



南海北部海域北宋年间的古海啸记录及其潜在触发机制

王喻鸣¹, 王玉琨², 李琳琳², 许阳², 陈晓宏^{1*}, 张培震^{2*}

1. 中山大学土木工程学院, 广东省华南地区水安全调控工程技术研究中心, 广州 510275;

2. 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 珠海 519082

* 联系人, E-mail: eescxh@mail.sysu.edu.cn; zhangpeizhen@mail.sysu.edu.cn

2022-11-06 收稿, 2023-03-14 修回, 2023-03-15 接受, 2023-03-19 网络版发表

国家重点研发计划(2021YFC3001000)、珠江人才引进创新团队项目(2016ZT06N331)、国家自然科学基金(U1911204)和中山大学研究生质量提升项目(76140-11230011)资助

摘要 鉴识南海北部历史上大规模海啸灾害事件及其指示特征与影响区域, 对沿海地区海啸灾害的预测、评估和防范具有重要意义. 现有南海北部古海啸灾害研究多集中于沿海陆地或海岛上零星保存的事件沉积物, 而对沉积环境相对稳定且不易受后期改造破坏的浅海沉积物关注很少. 本文以汕头海门镇和惠州三门岛外海B01和D02钻孔的浅海岩芯为研究对象, 通过沉积物粒度分析、地球化学指标、沉积环境和加速器质谱(accelerator mass spectrometry, AMS) ^{14}C 年代测定等, 分别在B01和D02岩芯的195~228和72~105 cm深度鉴别出“海啸事件沉积层”. 两个岩芯的事件层有着相似的形成年龄, 介于1048~1108年的北宋年间. 该层平均粒径较上下层位显著增加, 显示为正粒序单层沉积结构、未见平行或交错纹层. 层内贝壳碎屑丰富、“新老”共存, 其沉积物特征性地球化学指标明显不同于上下层位, 且在界面附近地球化学元素含量或元素比值呈现突变规律. 综合南海内部及其周缘同期海啸或疑似海啸记录与历史文献记载, 我们认为南海北部上千公里沿岸一带可能发生了与菲律宾、西沙和南沙群岛近于同期的海洋巨灾事件. 如此空间规模的极端灾害很可能代表了北宋年间的超级海啸事件, 其触发机制应主要受控于该时期马尼拉俯冲带 $M_w > 8.0$ 的超强地震.

关键词 事件沉积物, AMS ^{14}C 定年, 地球化学指标, 北宋年间, 超级海啸事件, 南海北部陆架

巨灾事件原地复发概率较低, 一旦发生即瞬时造成巨大财产损失和人民生命伤亡, 因此, 对其成因研究尤为重要、也备受关注^[1-4]. 强震及其伴随的海啸灾害是巨灾事件的主要类型, 因其传播速度快、触发机制复杂而难以实时预测, 也因其对沿海地区构成严重威胁而被认为是最致命的海洋灾害之一^[1~12]. 如2004年苏门答腊-安达曼巨大地震及诱发的超级海啸造成了20多万人死亡. 2011年, 日本宫城地震引发的大海啸摧毁了核电站, 引发了巨大的环境灾难^[7,9,10].

南海地处欧亚、太平洋和印度洋板块的交汇地带, 构造应力复杂, 是西太平洋最大、包含众多珊瑚礁岛

屿的半封闭边缘海盆^[13~17](图1). 该地区为环太平洋地震带的构成部分, 一旦马尼拉俯冲带发生地震即可能引发规模巨大的海啸而波及南海沿岸(如南海北部), 造成致命危害^[2,18,19]. 南海北部海岸带人口稠密, 是全球经济引擎之一, 一旦发生海啸灾害, 损失将无可估量^[2,20,21]. 因此, 鉴识南海北部沿海一带海啸记录, 回答南海北部历史时期是否经历过大规模海啸灾害事件及其发生频率与影响范围, 是重现和评估该地区海啸灾害的关键要素, 意义特殊^[22,23]. 然而, 当前南海北部巨灾研究更多关注于风暴潮事件^[20,21,24,25], 对古海啸的研究则多以数值模拟为主, 从沉积学、地球化学和年代

引用格式: 王喻鸣, 王玉琨, 李琳琳, 等. 南海北部海域北宋年间的古海啸记录及其潜在触发机制. 科学通报, 2023, 68: 2690~2708

Wang Y M, Wang Y K, Li L L, et al. Paleo-tsunami sedimentary records and potential triggering mechanism during the Earlier Song Dynasty at the northern South China Sea (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 2690~2708, doi: 10.1360/TB-2022-1137

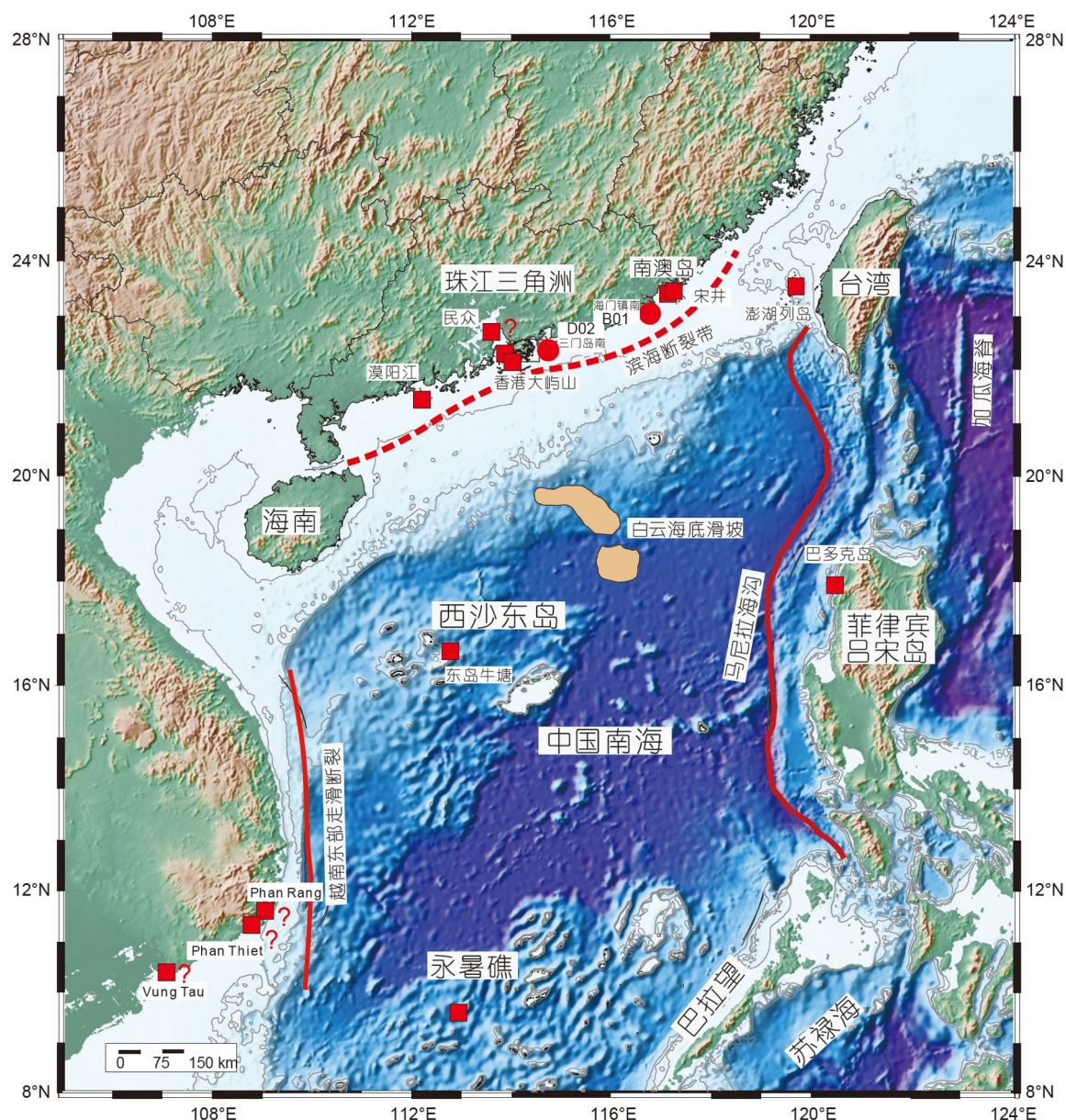


图1 南海北部及邻区地理地形图。红色方块示北宋年间海啸或疑似海啸，红色圆圈示本文B01和D02岩芯采样位置。马尼拉俯冲带、滨海断裂带、越南东部走滑断裂和白云海底滑坡引自文献[14~17]

Figure 1 Geographical map for the northern South China Sea and its vicinity. The red squares show the tsunamis or suspected tsunamis in the Earlier Song Dynasty. Red circles show the sampling locations of B01 and D02 drilling cores. Manila Subduction Zone, the Littoral Fault Zone, East Vietnam Fault and Baiyun Submarine Landslide are from Refs. [14~17]

学等资料综合分析古海啸事件的研究仍相对较少^[1,24,25]。

古海啸是指发生在历史记录之前或没有明确文字记载的海啸^[24,26]。即使历史文献有所记载，但也常常对其表述不准确或不同文献对同一次事件的描述互为矛盾，对经济欠发达地区或偏僻地区的灾种和灾情记录则尤为缺漏^[1,2,27~29]。同时，人为回避也是事实，如宋徽

宗登基之时“有司言祥瑞，郡国地震，多抑而不奏”。因此，以历史文献重建古海啸灾害极为困难，难以为潜在海啸灾害的风险评估提供依据^[1,2,5,24,25,27]。但是，海啸作为最具破坏性的瞬时高能灾害性事件，多见于海岸带或近海位置，其海啸波传播会导致远岸沉积物被搬运至海岸带附近或沿海潟湖，海啸回流也会把海岸带和陆源物质卷入远端沉积。在此过程中沉积物的物理性

质和化学成分发生改变,远海沉积物的向岸搬运可能导致沉积中断^[30,31],也可使得已沉积的“古老”自生海洋钙质产物被海啸裹挟而于异地堆积^[24,32~34](图2(a)).因此,海岸带沉积物有可能为揭示古海啸事件提供关键信息.对北美西海岸、日本东海岸、新西兰和印度尼西亚等海啸多发地区海岸带沉积记录的研究也证实了全新世中晚期该地区的多次海啸事件^[6,9,10,13,24,35~42].如距今4500年以来,西西里岛东部海岸12个异常海洋沉积层序中至少有4层与已知历史海啸记录相吻合,5层与陆地海啸沉积相一致^[35].日内瓦湖内的沉积物很好地保存了公元前1872~1622年的海啸事件记录^[36,37].在沿海陆上地区,强烈的海啸波会导致含海洋生物碎屑、微体化石的浅海相沉积物被冲上海岸,而在海岸地貌陆相沉积物之上形成突发的“不整合”(图2(b)).随着时间推移,地貌高处的“异常”沉积会被剥蚀或受人为影响而“抹失”.相反,在靠近滨海带的浅海区域,海啸波可令风暴潮相对难以企及的稳定沉积层产生冲刷剥蚀,从而呈现出与上下层位显著不同的沉积物层序结构,并得以长期保存^[43~47](图2(b)).因此,通过研究浅海区异常沉积层的粒度变化、生物属种、沉积年龄和地球化学指标等可有效识别海啸事件,重构海啸事件的发生频率、强度和发生过程等^[20,42~52].

历史文献记载南海北部曾发生多次大洪水事件^[1,27],但这些灾害事件常被“等同”于风暴潮所致,因而无法识别古海啸是否发生^[40].近年,Lu等人^[53]、Sun等人^[21]和杨文卿等人^[25]针对海岸带沿岸或海岛(如南澳岛、西沙群岛和澎湖列岛)陆上异常沉积层进行详细研究,认为1000年左右南海北部发生过海啸或疑似海啸^[42,50,54].本文选择南海北部三门岛和海门镇外海的B01和D02重力柱岩芯开展研究.上述钻孔位于距海岸带16~41 km的浅海地区,受人类活动干扰少且保存连续,是研究古海啸灾害事件、重构全新世海啸序列的有效载体^[55~58].该研究通过岩芯剖面沉积粒度、地球化学指标和年代学框架的建立,认为南海北部北宋年间存在超级海啸事件,从而重现了其区域影响及其潜在触发机制,为南海北部未来的巨灾防范提供了关键依据.

1 地质背景

南海指介于中国大陆、菲律宾群岛、加里曼丹、苏门答腊和中南半岛之间的广大海域,面积约3500000 km²,是一个半封闭的边缘海盆地(图1).南海东部和南部分别以强烈活动俯冲带与菲律宾和印度尼西亚等岛链相连,特别是长达1500 km的马尼拉俯冲带

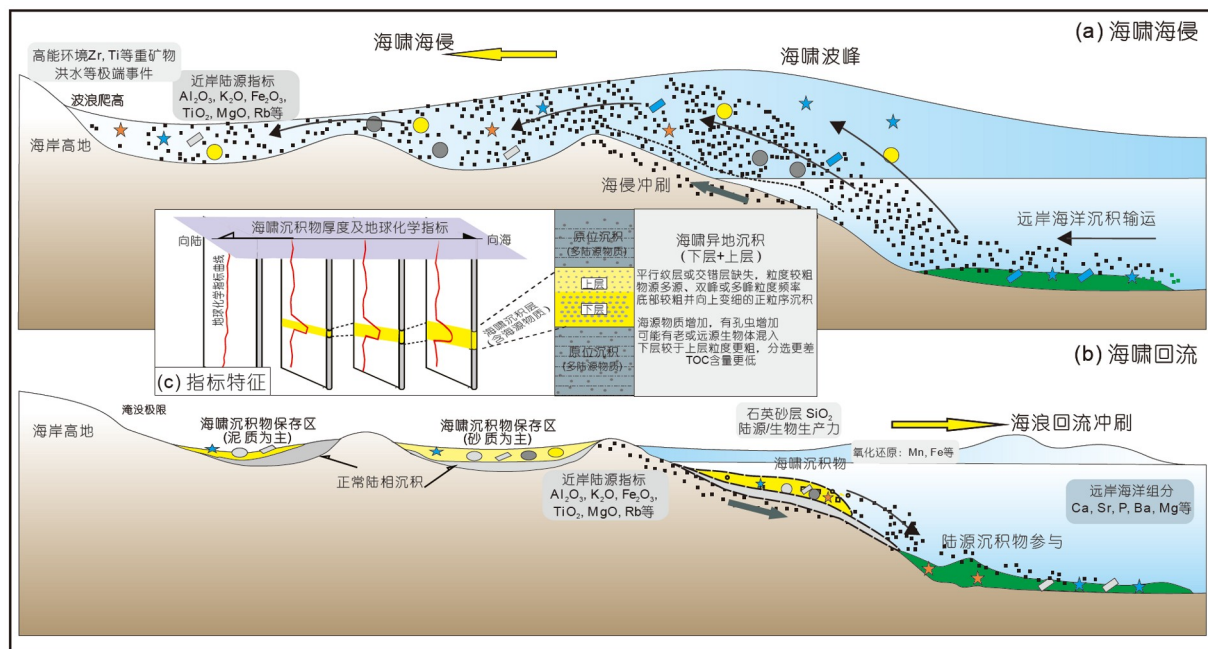


图2 海啸事件的海侵概念图. (a) 海啸淹没; (b) 回流过程; (c) 沉积层序的地球化学变化图. 据文献^[33,34]修改

Figure 2 Concept diagram of tsunami events. (a) Tsunami inundation; (b) backwash process; (c) geochemical indicators of the tsunami sedimentary layer. Modified from Refs. ^[33,34]

正沿南海东部俯冲于太平洋板块之下^[59,60]。在其西缘与中南半岛的越南和马来西亚等国接壤,北部以发育断陷或裂谷盆地特征而紧邻于中国南部海岸。南海周缘沿岸地区水系发育多为低洼三角洲,易受超强台风或海啸等海洋高能灾害所危害。现有的历史文献记载表明,19世纪中后期以来,印度尼西亚南部海啸灾害频发^[61],在南海东北部的我国台湾省和南海东部的菲律宾地区也经历过海啸或疑似海啸事件^[27,62],如1781年5月台湾台南和高雄一带海啸浪高“数十丈”。在我国华南沿海地区,历史文献记录有治平四年(1067年)阴历九月、熙宗二年(1069年)阴历八月的“疑似海啸”^[28,29]、1076年广东潮州的“海潮涨溢”、1918年广东南澳地震^[63]的诱发海啸和1992年海南海啸等^[64]。但是,相对超强台风而言,南海地区海啸风险的研究直到近年才逐渐成为前沿与热点。

2 实验方法

2016年,中山大学南海科学考察采用重力取芯器,在B01和D02站点获得了两个岩芯。两个采样站点的沉积物主要源自韩江和珠江水系所搬运的闽粤沿岸,沉积物受广东沿岸流及夏季粤东风生上升流所控制^[65-67]。B01岩芯位置距海岸线16 km,地处汕头海门镇外海之南南东海域,坐标位于23°2′26.43″N和116°42′18.60″E,取样水深27 m(图1),芯长2.73 m。岩芯整体呈青灰色或灰黑色,以粉砂沉积为主,195~228 cm层段贝壳碎屑丰富;D02岩芯位于惠州外海三门岛之南41 km的浅海区(图1),具体位置为22°10′59.57″N和114°49′01.18″E,岩芯长1.80 m,取样水深46 m,呈青灰色,以粉砂沉积为主,在72~105 cm深度可见丰富的贝壳碎屑(表1)。将采集的海上重力柱岩芯样品置于-4℃冰箱中保存,在实验室用无磁钢锯剖开岩芯并拍照记录,刮去表层污染层后,以1.24 cm为间隔采集沉积物样品。并将其置于真空冷冻干燥机中干燥至恒重后,称取150 mg样品置于50 mL洁净离心管中,加10 mL的10% H₂O₂溶液和10 mL 10%的HCl溶液浸泡样品至无气泡产生,以去除有机物和碳酸钙。用去离子水清洗样品至pH为中性后,在离心管内加入5 mL的0.05 mol L⁻¹六偏磷酸钠溶液,并超声振荡3 min,样品均质化后开展粒度分析。粒度测试通过中山大学广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室的马尔文3000型激光粒度仪完成。该粒度分析仪的分析范围为0.4~3000 μm,其测量重复性误差<1%。烘烤后用玛瑙研钵研磨至200目后称

取50 mg样品置于特氟龙容器中,加入2 mL 1:1的HNO₃和HF后,置于消解罐中加热至185℃消解32 h。消解后的样品被置于电热板上蒸干后,将其用HNO₃消解、定容、加入内标Rh并稀释至4000倍,用于测试微量元素。其主微量元素测试分别在中山大学广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室的ARL-Perform’X4200型X射线荧光光谱分析仪和Thermo电感耦合等离子体质谱仪上完成。随后,以沉积物的岩性及地球化学特征为基础,采集岩芯不同层位原位贝壳或有孔虫混种,用稀盐酸清洗表面的污染物,再用磷酸溶解生成CO₂用于测试。通过美国Beta实验室的加速器质谱AMS进行样品的前处理及放射性碳同位素(¹⁴C)测试,其¹⁴C测年数据沿用MARINE20数据库^[68]的CALIB 8.1软件经校准曲线进行校正^[69]。

3 测试结果与分析

3.1 沉积物粒度分析

B01的岩芯沉积物主要由均质粉砂和含贝壳碎屑的粉砂-砂及黏土质粉砂组成,分取岩芯沉积物218件,其对应的粒度分析和主微量分析结果见表1、S1和S2。该岩芯沉积物的粒径为21.4~108 μm。按照Folk等人^[70]的粒度分类,岩芯自下而上可分为如下5层(表1): (1) 层五深度为228~273 cm,以灰黑色粉砂为特征(占比达70%),少见贝壳碎屑; (2) 层四深度为195~228 cm,以粉砂至细沙为主,两者占比分别达56%和43%,具有丰富的贝壳碎屑; (3) 层三深度为105~195 cm,以粉砂和细沙为主,其中细沙占比为33%; (4) 层二(9~105 cm深度段)为青灰色黏土质粉砂,其中粉砂含量占比达65%; (5) 0~9 cm深度为层一,其沉积物为灰黑色粉砂夹黑色细沙团块。B01岩芯剖面的沙、粉砂和黏土占比分别为7.3%~47.6%、43.8%~80.8%和6.0%~17.9%,5个层位中的粉砂组分占比在50%以上(图3(a))。图4(a)展现了各层黏土、粉砂和沙质组分及平均粒径及偏态、标准偏差和峰度分布,其中,195~228 cm深度的层四具有相对其他层位略高的标准偏差和分选性相对偏弱的特征。该层具有明显偏高的平均粒径,介于45.5~108 μm之间(平均值为78.9 μm)。层五的偏态和峰度值最大,但标准偏差相对最小且平均粒径最细(为21.4~56.2 μm,平均值为34.9 μm),说明该层分选性较其他层稍好。

B01岩芯的粒径-标准偏差变化曲线(图4(a))对应的敏感粒径分别为5.7~8.3和144.5~190.5 μm,且层五的细

表 1 汕头和惠州外海的B01和D02岩芯柱岩性、粒度参数和地球化学元素含量特征

Table 1 Lithology, particle size parameters and geochemical contents for the sediments in the B01 and D02 cores on the offshore of the Shantou and Huizhou Counties

沉积 层位	深度 (cm)	岩芯描述	粒度组分(%)及其粒径(μm)参数的范围(平均值)						主量元素含量(wt%)变化范围(平均值)							
			砂(%)	粉砂 (%)	黏土 (%)	平均粒 径(μm)	偏态	峰度	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeOt	TiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CaO
汕头海门镇外海之南南海域B01钻孔沉积岩芯, 水深27 m, 柱长273 cm																
层一	0~9	灰黑色粉砂, 夹黑色细沙团块	30.8~	51.37~	6.04~	53.4~	0.94~	0.13~	63.42~	12.73~	4.35~	0.70~	1.57~	2.56~	1.40~	2.35~
			42.22	59.67	9.53	67.0	1.75	3.82	65.73	13.78	4.75	0.73	1.75	2.60	1.55	2.42
			(36.34)	(56.18)	(7.48)	(59.8)	(1.44)	(2.09)	(64.46)	(13.21)	(4.55)	(0.71)	(1.66)	(2.58)	(1.49)	(2.39)
层二	9~105	青灰色黏土粉砂	9.25~	54.21~	8.89~	25~	1.48~	1.47~	57.13~	13.43~	4.56~	0.70~	1.69~	2.54~	1.23~	2.08~
			31.92	74.79	19.5	55.7	4.23	25.7	64.15	17.05	5.71	0.77	2.06	2.75	1.84	4.04
			(22.02)	(65.25)	(12.72)	(42.4)	(2.20)	(5.78)	(60.37)	(15.08)	(5.14)	(0.73)	(1.91)	(2.64)	(1.58)	(2.53)
层三	105~ 195	青灰色粉砂到 细沙	16.69~	43.79~	8.68~	38.6~	0.98~	0.06~	59.31~	13.99~	4.33~	0.60~	1.78~	2.60~	1.30~	2.88~
			47.12	70.03	14.76	91.6	2.30	7.64	62.62	15.78	5.14	0.68	2.06	2.70	1.63	3.95
			(33.49)	(55.32)	(11.20)	(64.1)	(1.57)	(2.08)	(63.34)	(12.76)	(4.60)	(0.63)	(1.89)	(2.64)	(1.42)	(3.45)
层四	195~ 228	粉砂至细沙, 丰富生物碎屑	15.47~	44.55~	7.86~	45.5~	1.21~	0.62~	59.36~	11.92~	3.63~	0.53~	1.46~	2.24~	1.03~	2.89~
			47.59	71.45	13.74	108	3.29	13.7	65.09	14.96	4.65	0.67	2.00	2.71	1.43	5.91
			(43.32)	(56.33)	(11.34)	(78.9)	(1.97)	(4.27)	(64.94)	(11.23)	(4.18)	(0.59)	(1.72)	(2.42)	(1.22)	(4.04)
层五	228~ 273	灰黑色黏土粉砂, 少生物碎屑	7.27~	60.68~	11.41~	21.4~	1.78~	3.09~	62.29~	9.80~	4.31~	0.59~	1.40~	2.26~	1.09~	0.92~
			26.36	80.62	17.93	56.2	8.60	111.6	68.62	13.40	5.12	0.74	1.89	2.69	1.39	3.55
			(15.13)	(70.40)	(14.48)	(34.9)	(3.88)	(22.9)	(65.65)	(12.50)	(4.72)	(0.67)	(1.60)	(2.49)	(1.22)	(2.19)
惠州外海三门岛之南海域D02钻孔沉积岩芯, 水深46 m, 柱长180 cm																
层一	0~42	青灰色黏土粉砂, 生物碎屑	0~	58.32~	7.66~	12.9~	0.95~	0.20~	61.76~	12.69~	4.43~	0.66~	1.91~	2.41~	1.61~	3.46~
			31.92	82.77	7.23	49.2	6.14	48.36	63.34	13.66	4.79	0.69	2.03	2.54	1.87	3.69
			(23.37)	(66.41)	(10.21)	(39.1)	(1.50)	(3.06)	(62.4)	(13.16)	(4.60)	(0.68)	(1.96)	(2.47)	(1.73)	(3.53)
层二	42~72	青色粉砂和黏土, 见底栖贝壳	27.36~	53.12~	6.96~	42.8~	0.83~	0.02~	62.73~	11.80~	4.30~	0.63~	1.94~	2.43~	1.61~	3.57~
			39.69	62.39	10.25	56.1	2.78	12.30	64.57	12.83	4.62	0.67	2.08	2.55	1.74	4.28
			(32.67)	(58.79)	(8.53)	(49.3)	(1.39)	(2.89)	(62.99)	(12.52)	(4.49)	(0.65)	(2.00)	(2.48)	(1.67)	(4.09)
层三	72~ 105	粉砂至砂, 丰富生物碎屑	27.69~	48.76~	5.14~	43.5~	0.818~	0.076~	63.10~	11.40~	4.09~	0.62~	1.93~	2.39~	1.63~	3.57~
			46.1	63.25	10.52	70.7	3.87	22.47	65.74	12.83	4.57	0.66	2.08	2.54	1.67	4.26
			(35.37)	(57.35)	(7.27)	(53.26)	(1.76)	(6.20)	(64.65)	(11.85)	(4.28)	(0.63)	(1.98)	(2.45)	(1.65)	(4.01)
层四	105~ 180	青灰色黏土至 粉砂	26.59~	47.74~	3.88~	40.80~	0.57~	-0.47~	65.09~	10.75~	3.93~	0.60~	1.89~	2.35~	1.50~	3.98~
			47.87	64.82	8.59	64.40	3.38	19.17	66.65	11.72	4.22	0.64	2.04	2.44	1.69	4.46
			(37.19)	(56.68)	(6.13)	(53.32)	(1.05)	(1.96)	(65.92)	(11.06)	(4.03)	(0.62)	(1.95)	(2.38)	(1.60)	(4.22)

粒敏感粒级组分所占百分比最高。层三和层四界面粒度突变,但两者的粗粒敏感粒径组分所占比例均高,且随深度增加,层内粗粒敏感粒径组分所占比例依次递增(图4(a))。不同层位粒度分布曲线在层四及其上下界面均呈现显著差异,其成因可能与多向物源补给有关。

由于大多数沉积物矿物中的Ca、Na和K在化学风化过程中逐渐消耗,但Na在黏土中更为稳定,因此化学风化指数($CIA = [(Al_2O_3)/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$, CaO^* 为硅酸盐中CaO的摩尔含量)和A-CN-K($Al_2O_3 - (CaO^* + Na_2O) - K_2O$)可作为反映物源环境的重要指标^[71]。现有资料表明,当CIA为50~65、65~85和85~100时,对应的环境分别处于寒冷干燥(低风化)、温暖湿润(中等风化)和炎热潮湿(强烈风化)。B01岩芯

的58件沉积物样品CIA值(表S3)投点总体平行于A-CN线。其中层四的CIA值(44.7~50.8,平均值为48.1)明显低于其他层位(47.9~66.8),落于无化学风化区域,明显有别于弱-中等风化强度的其他层位样品(图3(a))。这表明层四风化程度更低,相较以陆源碎屑贡献明显的其他层位而言,可能有明显的远岸沉积物输入。

从惠州三门岛以南外海D02钻孔的180 cm岩芯中分取出144件样品,其粒度测试数据如表1和S2所示。该岩芯沉积物的平均粒径为12.9~70.7 μm,其中沙、粉砂和黏土占比分别为0~47.9%、47.7%~82.8%和3.9%~17.2%(图3(b))。岩芯自下而上可分为4层(表1)。其中,(1)层四(105~180 cm深度)为粉砂和细沙,少见贝壳碎屑。(2)层三(72~105 cm深度)仍以粉砂和细沙为特征,但相

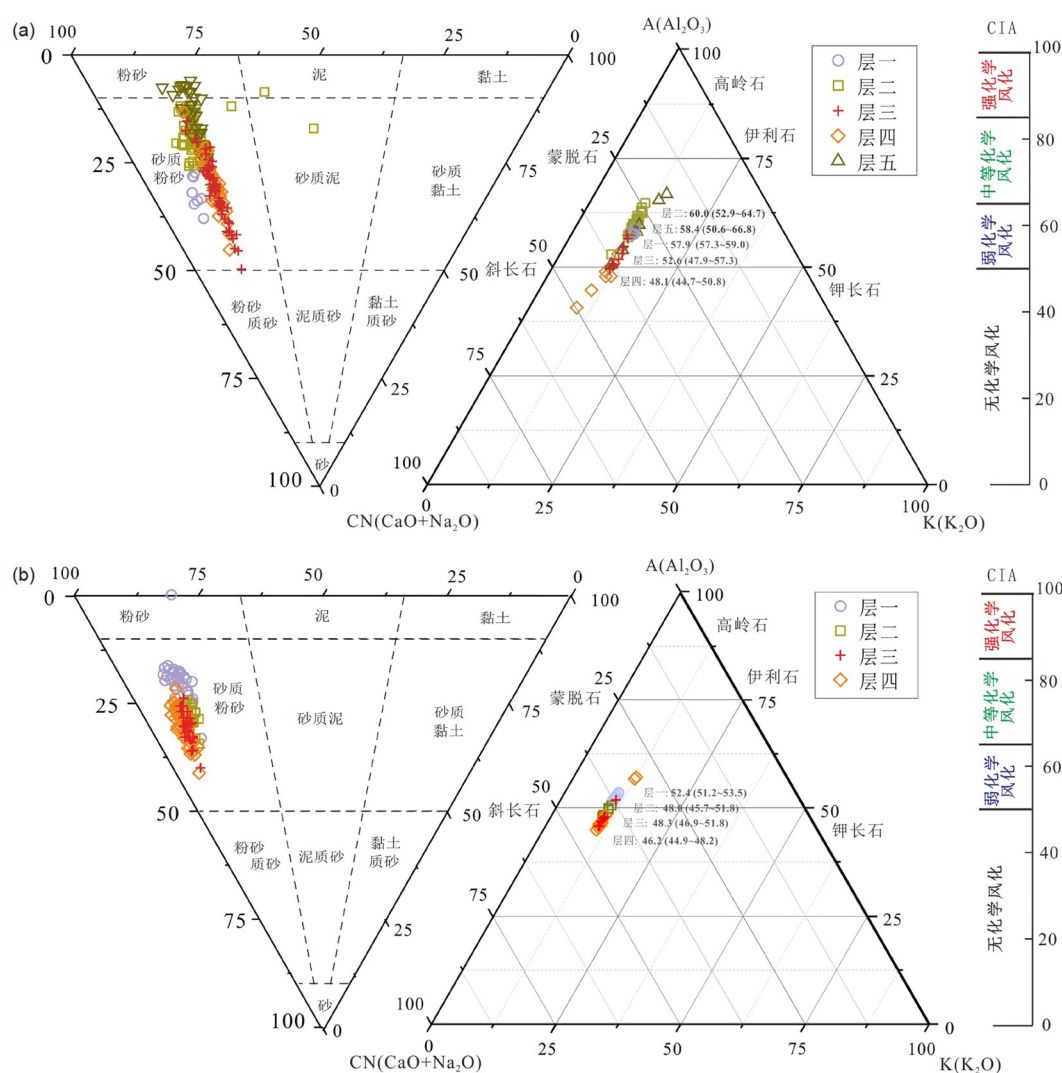


图3 南海北部浅海B01(a)和D02(b)岩芯沉积物的Folk等人^[70]的三角分类与A-CN-K三元图^[71]。其中, 岩芯不同层位的化学风化指数(CIA)平均值及变化范围见A-CN-K三元图

Figure 3 Triangle diagram of Folk et al.^[70] and A-CN-K ternary diagram^[71] for the sediments in the B01 (a) and D02 (b) cores at the offshore of the northern Coastal South China Sea. The average value and range of chemical index of alteration (CIA) at different depths are shown in the A-CN-K ternary diagram

对层二, 其平均粒径明显更粗, 见丰富的贝壳碎屑。(3) 层二(42~72 cm深度)的粉砂和细沙组分占比分别为59%和33%。(4) 层一(0~42 cm深度)以灰黑色粉砂为主。相对而言, 较层一和层二, 层三和层四的平均粒径更粗, 其中层三尤为突出(图4)。层三沉积物中粉砂、砂质和黏土组分的占比分别达57%、36%和7%, 粒径为43.5~70.7 μm (平均值54.1 μm), 偏态值为0.82~3.87(平均值1.86), 峰度值为0.07~22.47(平均值7.23)。从图4(b)可看出, D02各层位的标准偏差(2.26~3.64, 平均3.32)变化幅度相对较小。总体而言, 该岩芯层3段的标准偏差相对

层四偏高且自下而上增高。相较于其他层位, 层三的偏态和峰度值变化显著。D02岩芯样品的敏感粒级呈现4.7~6.3、14.4~22.9及75.2~92.5 μm 三个峰值(图4(b)), 4.7~6.3和14.4~22.9 μm 的细粒组分变化曲线在岩芯深度为83 cm处显著降低, 而相对粗粒的75.2~92.5 μm 组分则在72~105 cm深度持续升高。D02岩芯中35个沉积物样品的主微量元素组成和CIA(表S4和图3(b))表明, 该岩芯不同层位沉积物CIA值落于与A-CN线基本平行的区域。除层一以外, 其他层位沉积物CIA值相似或略低于B01岩芯的层位四, 属于无明显化学风化成因产物。

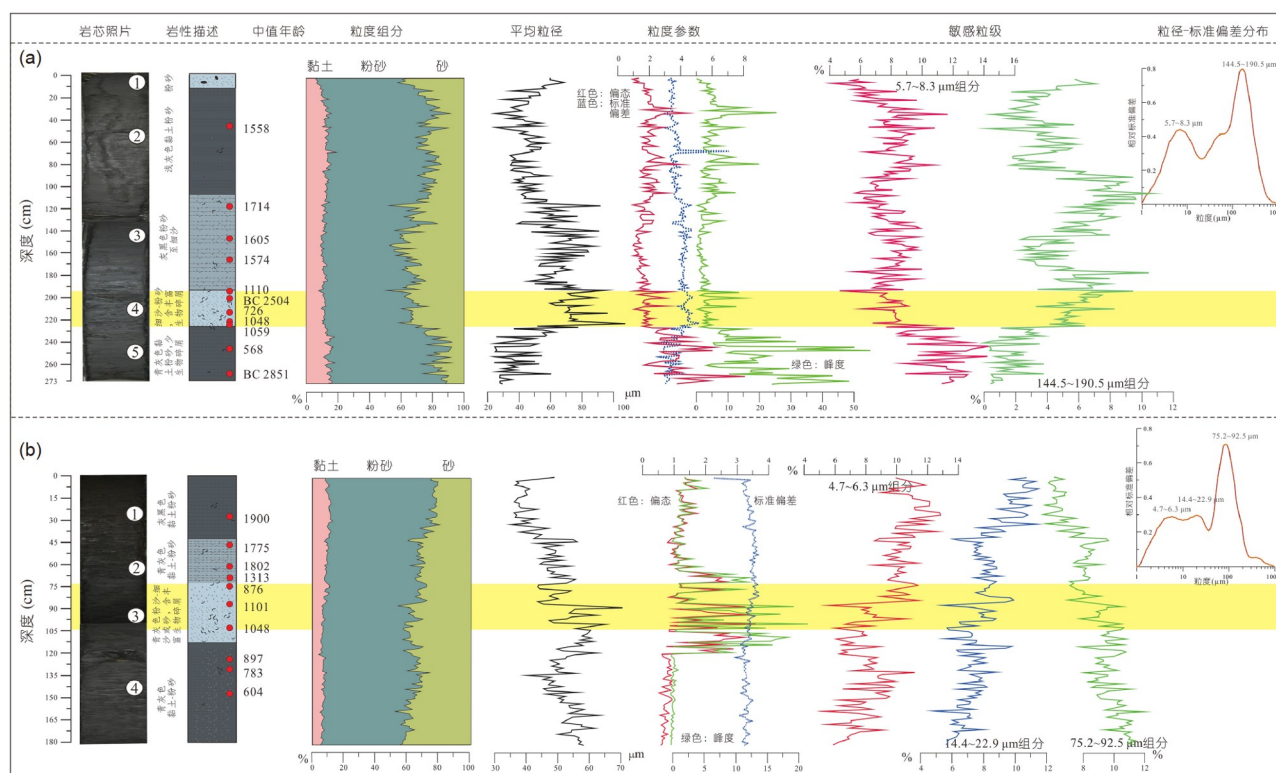


图4 南海北部浅海B01(a)和D02(b)岩芯沉积物的岩性特征(①~⑤表示岩芯层数)、AMS的 ^{14}C 中值年龄、粒度及敏感粒级组分、平均粒径、偏度、标准偏差、峰度和粒级-标准偏差分布曲线等的深度分布图

Figure 4 Sedimentary characteristics (layer numbers for ①~⑤), the depth pattern of AMS ^{14}C median ages, particle size and sensitive components, average particle size, skewness, standard deviation, kurtosis and particle size-standard deviation curve for the sediments in the B01 (a) and D02 (b) drillings at the offshore of the northern Coastal South China Sea

3.2 AMS ^{14}C 年龄结果

在传播至浅水和近岸时,海啸波往往会携带大量泥沙砾石和海洋生物等向陆运移,在近海海域或沿岸带有利环境下得以保存而形成海啸沉积物(图2)^[10,24,72]。因此,通过测定处于碳封闭体系的海洋生物 ^{14}C 含量,可计算其进入该封闭体系的时间,从而确认其寄主沉积物的沉积时间。AMS ^{14}C 定年的有效测年范围为0.4~40 ka^[69,73],因此选择不同层位原位贝壳或有孔虫混种开展AMS ^{14}C 定年,可重塑B01和D02的年代框架。

B01和D02岩芯沉积物的20个不同深度、未破损贝壳或有孔虫的AMS ^{14}C 测年数据及其校正结果列于表2和图4。其中, B01岩芯沉积物的沉积时间在距今5000年以内, D02岩芯柱沉积于距今2500年以内。以中值校正年龄和深度为依据,经贝叶斯rbacon 2.5.7软件^[74]构建的年龄深度模型如图5(a), (b)所示。

B01岩芯167、148和120 cm深度的原位贝壳分别给出了公元(AD, 下同)1574、1605和1714年的AMS

^{14}C 中值校正年龄。在269和245 cm深度获得了公元前2911年的有孔虫和524年的贝壳中值校正年龄(表2)。上述年龄表明, 0~195和228~269 cm深度年龄结构总体有序, 对应的沉积速率分别为0.28和0.01 cm/a(图4(a)和5(a))。但在196~228 cm深度的层四段, AMS ^{14}C 中值校正年龄呈现异常变化(图4(a)和5(a)), 在层四上下界面的196和228 cm深处获得的中值校正年龄分别为1108和1059年; 而上下界面之间的层四内部, 3个原位贝壳给出的校正年龄中值分别为公元前2504年(200 cm)、AD 726年(215 cm)和AD 1048年(226 cm)。

D02岩芯在层一、层二获得了正常沉积序列的年龄结构, 分别在70、63、40和29 cm深度获得了1313、1802、1775和1900年的贝壳中值校正年龄。在层四的148、132和125 cm深度贝壳的中值校正年龄分别为604、783和897年。与之对应的层一和层二(0~70 cm)沉积速率达0.24 cm/a, 而层四(105~180 cm)的沉积速率仅为0.06 cm/a(图5(b))。然而, D02岩芯在层三出现了中值

校正年龄的无序分布, 即层三72、87和105 cm深处分别获得了876、1101和1048年的中值校正年龄。

3.3 地球化学指标

沉积物中元素或矿物丰度变化能够反映风化强度、气候条件、沉积环境及物质来源的变化, 进而可反映海啸或风暴潮等极端事件^[26,33]。Minoura和Nakaya^[75]通过沉积物间隙水研究了日本古海啸淹没事件, 从而开启了地球化学指标应用于古海啸研究的先河。尽管将地球化学指标用于古海啸重建研究尚存争议, 但远岸海洋贝壳/珊瑚或海洋咸水替代物更富集Ca、Sr、P、Ba、Mg、Br、S和Cl, 而以陆源为主或能量较高水动力沉积环境的沉积物常富集TiO₂和Zr, 并以高含量Al₂O₃、K₂O、Fe₂O₃、MgO和Rb等为特征^[24,26,33,34,75,76]。沉积物的Fe和Mn含量变化亦常用于沉积时氧化-还原环境的研究^[77](图2)。因此, 借助地球化学指标用于海啸沉积层识别或海啸事件研究仍具重要意义。由于元素含量易受粒度变化影响, 而元素比值(如Sr/Rb和Sr/Ba)可有效校正沉积物元素含量的粒度效应, 因此元素比值和元素含量的组合使用可作为古海啸厘定的重要指标^[34,76]。

赵一阳和鄢明才^[78]对我国渤海、黄海、东海和南海200 m水深以内的海相沉积物研究表明, 中国浅海沉积物Sr/Ba平均值为0.56, 高于大陆沉积物(0.39)。B01沉积岩芯Sr/Ba平均值为0.44(0.27~0.72), 而D02沉积岩芯Sr/Ba平均值为0.54(0.48~0.60), 暗示两者均为浅海相沉积物。其中, B01相对较低的Sr/Ba值可能与其采样位置更为靠近近岸有关, 该情况也与距实际岸线位置和采样水深相吻合。研究表明, 沉积物中Ti基本以碎屑悬浮特征被搬运入海, 是海洋沉积物中陆源物质的最佳指示因子^[79]。B01和D02沉积岩芯的Si/Rb与Sr/Rb、Ca/Rb呈正相关, 而与Ti、Al、K、Fe、Rb呈负相关; Mn与Na、K、Al、Rb呈正相关、而与Ca、Sr、Ca/Ti、Sr/Ti呈负相关(表S5, S6), 表明Si以海源或海洋生物生产力为主, 而Mn与Fe指示其陆源贡献明显^[80]。同样Co、Cr和Ti的相关性也反映Co和Cr的陆源属性。

B01岩芯沉积物的主成分分析结果(表S7)表明, 累计方差贡献率达85.3%时得到PC1、PC2和PC3三个主因子。其中, 构成PC1因子(方差贡献率为39.2%)以Sr、Ca、Sr/Ba、Sr/Rb、Sr/Ti、Sr/Fe、Ca/Ti、Ca/Fe、Ca/Rb、Ca/K、Ca/Al和Mg/Ti为特征, 该主成分与陆源指示元素呈中-高的负相关, 说明其受陆源稀释作用影响较小,

而海源组分贡献明显。构成PC2因子(方差贡献率为37.7%)的元素及其比值主要有Na、K、Mn、Mg、Fe、Al、Rb、Zn、Na/K、Na/Rb和Mn/Ti(代表陆源组分)及Si、Si/Rb、Si/Al、Ba/Rb和Fe/Al为特征(与生物生产力或陆源贡献相关)。通常, 陆源物质输入通量和海洋生产力变化均与季风强度变化密切相关^[59,81,82]。考虑到B01站点距离岸线较近, 该主因子主要指示近岸陆源组分的贡献。PC3因子(方差贡献率为8.4%)主要由Zr和Fe/Ti构成, 由于上述元素常以重矿物形式运移, 因而可用于指示陆源重矿物的近距离搬运。结合主成分得分序列、粒度变化和AMS ¹⁴C测年结果(图4, 5和表1, 2), B01岩芯样品在228~269 cm层位陆源组分(如Ti等)较高, 以粉砂为主, 成熟度较高, 沉积速率低(0.01 cm/a), 可能反映了原地非扰动正常沉积。0~193 cm的层位中陆源地球化学指征明显, 以粉砂和粗沙为主, 沉积速率达0.28 cm/a。相反, 在~196 cm深度处, 相关地球化学指标突变, 其中以K、Zn、Rb、P、TiO₂、Al₂O₃、FeO_t、Ba、K/Si、Na/K和Ti/Ca的元素含量及其相关比值最低, 而在Ca、Sr、Sr/Rb、Sr/Ba、Si/Rb、Sr/Ti、Sr/Fe、Ca/Al和Ti/Rb最高。从196~228 cm的层四到228~273 cm的层五, K、P、Ba、Sr、Sr/Ba、Sr/Rb、Sr/Ti、Ca/Al、Sr/Fe、Ca、Ti/Rb、Mn/Ti等地球化学含量指标显著降低(图5(a))。这些特征表明, 196~228 cm层位是一个突变层, 该层位相对以陆源组分为主的上下层位而言, 远岸海源组分贡献显著增加。Zr含量在该层位明显减小, Si含量增加, 表明该层位颗粒粒径增大并非由近岸重矿物搬运所致, 而是海侵作用驱动远岸粗颗粒物向岸搬运的结果。

对D02岩芯沉积物而言, Ti、Mn、K、Fe、Al、Mg、Co、Rb、Zr、Ba、Mg、Ti/Ca、Fe/Ti和Mn/Ti等在105~180 cm层四深度总体较低, 而指示海源组分属性的Ca、Sr/Ba、Ca/Al、Sr/Rb、Sr/Ti和Sr/Fe等较高。该层成熟度相对较低, 沉积速率仅为0.06 cm/a。结合如上所述的年龄序列, 我们认为该层为海源组分相对较高的正常缓慢沉积。相对于层四, 0~72 cm层一和层二沉积物的元素含量及其相关比值中Co、K、Rb、Ba、Mg、Mn/Ti和Fe/Ti明显高, 而Zr、Sr、Sr/Ti、Sr/Fe、Sr/Rb、Sr/Ba和Ca/Fe较低。且层一和层二的沉积速率达0.24 cm/a, 为以陆源组分为主、成熟度较高的正常快速沉积。相关元素或元素比值在72~105 cm深度的层三呈现显著变化, 尤其在72 cm深度出现特征元素或元素比值的突变, 其年龄-深度模拟曲线在约72 cm深度表

表 2 南海北部浅海B01和D02岩芯柱不同深度下贝壳或有孔虫的AMS放射性¹⁴C定年结果

Table 2 AMS radiometric ¹⁴C dating results of shells or foraminifera at the different depths of the sediments in the B01 and D02 drillings from the northern Coastal South China Sea

类型	样品号	深度(cm)	测年材料	测量年龄 (距今)	校正年龄 ^{a)} (概率)	中值校正 年龄 ^{b)}	碳同位素 (δ ¹³ C(‰))	氧同位素 (δ ¹⁸ O(‰))	实验室代码
B01钻孔: 汕头海门镇外海之南南东海域, 水深27 m, 柱长273 cm									
正常沉积	B01-C14-1	120	贝壳	630±30	1531~1893年 (95.4%)	1714年	-0.4	-0.3	Beta-487594
	B01-123	148	贝壳	730±30	1460~1778年 (95.4%)	1605年	+0.6	-1.2	Beta-530133
	B01-135	167	贝壳	770±30	1432~1719年 (95.4%)	1574年	+0.9	-1.5	Beta-610696
事件沉积	B01-C14-2	196	贝壳	1310±30	959~1272年 (95.4%)	1108年	+1.1	-0.5	Beta-487595
	B01C-161	200	贝壳	4320±30	公元前2721~2291 年(95.4%)	公元前2504 年	+1.3	-0.3	Beta-537537
	B01-173	215	贝壳	1680±30	584~890年 (95.4%)	726年	-1.1	-1.0	Beta-610697
	B01-208	226	贝壳	1370±30	886~1218年 (95.4%)	1048年	+0.4	-0.6	Beta-610698
	NSCS-S3	228	贝壳	1360±30	894~1224年 (95.4%)	1059年	-0.3	-1.2	Beta-610698
正常沉积	B01C-202	245	贝壳	1880±30	361~673年 (95.4%)	524年	+2.2	+0.2	Beta-537534
	B01C-220	269	有孔虫	4640±30	公元前3111~2687 年(95.4%)	公元前2911 年	-0.2	-1.8	Beta-537538
D02钻孔: 惠州外海三门岛之南海域, 水深46 m, 柱长180 cm									
正常沉积	D02-23	29	贝壳	350±30	1792~1950年 (94.8%)	1900年	-0.5	-1.4	Beta-614708
	D02-C14-1	49	贝壳	570±30	1638~1950年 (95.4%)	1775年	+0.6	-0.7	Beta-487596
	D02-51	63	贝壳	540±30	1669~1950年 (95.4%)	1802年	+0.6	-0.3	Beta-610895
	NSCS-S5	70	贝壳	1090±30	1175~1444年 (95.4%)	1313年	+0.9	-0.5	Beta-642338
事件沉积	D02-57	72	有孔虫	1530±30	710~1032年 (95.4%)	876年	-0.2	-1.8	Beta-537535
	D02-71/72	87	有孔虫	1320±30	944~1265年 (95.4%)	1101年	-0.1	-1.8	Beta-537536
	D02-85	105	贝壳	1370±30	886~1218年 (95.4%)	1048年	-0.2	-0.5	Beta-610699
正常沉积	D02-101	125	贝壳	1510±30	721~1048年 (95.4%)	897年	+0.0	-1.1	Beta-610893
	D02-C14-2	132	贝壳	1620±30	646~957年 (95.4%)	783年	+1.0	-0.6	Beta-487597
	D02-119	148	贝壳	1800±30	439~755年 (95.4%)	604年	+0.1	-0.1	Beta-610894

a) 用于年龄校正的Delta-R=-149±40 a^[72]; b) 指公元年, 全文同

现为“年龄断层”(图5(b)). 因此, D02岩芯沉积物在105~185 cm深度以较高海源组分贡献为特征, 在

72~105 cm层位发生地球化学突变, 经此层位向上变化为更多陆源组分参与的正常沉积层序. 这表明D02岩芯

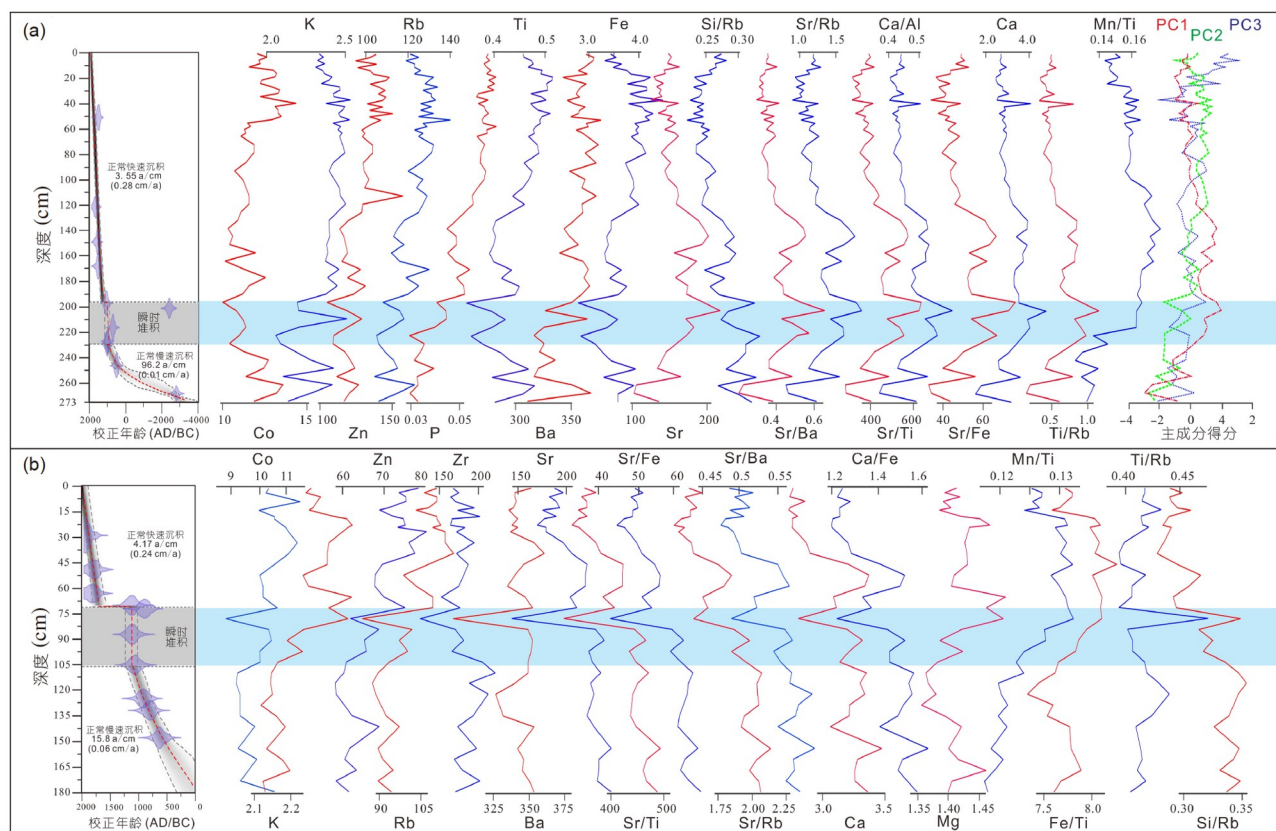


图5 南海北部浅海B01(a)和D02(b)岩芯沉积物AMS ^{14}C 年龄和主要地球化学指标的沿深度变化趋势图

Figure 5 Variation trends in depth of shell AMS ^{14}C age and main geochemical indicators for the sediments in the B01 (a) and D02 (b) drillings of the northern Coastal South China Sea

72~105 cm深度的突变层位代表了水动力条件的突然改变或沉积冲刷。

4 讨论

4.1 海域岩芯沉积物对北宋年间海啸事件的指示

类似海啸等突变事件会导致远海沉积物向岸搬运而扰动海底沉积物产生沉积中断^[30,31]，如D02岩芯在72 cm界面深度所示(图5(b))。同时，已沉积的“古老”自生海洋钙质产物可能被海啸裹挟而重新堆积^[34]。因此，海啸事件沉积层中再循环贝壳等的AMS ^{14}C 年龄往往早于或同时于海啸事件的实际发生时间^[83]。由于海啸沉积层是瞬时堆积形成的事件沉积，因此其上下界面或其附近生物体(如植物残体或贝壳)年龄能大致代表海啸事件年龄^[84]。如上所述，南海北部浅海的B01和D02钻孔分别在196~228和72~105 cm识别出了特征明显的事件沉积物(表1, 2和图4, 5)。B01岩芯的事件层内年龄介于公元前2504年和AD 726年间，该层上下界面

的中值校正年龄分别为1059和1108年。D02岩芯突变层(层三)的下界面年龄为AD 1048年，层内年龄为876~1101年。层三的上界面经历了海水冲刷，致使发育沉积中断(图5(b))，该冲刷面之上层二的底部沉积物AMS ^{14}C 中值校正年龄为1313年，表明该事件应“远早于”1313年。结合上述资料综合推断，B01和D02岩芯的突变层很可能为同一事件的产物，最可能的发生时间在北宋年间1048~1108年，事件层内“年代较为久远的年龄贝壳”系裹挟而来的“古老”钙质生物。

B01和D02钻孔远离韩江和珠江河口，潮汐通道不发育，受河流洪水影响不明显，其沉积输运主要受沿岸流控制。钻孔岩芯“异常沉积层”的地球化学特征也与典型河流衍生的洪水相沉积不吻合^[85]，因此可排除洪水泛滥沉积。研究表明，海平面在距今5000年左右达到全新世最高位置，距今2000~3000年以来基本稳定^[30,86]。故也排除了B01和D02岩芯的北宋年间事件沉积层异常年龄由海平面升高时海侵作用所致这一可能。特大海啸或超强台风引发的风暴潮能够诱发海浪侵蚀，可

将较深层海底沉积物扰动而搬运至浅海或海岸带地区^[50,58,80],导致事件层内“新老”生物体共存(图5),很可能是导致上述事件沉积层形成的重要机制。但是超强台风作用过程中水动力条件下所形成的事件沉积层厚度较大,含较多外来生物体,且常在下层表现为粒径较粗、分选中等、有机质含量低;而上层发育粒径较细、分选较差但有机质和硅藻含量较高的双层或叠层结构^[81]。同时由于超强台风导致的风暴潮或超强降雨可持续几天,所形成的海浪来回多次冲刷海岸会致使事件沉积层发育平行或交错纹层^[21]。此外,在风暴潮后期的沉积过程中,受径流作用影响,陆源物质显著增加,Zr和Ti等元素倾向于在粗粒层位中显著升高^[87]。相反,海啸事件由于持续时间短,对海岸的淹没次数有限,能量却更为巨大,因而更容易发育大面积分布、但厚度较薄的单层沉积单元或在近海坡地形成浊积岩(图2(c))^[21,25]。海啸作用的巨大能量易使贝类物质破碎而沉积于事件沉积层界面或附近,亦或足以席卷巨砾向岸搬运而卷入事件沉积层中^[43-45]。如吕宋岛1000年左右的海啸事件使得巨型珊瑚被搬运至距今海平面之上4.9 m高的台地^[54]。另外,由于海啸诱发的沉积物在海水中主要以悬浮方式搬运,在自由沉降或湍流降低的情况下,悬浮颗粒更容易形成向上颗粒变细的正粒序沉积层序,而此时重矿物或替代指标(如Zr和Ti)的含量会减小^[24,76,82]。

B01和D02岩芯位于南海北部大陆架浅海区,其中B01岩芯在196~228 cm深度总体以粗粒径为特征、含少量细粒组分的双峰粒度频率,自下而上呈现为正粒序单层结构,未见平行或交错层理。事件沉积层厚~30 cm,可见大量贝壳碎屑残体,且其沉积物粒度标准偏差相对其他层位较大,偏态及峰度值较小,分选性总体偏弱。如前所述,该层位沉积物的地球化学特征明显有别于上下层位(图5),CIA值相对较小,化学风化强度较弱,海洋自生元素(如Ca、Sr等)含量和Sr/Ba、Sr/Rb比值等显著增加(图5)。同样,D02岩芯在72~105 cm深度亦呈现大量贝壳碎屑,特别是在其上界面,小而碎的贝壳残体丰富。层内未见平行或交错层理,其沉积物平均粒径、粒度偏态和峰度值较上下层位显著升高,自下而上,标准偏差增加,呈现为分选较差、以粗粒径为主的多峰曲线特征(图5(b))。其特征性元素(如Sr、Ba、Ca)或元素比值(Sr/Ba和Sr/Rb)在事件层界面及其附近呈现为突变性的降低,显示经历了地球化学环境的巨大变化或海水冲刷作用(图5)。B01和D02岩芯沉积物的

Zr和Ti等含量在事件沉积层内显著降低。以上沉积层序及其地球化学特征可类比海啸事件沉积,而非风暴潮沉积。更重要的是,超强台风所引起海岸带风暴沉积常局限发育于登陆点附近^[22],以区域性沉积为特征。而如下文所述,北宋年间这一突变事件广见于南海内部及其周缘地区,也趋向于支持其为特大海啸事件。

4.2 北宋年间海啸事件的区域性证据

B01和D02所揭示的北宋年间(1048~1108年)海啸事件与目前在南海内部及其周缘海岸带所识别出的多处海啸或疑似海啸沉积记录一致,如图1和表3所示^[21,25,28,50,51,53,88-91]。在菲律宾吕宋岛西海岸巴多克岛发现了1026年左右的异常年轻巨型珊瑚化石(²³⁰Th年龄)。这些“异地”珊瑚分布在高于现今海平面2~5 m的全新世礁滩台地顶部,被认为是马尼拉海沟北部地震海啸导致其从远岸向陆搬运而来^[54]。Rogozhin^[89]报道了在越南东南部海岸带(图1)也疑似有海啸沉积层,其年龄标定在1015~1065年,当时海浪爬高达15 m之巨。南沙群岛永暑礁潟湖沉积物也记录有4000年来的多次风暴潮或海啸事件^[50,51],其中在1064年左右发育了由快速堆积而成的粗颗粒沉积物,并在礁滩上出现了北宋年间的珊瑚巨块。另外,在西沙群岛之东岛的沉积岩芯中发现有厚约10 cm的珊瑚砂层。该砂层分选差、粒度粗、层内及其上下界面生物壳的AMS ¹⁴C年龄介于978~1160年之间,推断为1076年的高能海啸事件^[21,90]。该突变事件的发生时间与北宋年间南海周缘其他地区海啸沉积层时序高度耦合,它不仅导致了东岛珊瑚砂层的形成,也将巨大的珊瑚和化石贝壳向陆搬运了200多米^[21,90]。

在南海东北部的澎湖列岛南向海岸识别出了4~6世纪、11~12世纪和15~16世纪的3次异常淹没事件。其中11~12世纪的海侵层位(如索岗和元阳洞)含大量砾石、厚约20~30 cm,发育于距今海平面3.5~5 m高处^[53]。在南海北部旧属潮州府的南澳岛东南海岸发现有夹杂宋代陶瓷器皿残片和动物骨骼的事件沉积层,层内生物体的¹⁴C年龄界定在894~1011年间。该事件不仅导致了南澳岛巨砾的向陆搬运,也造成了该地区长达500年的文化中断和衰落^[25]。结合历史文献记载,该事件被推断为1076年左右的海啸事件。在珠江口流域及其沿岸地区也发现有北宋年间的沉积间断^[51,91],反映了当时的高能灾难事件。如珠江口以西的漠阳江河口在0.7 m深度显示了1024年的沉积中断^[89]。在香港大屿山南岸

表 3 南海北部及沿岸地区北宋年间海啸或疑似海啸事件的事件沉积物记录

Table 3 Event sedimentary records of the tsunamis or suspected tsunamis in the northern South China Sea and coastal areas during the Earlier Song Dynasty

沉积类型	参考文献	地理位置(站点名称)	年龄(公元, 测年方法)	主要标志	推断的灾害性质
海域钻孔	本文	三门岛和海门镇外海(B01、D02)	B01: 介于1059~1108年间(AMS ¹⁴ C) D02: 介于1048~1102年间(AMS ¹⁴ C)	B01、D02岩芯分别于约195~226和72~105 cm沉积层显示出事件沉积标志	地震海啸
海域钻孔	[88]	漠阳江口距海岸线20 km(YJ)	1024年左右(AMS ¹⁴ C)	于海拔-9.1 m处出现沉积中断	无提及
海域钻孔	[31]	香港大屿山(HKUV10、HKUV11和HKUV12)	早于1180年(AMS ¹⁴ C)	在-13.6和-10.1 m出现沉积中断	超级台风或特大海啸
陆地沉积	[50,51]	南沙永暑礁(YSO-37和NY4)	1064±30和1201±5年(铀系定年)	沉积物粒度在1000~1200年显著变粗, 礁石平台见年轻珊瑚块	海啸或风暴潮
陆地沉积	[21]	西沙东岛牛塘(DY2、DY4)	1076年(AMS ¹⁴ C定年)	珊瑚砂层及地球化学、总有机碳和总氮	海啸
陆地沉积	[89]	越南东南部海湾	1015和1065年(AMS ¹⁴ C定年)	远岸沉积组分参与	疑似海啸
陆地沉积	[54]	吕宋巴多克岛	1004.9和1046.9年(铀系定年)	在5 m高的礁石平台发现年轻珊瑚块	以海啸情景模拟
陆地沉积	[25,42]	南澳岛东南侧宋井、澳前村、青澳湾和九溪澳	894~1011年(AMS ¹⁴ C定年) 1083±99年(光释光定年)	沉积物剖面显示事件沉积(含动物残骨及瓷器内壁附着物等)和粒度变化等	海啸
陆地沉积	[53]	澎湖列岛索岗和元阳(SG-2、SG-23)	1030~1230和1040~1220年间(AMS ¹⁴ C)	沉积层露头	以海啸模型情景模拟

晚全新世沉积岩芯中发现了发生于1180年以前、以砂质透镜体和贝壳层为特征的冲刷间断^[30,51,92]。在珠江三角洲(简称珠三角)中山、顺德和南沙等地钻孔中,也发现在该时期沉积层内出现了倒置或无序化的AMS贝壳¹⁴C年龄^[51,93,94]。

尽管古人对海啸事件认知不深,在记录灾害事件时存在偏差而将其误判为风暴潮或其他灾害,但历史文献仍能为古海啸事件的追溯提供相关信息^[27]。从历史文献记载来看,南海地区较为可信的、与地震海啸事件有关的文献记录集中在菲律宾1589年和中国1604年之后的400多年间。如菲律宾(1589~2012年)官方记录了41次海啸事件^[62],南海东北部记录有58次海啸事件^[27]。北宋年间南海北部岭南沿岸一带由于人口稀少、经济贫瘠而属瘴疠之地,也可能因官吏贪腐而致使灾情记录缺漏严重,目前仅个别巨灾记载留世^[28,29]。今传宋代历史记载中以《宋史·五行志》和《文献通考·物异考》记录宋朝重大灾种、灾情最为权威^[28,29]。以此为依据发现(表4),在治平四年(1067年)阴历九月二十七日的潮州,“拆裂泉涌、压覆两县寺观、居民舍屋,并本州楼阁营房等,士民军兵僧道死者甚众”。熙宗二年(1069年)阴历八月,“泉州大风雨、水与潮相冲泛滥”。熙宁九年(1076年)阴历十月,在海阳和潮阳,“海潮溢,坏庐舍,溺居民”。尽管这些历史文献记载也可能是

超强台风的结果,但是,广东省1949~2008年的文献记录反映了达到I-II级风暴潮位的时间主要在阳历7~9月,阳历10~11月仅发生频次很低的III-IV级超警戒风暴潮^[95]。南海北部沿海地区1949~2016年间的台风强度和风暴潮频率记录也表明,超强台风自西北太平洋通过吕宋海峡或岛屿传播进入后^[96],集中于海南-粤西和珠三角地区西部,较少在B01和D02所在的粤东沿岸或近海登陆^[97,98]。因此,B01和D02岩芯事件沉积层所处的地理位置及其发生时间,与北宋年间的巨灾记录在时空上高度耦合^[42,99]。结合南澳岛、台湾西南澎湖列岛和珠三角地区已有资料,我们推断,从南海东北部澎湖列岛至北部韩江、珠江和漠阳江沿岸一线的上千公里均记录有北宋年间的巨灾事件。这一事件在时间上也与西沙群岛、菲律宾西北和南沙群岛等地所发生的海啸事件相吻合。也就是说,在菲律宾、南海内部岛礁和南海北部沿岸的广阔空间,在北宋年间(1048~1108年)很可能几乎同时发生了海洋巨灾事件。如此规模的灾害事件远非超强台风或风暴潮所能达到,应为超级海啸事件所致,珠三角地区在此时期的灾难事件则只是该超级海啸事件的缩影^[30,92]。

4.3 北宋年间海啸灾害事件的触发机制

南海四周岛屿密集、相对封闭,南海东侧琉球俯

表 4 南海北部沿岸地区北宋年间海啸或疑似海啸事件的历史文献记载表

Table 4 Historical documentation of the tsunamis or suspected tsunamis in the coastal areas of northern South China Sea at the Earlier Song Dynasty

时间	史料记载(原文摘句)	出处
1067年阴历九月	治平四年: (1) “秋, 漳、泉、建州、邵武、兴化军等处皆地震, 潮州尤甚, 拆裂泉涌, 压覆州郭及两县屋宇, 士民、军兵死者甚众”; (2) 九月二十七日, “潮州大地震、拆裂泉涌, 压覆两县寺观、居民舍屋, 并本州楼阁营房等, 士民军兵僧道死者甚众”; (3) “冬十月丙午, 漳、泉诸州地震”	《宋史》卷一四和卷六七; 《宋会要》瑞异三; 在《宋代救荒史稿》和《中国灾害通史: 宋代卷》分类为地震灾害 ^[28,29]
1068年阴历七月	熙宁元年: (1) 七月二十八日, 同提点广东刑路刑狱公事王咸服奏: “潮州地震未止, 今又再震, 欲委本州知州为军民祈福, 建置道场, 以慰安民心”; (2) “是月, 潮州地再震”; (3) “数路地震, 有一日十数震, 有逾半年震不止者”	《宋史》卷一四和卷六七; 《宋会要》瑞异三; 《宋代救荒史稿》和《中国灾害通史: 宋代卷》分类为地震灾害 ^[28,29]
1069年阴历八月	熙宗二年: “泉州大风雨、水与潮相冲泛滥”	《宋史》卷六一; 在《宋代救荒史稿》推断为海啸海潮, 《中国灾害通史: 宋代卷》分类为水灾 ^[28,29]
1076年阴历十月	熙宁九年: 潮州、潮阳县, “海潮溢、坏庐舍、溺居民”	《宋史》卷六一, 《中国灾害通史: 宋代卷》推断为水灾 ^[28,29] ; Lau等人 ^[27] 认为属海啸记录
1076年阴历十一月	熙宁九年: “癸酉, 海阳、潮阳两县飓风、潮, 害居民田稼”	《宋史》卷六七, 《宋代救荒史稿》中推断为海啸或海潮, 《中国灾害通史: 宋代卷》推断为风灾 ^[28,29]

冲带引发的地震海啸主要向太平洋传播, 跨域海啸难以通过狭窄水道而对南海海盆产生显著破坏^[2]. 模拟结果也表明, 即便在琉球俯冲带发生 M_w 8.0级的地震破裂, 海啸波通过吕宋海峡冲击至南海北部和越南东部所产生的最大波高仅在0.5~1 m之间^[21,100]. 现有资料显示, 南海外围岛屿的俯冲带地震也似乎并没有对南海内部产生过海啸危害. 如来自泰国湾和爪哇海的研究显示, 目前没有已知可影响到南海周缘海岸线的海啸源, 苏禄海一带的地震也尚没有波及南海内部, 甚至没有对沙巴沿岸产生重大风险^[101,102]. 因此, 南海内部海底滑坡、火山喷发和海底地震可能是触发上述北宋年间海啸事件的最可能动力源. 但是, 南海内部未有过北宋年间的大规模或高强度火山喷发, 尽管有关海底滑坡的数值模拟结果显示在特定情境下可诱发海啸^[15,103], 但相对地震而言, 海底火山或巨型滑坡所诱发的规模级海啸事件概率较低, 所能影响的空间范围也相对局限^[23,104]. 如前所述, 北宋年间海啸事件所影响的空间范围如此广泛, 因而很可能不是单次火山事件或某地局域海底滑坡所致, 而与海底地震所导致的大范围断层破裂有关^[23,25,105]. 综上, 南海北部滨海断裂带和/或东部马尼拉俯冲带所产生的超强地震更可能是触发上述北宋年间超级海啸事件的主要动力源^[2,3,9,23].

滨海断裂带是南海北部发育的一条活动强度最大、频次最多的地震断裂带^[14], 大致呈北东向并沿水深30~50 m陆架海域展布, 东接牛山岛、西连北部湾, 途径南日岛、南澎列岛和担杆列岛等^[14,106,107]. 其

在中生代-新生代时期经历了拉张到挤压的应力反转, 历史上曾发生过18次6级以上地震、4次7级以上强震, 具有地震活动触发海啸事件的潜能^[18,23]. 但是滨海断裂带水深较浅(30~50 m), 其触发的海啸事件所能影响的范围理论上应局限于南海北部陆架近岸区域^[108]. 而要近乎同时形成发生于北宋年间, 且遍及南海北部澎湖列岛、南澳岛、韩江口、珠江口、漠阳江口, 及西沙、南沙群岛、菲律宾西北等地的海啸可能性较小^[23]. 另外, 西沙群岛海啸沉积物的分布规律也指示当时的海啸源更可能在西沙群岛东边^[21,67].

研究表明, 马尼拉海沟地震频繁, 该俯冲带自新生代以来的俯冲速率高达65~100 mm/a^[109,110], 高于全球地震非常活跃的多个俯冲带^[111], 其俯冲过程中不断累积的巨大能量很可能在某个特定时段以超强地震形式予以释放, 从而引发巨大海啸^[112,113]. Li等人^[99]、Megawati等人^[60]和Li等人^[114]的模拟均表明, 马尼拉海沟巨型逆冲断层破裂所诱发的海啸波可影响包括菲律宾、中国, 甚至越南海岸在内的整个南海, 特别是对南海10°~25°N威胁较大. $M_w=8.0$ 时的地震可使珠江口一线海啸波峰达2.5~3.5 m, 粤东沿海达5 m左右; $M_w=9.3$ 的极端地震可在包括珠三角地区在内的南海北部沿岸生成8 m以上的巨浪^[18,19]. 该模拟结果与B01、D02岩芯及前人所报道的事件沉积物的研究结果能互为验证. 考虑到西沙群岛东岛和南澳岛等地巨型珊瑚或砾石的海侵搬运, 我们推断诱发北宋年间古海啸的地震震级 $M_w \geq 8.0$. 因此, 南海东侧马尼拉俯冲带大范围断层破

裂所引发的超强地震($M_w > 8.0$)^[2,21,23,25,42,57,60]很可能是触发北宋年间超级海啸事件的主要动力源。但是,如《宋史·五行志》所载(表4),北宋年间(1069年)潮汕地区“一路地震,一日十数震,逾半年震不止”。因此,在强调马尼拉海沟超强地震触发该超级海啸的主导作用之时,不能完全排除滨海断裂带同期地震的叠加效应。

5 结论

在汕头海门镇和惠州三门岛外海B01和D02浅海

岩芯中,本研究识别出厚约30 cm的海啸事件沉积层。该层沉积物粒度、沉积结构和地球化学指标等均呈现突异性变化,并明显有别于其上下层位。通过对B01岩芯196~228 cm与D02岩芯72~105 cm深度层位及其上下界面的AMS ^{14}C 年龄变化和年龄-深度模型研究,限定了该海啸事件发生于北宋年间1048~1108年。结合已有研究资料及文献记载,推断北宋年间的超级海啸事件广泛出现在菲律宾西北、南海内部岛礁及南海北部沿岸一带,规模巨大,其触发机制很可能主要受控于马尼拉俯冲带 $M_w > 8.0$ 超强地震。

致谢 感谢两名审稿人和编委所提出的宝贵建议,感谢所有参与此项研究的老师和同学。

参考文献

- Mak S, Chan L S. Historical tsunamis in South China. *Nat Hazards*, 2007, 43: 147–164
- Terry J P, Winspear N, Goff J, et al. Past and potential tsunami sources in the South China Sea: A brief synthesis. *Earth-Sci Rev*, 2017, 167: 47–61
- Lallemand S, Lehu R, Rétif F, et al. A ~3000 years-old sequence of extreme events revealed by marine and shore deposits east of Taiwan. *Tectonophysics*, 2016, 692: 325–341
- Zhou L, Chen D K, Lei X T, et al. Progress and perspective on interactions between ocean and typhoon (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 60–72 [周磊, 陈大可, 雷小途, 等. 海洋与台风相互作用研究进展. 科学通报, 2019, 64: 60–72]
- Wang L C, Wang C S, Li Y L, et al. Tsunami and tsunami deposits (in Chinese). *Acta Sedimentol Sin*, 2010, 28: 596–610 [王立成, 王成善, 李亚林, 等. 海啸和海啸沉积. 沉积学报, 2010, 28: 596–610]
- Atwater B F, Bourgeois J, Yeh H, et al. Tsunami geology and its role in hazard mitigation. *Eos Trans AGU*, 2005, 86: 400
- Morrow R C, Llewellyn D M. Tsunami overview. *Mil Med*, 2006, 171: 5–7
- Ishimura D, Yamada K. Palaeo-tsunami inundation distances deduced from roundness of gravel particles in tsunami deposits. *Sci Rep*, 2019, 9: 10251
- Satake K, Heidarzadeh M, Quiroz M, et al. History and features of trans-oceanic tsunamis and implications for paleo-tsunami studies. *Earth-Sci Rev*, 2020, 202: 103112
- Goto K, Sugawara D, Abe T, et al. Liquefaction as an important source of the A.D. 2011 Tohoku-oki tsunami deposits at Sendai Plain, Japan. *Geology*, 2012, 40: 887–890
- Darbyshire J, Ishiguro S. Tsunamis. *Nature*, 1957, 180: 150
- Bryant E. *Tsunami Dynamics*. Berlin: Springer, 2014
- Milliman J D, Farnsworth K L. *River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011
- Liu Y X. *Analysis of Fault Structure in South China Coastal Area* (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1981 [刘以宣. 华南沿海区域断裂构造分析. 北京: 地震出版社, 1981]
- Li W, Wu S, Völker D, et al. Morphology, seismic characterization and sediment dynamics of the Baiyun Slide Complex on the northern South China Sea margin. *J Geol Soc*, 2014, 171: 865–877
- Ludwig W J, Hayes D E, Ewing J I. The Manila Trench and West Luzon Trough—I. Bathymetry and sediment distribution. *Deep Sea Res Oceanogr Abstr*, 1967, 14: 533–544
- Ca V T, Xuyen N D. Tsunami risk along Vietnamese coast. *J Water Resour Environ Eng*, 2008, 23: 24–33
- Ren Z Y, Zhao X, Liu H. Dispersion effects on tsunami propagation in South China Sea. *J Earthq Tsunami*, 2015, 9: 1540001
- Ren Z Y, Zhao X, Wang B L, et al. Characteristics of wave amplitude and currents in South China Sea induced by a virtual extreme tsunami. *J Hydrodyn Ser B*, 2017, 29: 377–392
- Zhou Q, Adams W M. Tsunami risk analysis for China. *Nat Hazards*, 1988, 1: 181–195
- Sun L, Zhou X, Huang W, et al. Preliminary evidence for a 1000-year-old tsunami in the South China Sea. *Sci Rep*, 2013, 3: 1655
- Li L, Huang Z, Qiu Q. Numerical simulation of erosion and deposition at the Thailand Khao Lak coast during the 2004 Indian Ocean tsunami. *Nat*

- Hazards, 2014, 74: 2251–2277
- 23 Li L L, Qiu Q, Li Z G, et al. Research progress and prospect of tsunami disaster in South China Sea (in Chinese). *Sci Sin Vitae*, 2022, 52: 803–831 [李琳琳, 邱强, 李志刚, 等. 南海海啸灾害研究进展及展望. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52: 803–831]
 - 24 Goff J, Chagué-Goff C, Nichol S, et al. Progress in palaeotsunami research. *Sediment Geol*, 2012, 243–244: 70–88
 - 25 Yang W Q, Sun L G, Yang Z K, et al. Nan'ao, an archaeological site of Song dynasty destroyed by tsunami (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 107–120 [杨文卿, 孙立广, 杨仲康, 等. 南澳宋城: 被海啸毁灭的古文明遗址. *科学通报*, 2019, 64: 107–120]
 - 26 Chagué-Goff C, Goff J R. Geochemical and sedimentological signature of catastrophic saltwater inundations (tsunami), New Zealand. *Quat Australas*, 1999, 17: 38–48
 - 27 Lau A Y A, Switzer A D, Dominey-Howes D, et al. Written records of historical tsunamis in the northeastern South China Sea—Challenges associated with developing a new integrated database. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2010, 10: 1793–1806
 - 28 Li H R. History of Relief from Famine in Song Dynasty (in Chinese). Tianjin: Tianjin Ancient Books Press, 2014 [李华瑞. 宋代救荒史稿. 天津: 天津古籍出版社, 2014]
 - 29 Qiu Y F. A General History of Disasters in China: Volume Song Dynasty (in Chinese). Zhengzhou: Zhengzhou University Press, 2008 [邱云飞. 中国灾害通史: 宋代卷. 郑州: 郑州大学出版社, 2008]
 - 30 Xiong H, Zong Y, Huang G, et al. Sedimentary responses to Holocene sea-level change in a shallow marine environment of southern China. *J Asian Earth Sci*, 2018, 166: 95–106
 - 31 Xiong H, Zong Y, Huang G, et al. Seabed erosion and deposition related to the typhoon activity of the past millennium on the southeast coast of China. *Earth Surf Process Landf*, 2020, 45: 1695–1704
 - 32 Ishizawa T, Goto K, Yokoyama Y, et al. Sequential radiocarbon measurement of bulk peat for high-precision dating of tsunami deposits. *Quat Geochronol*, 2017, 41: 202–210
 - 33 Shinozaki T. Geochemical approaches in tsunami research: Current knowledge and challenges. *Geosci Lett*, 2021, 8: 6
 - 34 Chagué-Goff C, Szczuciński W, Shinozaki T. Applications of geochemistry in tsunami research: A review. *Earth-Sci Rev*, 2017, 165: 203–244
 - 35 De Martini P M, Barbano M S, Smedile A, et al. A unique 4000 year long geological record of multiple tsunami inundations in the Augusta Bay (eastern Sicily, Italy). *Mar Geol*, 2010, 276: 42–57
 - 36 Fritsche S, Fäh D, Schwarz-Zanetti G. Historical intensity VIII earthquakes along the Rhone valley (Valais, Switzerland): Primary and secondary effects. *Swiss J Geosci*, 2012, 105: 1–18
 - 37 Clark K J, Hayward B W, Cochran U A, et al. Evidence for past subduction earthquakes at a plate boundary with widespread upper plate faulting: Southern Hikurangi Margin, New Zealand. *Bull Seismol Soc Am*, 2015, 105: 1661–1690
 - 38 Einsele G, Chough S K, Shiki T. Depositional events and their records—An introduction. *Sediment Geol*, 1996, 104: 1–9
 - 39 Nanayama F, Satake K, Furukawa R, et al. Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along the Kuril trench. *Nature*, 2003, 424: 660–663
 - 40 Jankaew K, Atwater B F, Sawai Y, et al. Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. *Nature*, 2008, 455: 1228–1231
 - 41 Maselli V, Oppo D, Moore A L, et al. A 1000-yr-old tsunami in the Indian Ocean points to greater risk for East Africa. *Geology*, 2020, 48: 808–813
 - 42 Yang W Q, Xie Z Q, Sun L G. Research progress in the reconstruction of paleotsunami in the South China Sea and the tsunami deposit characteristics (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2021, 28: 246–257 [杨文卿, 谢周清, 孙立广. 南海古海啸重建与海啸沉积研究进展. *地学前缘*, 2021, 28: 246–257]
 - 43 Ikehara K, Kanamatsu T, Nagahashi Y, et al. Documenting large earthquakes similar to the 2011 Tohoku-oki earthquake from sediments deposited in the Japan Trench over the past 1500 years. *Earth Planet Sci Lett*, 2016, 445: 48–56
 - 44 Ikehara K, Irino T, Saito Y. The 2011 Tohoku-oki tsunami-induced sediment remobilization on the Sendai shelf, Japan, from a comparison of pre- and post-tsunami surface sediments. *Sci Rep*, 2021, 11: 7864
 - 45 Reinhardt E G, Goodman B N, Boyce J I, et al. The tsunami of 13 December A.D. 115 and the destruction of Herod the Great's harbor at Caesarea Maritima, Israel. *Geology*, 2006, 34: 1061–1064
 - 46 Seike K, Kobayashi G, Kogure K. Post-depositional alteration of shallow-marine tsunami-induced sand layers: A comparison of recent and ancient tsunami deposits, Onagawa Bay, northeastern Japan. *Island Arc*, 2017, 26: e12174
 - 47 Polonia A, Nelson C H, Vaiani S C, et al. Recognizing megatsunamis in Mediterranean deep sea sediments based on the massive deposits of the 365 CE Crete event. *Sci Rep*, 2022, 12: 5253
 - 48 Liu K, Fearn M L. Lake-sediment record of late Holocene hurricane activities from coastal Alabama. *Geology*, 1993, 21: 793–796
 - 49 Peters R, Jaffe B, Gelfenbaum G. Distribution and sedimentary characteristics of tsunami deposits along the Cascadia margin of western North America. *Sediment Geol*, 2007, 200: 372–386
 - 50 Yu K F, Zhao J X, Shi Q, et al. Reconstruction of storm/tsunami records over the last 4000 years using transported coral blocks and lagoon

- sediments in the southern South China Sea. *Quat Int*, 2009, 195: 128–137
- 51 Yu F L, Zong Y Q, Lloyd J M, et al. Mid-Holocene variability of the East Asian monsoon based on bulk organic $\delta^{13}\text{C}$ and C/N records from the Pearl River estuary, southern China. *Holocene*, 2011, 22: 705–715
- 52 Williams S, Goff J, Ah Kau J, et al. Geological investigation of palaeotsunamis in the Samoan Islands: Interim report and research directions. *Sci Tsunami Hazards*, 2013, 32: 156–175
- 53 Lu C H, Yen J Y, Chyi S J, et al. Geological records of South China Sea tsunamis on Penghu Islands, Taiwan. *J Asian Earth Sci*, 2019, 177: 263–274
- 54 Ramos N T, Maxwell K V, Tsutsumi H, et al. Occurrence of 1 ka-old corals on an uplifted reef terrace in west Luzon, Philippines: Implications for a prehistoric extreme wave event in the South China Sea region. *Geosci Lett*, 2017, 4: 1–3
- 55 Feldens P, Schwarzer K, Sakuna D, et al. Sediment distribution on the inner continental shelf off Khao Lak (Thailand) after the 2004 Indian Ocean tsunami. *Earth Planets Space*, 2012, 64: 875–887
- 56 Rubin C M, Horton B P, Sieh K, et al. Highly variable recurrence of tsunamis in the 7400 years before the 2004 Indian Ocean tsunami. *Nat Commun*, 2017, 8: 16019
- 57 Yang W, Zhou X, Xiang R, et al. Palaeotsunami in the East China Sea for the past two millennia: A perspective from the sedimentary characteristics of mud deposit on the continental shelf. *Quat Int*, 2017, 452: 54–64
- 58 Nakanishi R, Okamura S, Yokoyama Y, et al. Holocene tsunami, storm, and relative sea level records obtained from the southern Hidaka coast, Hokkaido, Japan. *Quat Sci Rev*, 2020, 250: 106678
- 59 Hayes D E, Lewis S D. A geophysical study of the Manila Trench, Luzon, Philippines: 1. Crustal structure, gravity, and regional tectonic evolution. *J Geophys Res*, 1984, 89: 9171–9195
- 60 Megawati K, Shaw F, Sieh K, et al. Tsunami hazard from the subduction megathrust of the South China Sea: Part I. Source characterization and the resulting tsunami. *J Asian Earth Sci*, 2009, 36: 13–20
- 61 Paris R, Switzer A D, Belousova M, et al. Volcanic tsunami: A review of source mechanisms, past events and hazards in Southeast Asia (Indonesia, Philippines, Papua New Guinea). *Nat Hazards*, 2014, 70: 447–470
- 62 Bautista M L P. Philippine Tsunamis and Seiches, 1589 to 2012. Department of Science and Technology, Philippine Institute of Volcanology and Seismology, 2012
- 63 Peng C G, Li Y G, Wu M B. Analysis of seismogenic structure mechanism of the Nan’ao Earthquake in 1918 (in Chinese). *South China J Seismol*, 2017, 37: 1–14 [彭承光, 李运贵, 吴名彬. 1918年南澳大地震发震构造机制分析. *华南地震*, 2017, 37: 1–14]
- 64 Yu F J, Dong J X, Xu F X. China’s Offshore Seas—Marine Disasters (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 2016 [于福江, 董剑希, 许富祥. 中国近海海洋——海洋灾害. 北京: 海洋出版社, 2016]
- 65 Cai G, Li S, Zhao L, et al. Clay minerals, Sr-Nd isotopes and provenance of sediments in the northwestern South China Sea. *J Asian Earth Sci*, 2020, 202: 104531
- 66 Zhong L, Li G, Yan W, et al. Using zircon U-Pb ages to constrain the provenance and transport of heavy minerals within the northwestern shelf of the South China Sea. *J Asian Earth Sci*, 2017, 134: 176–190
- 67 Shao L, Qiao P J, Pang X, et al. Nd isotopic variations and its implications in the recent sediments from the northern South China Sea. *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 311–317 [邵磊, 乔培军, 庞雄, 等. 南海北部近代沉积物钕同位素分布及意义. *科学通报*, 2009, 54: 98–103]
- 68 Heaton T J, Köhler P, Butzin M, et al. Marine20—The marine radiocarbon age calibration curve (0–55000 cal BP). *Radiocarbon*, 2020, 62: 779–820
- 69 Stuiver M, Reimer P J, Braziunas T F. High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon*, 1998, 40: 1127–1151
- 70 Folk R L, Andrews P B, Lewis D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. *New Zealand J Geol Geophys*, 1970, 13: 937–968
- 71 Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, 299: 715–717
- 72 Paris R, Fournier J, Poizot E, et al. Boulder and fine sediment transport and deposition by the 2004 tsunami in Lhok Nga (western Banda Aceh, Sumatra, Indonesia): A coupled offshore-onshore model. *Mar Geol*, 2010, 268: 43–54
- 73 Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, et al. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia. *Radiocarbon*, 2002, 44: 167–180
- 74 Blaauw M, Christen J A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Anal*, 2011, 6: 457–474
- 75 Minoura K, Nakaya S. Traces of tsunami preserved in inter-tidal lacustrine and marsh deposits: Some examples from northeast Japan. *J Geol*, 1991, 99: 265–287
- 76 Chagué-Goff C. Chemical signatures of palaeotsunamis: A forgotten proxy? *Mar Geol*, 2010, 271: 67–71

- 77 Carlson A E, Stoner J S, Donnelly J P, et al. Response of the southern Greenland Ice Sheet during the last two deglaciations. *Geology*, 2008, 36: 359–362
- 78 Zhao Y Y, Yan M C. Chemical element abundance in shallow sea sediments of China (in Chinese). *Sci Chin B Ser B*, 1993, 23: 1084–1090 [赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物化学元素丰度. *中国科学B辑*, 1993, 23: 1084–1090]
- 79 Wei G, Liu Y, Li X, et al. Climatic impact on Al, K, Sc and Ti in marine sediments: Evidence from ODP Site 1144, South China Sea. *Geochem J*, 2003, 37: 593–602
- 80 Sun Y, Wu F, Clemens S C, et al. Processes controlling the geochemical composition of the South China Sea sediments during the last climatic cycle. *Chem Geol*, 2008, 257: 240–246
- 81 Yap W, Switzer A D, Gouramanis C, et al. Environmental DNA signatures distinguish between tsunami and storm deposition in overwash sand. *Commun Earth Environ*, 2021, 2: 129
- 82 Chagué-Goff C, Dawson S, Goff J R, et al. A tsunami (ca. 6300 years BP) and other Holocene environmental changes, northern Hawke's Bay, New Zealand. *Sediment Geol*, 2002, 150: 89–102
- 83 Bondevik S, Svendsen J I, Johnsen G, et al. The Storegga tsunami along the Norwegian coast, its age and run up. *Boreas*, 1997, 26: 29–53
- 84 Ishizawa T, Goto K, Yokoyama Y, et al. Dating tsunami deposits: Present knowledge and challenges. *Earth-Sci Rev*, 2020, 200: 102971
- 85 Ladlow C, Woodruff J D, Cook T L, et al. A fluvially derived flood deposit dating to the Kamikaze typhoons near Nagasaki, Japan. *Nat Hazards*, 2019, 99: 827–841
- 86 Chen Y G, Liu T K. Holocene uplift and subsidence along an active tectonic margin southwestern Taiwan. *Quat Sci Rev*, 2000, 19: 923–930
- 87 Tian Y, Fan D, Zhang X, et al. Event deposits of intense typhoons in the muddy wedge of the East China Sea over the past 150 years. *Mar Geol*, 2019, 410: 109–121
- 88 Zhu K. Holocene climatic changes in coastal regions of the Northern China Sea. Master Dissertation. Hong Kong: The University of Hong Kong, 2018
- 89 Rogozhin E A. Traces of ancient tsunamis in the coastal parts of the South China Sea. *Izv Atmos Ocean Phys*, 2017, 52: 683–696
- 90 Sun L G, Liu X D, Zhao S P, et al. Sedimentary records: Catastrophic marine flooding event occurred on Dongdao Island of South China Sea around 1024 AD (in Chinese). *J Univ Sci Technol Chin*, 2007, 37: 986–994 [孙立广, 刘晓东, 赵三平, 等. 记录: 1024 AD前后南中国海最强烈的灾难事件. *中国科学技术大学学报*, 2007, 37: 986–994]
- 91 Zong Y, Yu F, Huang G, et al. Sedimentary evidence of Late Holocene human activity in the Pearl River Delta, China. *Earth Surf Process Landf*, 2010, 35: 1095–1102
- 92 Kong D. Climatic changes in the northern South China Sea since the last glacial maximum. Doctor Dissertation. Hong Kong: The University of Hong Kong, 2015
- 93 Yang X, Yang J, Su Z, et al. Paleosecular variations refining the chronology of the sediments from the Pearl River Delta, southern China. *Holocene*, 2013, 23: 635–644
- 94 Zhao X W, Luo C X, Chen S X, et al. Late Quaternary evolution history shown by Borehole ZK13 in Pearl River Delta, based on chronology and micropaleontology (in Chinese). *Geol Bull China*, 2016, 35: 1724–1733 [赵信文, 罗传秀, 陈双喜, 等. 基于珠江三角洲ZK13孔年代和微体古生物重建的晚第四纪环境演化历史. *地质通报*, 2016, 35: 1724–1733]
- 95 Dong J X, Li T, Hou J M, et al. The characteristics of temporal and spatial distribution of storm surge in Guangdong Province and storm surge hazard study at Yangjiang City (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 2014, 36: 83–93 [董剑希, 李涛, 侯京明, 等. 广东省风暴潮时空分布特征及重点城市风暴潮风险研究. *海洋学报*, 2014, 36: 83–93]
- 96 Wu L, Zhang H, Chen J M, et al. Characteristics of tropical cyclone activity over the South China Sea: Local and nonlocal tropical cyclones. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2020, 31: 261–271
- 97 Yin C T, Zhang J S, Xiong M J, et al. Trend analysis of typhoon and storm surge disaster on the South China Sea coast of China (in Chinese). *J Trop Oceanogr*, 2019, 38: 35–42 [殷成团, 张金善, 熊梦婕, 等. 我国南海沿海台风及暴雨灾害趋势分析. *热带海洋学报*, 2019, 38: 35–42]
- 98 Zhang H Y. Spatio-temporal distribution of typhoon storm surge along the South China Sea coast (in Chinese). *Mar Forecasts*, 2019, 36: 1–8 [张海燕. 南海区台风风暴潮时空分布特征. *海洋预报*, 2019, 36: 1–8]
- 99 Li L, Switzer A D, Wang Y, et al. What caused the mysterious eighteenth century tsunami that struck the southwest Taiwan coast? *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 8498–8506
- 100 Wang X, Liu P L F. An analysis of 2004 Sumatra earthquake fault plane mechanisms and Indian Ocean tsunami. *J Hydraul Res*, 2006, 44: 147–154
- 101 Raj J K. Tsunami threat to coastal areas of Sabah, East Malaysia. *Bull Geol Soc Malays*, 2007, 53: 51–57
- 102 Okal E A, Synolakis C E, Kalligeris N. Tsunami simulations for regional sources in the South China and adjoining seas. *Pure Appl Geophys*, 2011, 168: 1153–1173
- 103 Sun Q, Wang Q, Shi F, et al. Runup of landslide-generated tsunamis controlled by paleogeography and sea-level change. *Commun Earth Environ*,

- 2022, 3: 244
- 104 Gusiakov V K. Tsunami history: Recorded. *Sea*, 2009, 15: 23–53
 - 105 Qiu Q, Li L, Hsu Y J, et al. Revised earthquake sources along Manila trench for tsunami hazard assessment in the South China Sea. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2019, 19: 1565–1583
 - 106 Xu H L, Qiu X L, Zhao M H, et al. Crustal structure and source structure of the central area of the Nanao Earthquake ($M=7.5$) in the northeast South China Sea (in Chinese). *Chin Sci Bull (Chin Ver)*, 2006, 51(Suppl II): 83–91 [徐辉龙, 丘学林, 赵明辉, 等. 南海东北部南澳大地震 ($M=7.5$)震中区的地壳结构特征与震源构造. *科学通报*, 2006, 51(增刊II): 83–91]
 - 107 Zhao M H, Qiu X L, Xia K Y, et al. The situation and prospect of the research on the Binhai fault of NE South China Sea (in Chinese). *South China J Seismol*, 2003, (1): 20–27 [赵明辉, 丘学林, 夏戡原, 等. 南海东北部滨海断裂带的研究现状与展望. *华南地震*, 2003, (1): 20–27]
 - 108 Li L L, Li F T, Qiu Q, et al. Tsunami simulation of the 1918 Nan’ao earthquake and its implication (in Chinese). *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni*, 2022, 61: 27–38 [李琳琳, 李发淳, 邱强, 等. 1918年南澳地震海啸影响模拟及其警示. *中山大学学报(自然科学版)*, 2022, 61: 27–38]
 - 109 Hsu Y J, Yu S B, Loveless J P, et al. Interseismic deformation and moment deficit along the Manila subduction zone and the Philippine Fault system. *J Geophys Res Solid Earth*, 2016, 121: 7639–7665
 - 110 Hsu Y J, Yu S B, Song T R A, et al. Plate coupling along the Manila subduction zone between Taiwan and northern Luzon. *J Asian Earth Sci*, 2012, 51: 98–108
 - 111 McCaffrey R. Global frequency of magnitude 9 earthquakes. *Geology*, 2008, 36: 263–266
 - 112 Yokota Y, Ishikawa T, Watanabe S, et al. Seafloor geodetic constraints on interplate coupling of the Nankai Trough megathrust zone. *Nature*, 2016, 534: 374–377
 - 113 Chen X F, Wu Z L, Shi Y L, et al. Deepen the research on mechanisms and forecast of continental strong earthquakes (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 1347–1351 [陈晓非, 吴忠良, 石耀霖, 等. 深化大陆强震机理与预测研究. *科学通报*, 2022, 67: 1347–1351]
 - 114 Li L, Switzer A D, Chan C H, et al. How heterogeneous coseismic slip affects regional probabilistic tsunami hazard assessment: A case study in the South China Sea. *J Geophys Res Solid Earth*, 2016, 121: 6250–6272

补充材料

- 表S1 B01岩芯样品粒度分析结果
 表S2 D02岩芯样品粒度分析结果
 表S3 B01岩芯样品主量及微量元素分析结果
 表S4 D02岩芯样品主量及微量元素分析结果
 表S5 B01岩芯元素含量相关性和显著性
 表S6 D02岩芯元素含量相关性和显著性
 表S7 B01岩芯主成分分析成分矩阵结果

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “南海北部海域北宋年间的古海啸记录及其潜在触发机制”

Paleo-tsunami sedimentary records and potential triggering mechanism during the Earlier Song Dynasty at the northern South China Sea

Yuming Wang¹, Yukun Wang², Linlin Li², Yang Xu², Xiaohong Chen^{1*} & Peizhen Zhang^{2*}

¹ Guangdong Engineering Technology Research Center of Water Security Regulation and Control for Southern China, School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

² Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamics and Geohazards, School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China

* Corresponding authors, E-mail: eescxh@mail.sysu.edu.cn; zhangpeizhen@mail.sysu.edu.cn

Identifying whether the northern South China Sea has historically experienced large-scale tsunami hazards and where these records have been preserved is of particular significance for the assessment and prevention of tsunami in the coastal zone. However, previous work has mostly focused on the study of event sediments from the onshore and isolated islands, less attention has been paid to the sediments in the northern shelf of South China Sea. This paper presents the particle size, elemental contents and ratios, and AMS ¹⁴C calibrated ages for the marine sediments from two onsite drillings at the offshore area of Haimen (Shantou, B01) and Sanmen (Huizhou, D02), respectively. In the B01 and D02 drillings, the “event sedimentary layers” are identified at the depth of ~195–228 and 72–105 cm, respectively. The two layers, with abundant “old and new” organisms, were instantaneously deposited at the AD 1048–1108 during the Earlier Song Dynasty. They show the normal-grained sedimentary sequence characterized by the coarser particle size, more abundant shell fragments and more variable skewness and kurtosis values than those of the overlain and underlain layers. The geochemical signatures of the sediments in the event layers are distinct from those of the overlain and underlain layers, in which Sr, Ba and Ca contents and Sr/Ba and Sr/Rb ratios sharply change. The geochemical abruptness is shown along either the interface or the vicinity of the “event sedimentary layers”. In combination with available data, the event sedimentary layers of the B01 and D02 drillings in northern Coastal South China Sea are believed to be resulted from the super-tsunami event occurred at the Earlier Song Dynasty (1048–1010). Such an event was temporally in accordance with those in the western Philippines, Penghu, Xisha and Nansha Islands, Nan’ao and Lantau (Hong Kong) islands, and the Pearl and Moyang River estuaries. Such a super-tsunami event extensively developed in the South China Sea might be mainly triggered by the $M_w > 8.0$ earthquake along the Manila Subduction Zone or the synchronous earthquakes along with the Littoral Fault Zone of the northern South China Sea at the Earlier Song Dynasty.

event sediments, AMS ¹⁴C dating, geochemical indicators, Earlier Song Dynasty, supra-tsunami hazard, northern shelf of South China Sea

doi: [10.1360/TB-2022-1137](https://doi.org/10.1360/TB-2022-1137)