y Y, Huang X, Zheng X W, et al. Sedimentary records of mid-Holocene extreme storm events on the north bank of Hangzhou Bay, East China [J]. Marine Geology, 2022, 451: 106891.
- [24] 王开发,张玉兰. 宁波平原晚第四纪沉积的孢粉、藻类组合及其古地理[J]. 地理科学, 1985, 5 (2): 145-152. [WANG Kaifa, ZHANG Yulan. Palynological assemblages from the late quaternary sediments of Ningbo plane in Zhejiang province and their paleogeography [J]. Scientia Geographica Sinica, 1985, 5 (2): 145-152.]
- [25] 覃军干. 宁绍平原及邻区晚更新世以来的孢粉学研究及古环境意义
   [D]. 同济大学博士学位论文, 2006: 11-15. [QIN Jungan. Palynological study of Ning Shao plain and paleoenvironmental significance since late pleistocene[D]. Doctor Dissertation of Tongji University, 2006: 11-15.]
- [26] 王海明. 河姆渡遗址与河姆渡文化[J]. 东南文化, 2000(7): 16-23.
   [WANG Haiming. Hemudu sites and hemudu cultures [J]. Southeast Culture, 2000(7): 16-23.]
- [27] 刘军, 王海明. 宁绍平原良渚文化初探[J]. 东南文化, 1993 (1): 92-102.
   [LIU Jun, WANG Haiming. A preliminary study on Liangzhu culture in Ningshao Plain [J]. Southeast Culture, 1993 (1): 92-102.]
- [28] 孙国平, 梅术文, 陆雪姣, 等. 浙江余姚市井头山新石器时代遗址[J]. 考古, 2021 (7): 3-26. [SUN Guoping, MEI Shuwen, LU Xuejiao, et al. Brief report on the excavation of the neolithic site at Jingtoushan in Yuyao City, Zhejiang [J]. Archaeology, 2021 (7): 3-26.]
- [29] 雷少, 丁风雅, 吴波. 浙江宁波镇海鱼山遗址 I 期发掘简报[J]. 东南 文化, 2016(4): 23-37. [LEI Shao, DING Fengya, WU Bo. Stage I excavation report of the Yushan site in Zhenhai, Ningbo, Zhejiang [J]. Southeast Culture, 2016(4): 23-37.]
- [30] He K Y, Lu H Y, Zheng Y F, et al. Middle-Holocene sea-level fluctuations interrupted the developing Hemudu culture in the lower Yangtze River, China [J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 188: 90-103.
- [31] Wang A H, Wang Z H, Liu J K, et al. The Sr/Ba ratio response to salinity in clastic sediments of the Yangtze River Delta [J]. Chemical Geology, 2021, 559: 119923.
- [32] Zhang W T, Zheng T T, Wang Z H, et al. Reconstruction of coastal flooding processes and human response at the end of the Liangzhu Culture, East China [J]. Quaternary Science Reviews, 2022, 293: 107705.
- [33] Blaauw M. Methods and code for 'classical' age-modelling of ra-

diocarbon sequences [J]. Quaternary Geochronology, 2010, 5 (5): 512-518.

- [34] Alve E, Murray J W. Marginal marine environments of the Skagerrak and Kattegat: a baseline study of living (stained) benthic foraminiferal ecology [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1999, 146 (1-4): 171-193.
- [35] 王倩, 常凤鸣, 李铁刚, 等. 亚马逊冲积扇海域表层海水古盐度定量 重建: 浮游有孔虫Ba/Ca指标的应用[J]. 第四纪研究, 2015, 35 (2): 383-389. [WANG Qian, CHANG Fengming, LI Tiegang, et al. Application of planktonic foraminiferal Ba/Ca ratios to quantitatively reconstruct paleosalinity of surface ocean waters over the Amazon fan [J]. Quaternary Sciences, 2015, 35 (2): 383-389.]
- [36] Gao S, Collins M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves [J]. Marine Geology, 2014, 352: 268-294.
- [37] Lyu Y, Tong C F, Saito Y, et al. Early to mid-Holocene sedimentary evolution on the southeastern coast of Hangzhou Bay, East China, in response to sea-level change [J]. Marine Geology, 2021, 442: 106655.
- [38] Lyu Y, Xu H, Meadows M E, et al. Early to mid-Holocene sedimentary environmental evolution in the palaeo-Ningbo Bay, East China and its implications for Neolithic coastal settlement [J]. Frontiers in Marine Science, 2022, 9: 1059746.
- [39] 舒军武,蒋乐平,程瑜.浙江诸暨楼家桥遗址文化间歇层成因的孢粉

学证据[J]. 微体古生物学报, 2017, 34(4): 406-417. [SHU Junwu, JIANG Leping, CHENG Yu. Palynological evidence for the formation of the culture interval layers at the Loujiaqiao archaeological site in Zhejiang Province, East China [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2017, 34(4): 406-417.]

- [40] He K Y, Lu H Y, Li Y N, et al. Cultural response to Middle Holocene sea-level fluctuations in eastern China: a multi-proxy approach [J]. Boreas, 2020, 49(1): 71-88.
- [41] Steinhilber F, Beer J, Fröhlich C. Total solar irradiance during the Holocene [J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(19): L19704.
- [42] Jensen J F, Odgaard U, Funder S, et al. 5.1 First people in Greenland [M]//Kotlyakov V M, Velichko A A, Vasil'ev S A. Human Colonization of the Arctic: The Interaction Between Early Migration and the Paleoenvironment [M]. Amsterdam: Academic Press, 2017: 367-405.
- [43] Prothro L O, Majewski W, Yokoyama Y, et al. Timing and pathways of East Antarctic Ice Sheet retreat [J]. Quaternary Science Reviews, 2020, 230: 106166.
- [44] Gouramanis C, Dodson J, Wilkins D, et al. Holocene palaeoclimate and sea level fluctuation recorded from the coastal Barker Swamp, Rottnest Island, south-western Western Australia [J]. Quaternary Science Reviews, 2012, 54: 40-57.