

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.03.005

过去 5 万年来珠江流域火历史的南海沉积记录

裴文强^{1,2}, 万世明¹, 谭扬³, 瞿成利³, 殷学博¹, 李安春¹

(1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003)

摘要:黑碳作为燃烧产生的一种独特颗粒态含碳物质,广泛存在于土壤、沉积物、大气乃至极地冰雪中,因其物理化学性质高度稳定而常被用来恢复其源区火的历史。南海西北部陆架 K6-2 孔岩心沉积物的黏土矿物和常量元素组成分析表明,其细粒级陆源组分主要来自珠江,推测由广东沿岸流携带而来,从而岩心黑碳含量可以用来重建珠江流域火的演化历史。结果表明:(1)约 47~27 kaBP,该时期火活动较频繁,但约 35 kaBP 之后有降低趋势;(2)约 13~6 kaBP:火活动逐渐增多,尤其在 11~6 kaBP 火活动十分频繁;(3)约 6~4 kaBP,火活动强度整体较之前减弱。与温度、降水等气候指标对比发现,末次冰期以来珠江流域火活动强度明显受气候控制,即在温暖时期火发生较频繁,反之则较弱。进一步分析认为,升温是促进该地区火发生的主要因素,而降水的增多则可能对火起抑制作用。所以,在全球变暖背景下,推测珠江流域火活动将会趋于频繁。而自 4 kaBP 以来,人类活动(毁林开荒、刀耕火种、冶炼金属、战争等)的加强可能是导致珠江流域火灾频发的主因。

关键词:物源;黑碳;珠江流域;火历史;末次冰期;南海

中图分类号:P534.63 **文献标识码:**A **文章编号:**0256-1492(2017)03-0047-11

火作为独特且重要的生态环境因子,其波动与气候、植被、人类活动密切相关。因此,通过重建火历史可以研究古气候、古环境乃至人类文明的演化^[1]。同时,通过对地质时期火动态与古气候关系的研究,有助于预测火活动对当今全球气候变暖的响应趋势^[2-3]。但无论是用来指示古气候、古环境还是预测未来火动态,首要前提是明确火与气候之间的关系,而这种关系往往具有一定的区域性。过去数十年来,前人对世界多个地区进行了古火重建,并取得了一些重要认识。比如,赤道西太平洋沉积物中炭屑、黑碳记录显示,黑碳沉积通量的波动具有显著的 23 000 年岁差周期,火动态可能受低纬大气环流的控制^[4];西欧湖泊沉积物中多项火指标显示,火活动变化与北大西洋涛动和 Hadley 环流有关^[5];中国黄土剖面中黑碳记录揭示,末次冰期以来黑碳沉积速率存在 1 620 年和 1 040 年周期,表明黄土高原地区的火活动可能受千年尺度东亚夏季风的波动控制,而黑碳沉积速率在新仙女木事件、老仙女木事

件、Heinrich 事件等冷干气候时期均出现峰值,表明火活动在气候干冷时期更为频繁^[6]。就中国而言,关于古火历史的研究主要集中于中国北部的黄土沉积、局地湖泊和泥炭沉积^[7-10],而对于火灾频发的华南地区,由于缺乏较好的陆相沉积记录,相关研究却很少。

黑碳是指生物质或化石燃料不完全燃烧形成的具有高度热稳定性的含碳物质,主要包括烟炱、木炭、焦炭和石墨碳^[11]。这些物质在自然界中广泛存在。黑碳产生于燃烧过程、且具有相对稳定的物理化学性质,使其成为重建火历史的重要指标,并被广泛应用于黄土、冰心、泥炭、海洋沉积物等多种沉积介质的火重建当中。火灾产生的黑碳,少部分可成为气溶胶的组分,经空气远距离搬运至异地沉积,但绝大部分黑碳以吸附于其他矿物颗粒表面的方式残留于原地或附近的土壤,并可通过地表径流随其他沉积物一并输送至湖泊或海洋^[12]。对边缘海表层沉积物黑碳来源的研究表明,河流是黑碳由陆地进入海洋的主要途径^[13-15]。统计表明,仅密西西比河每年向海洋输入的黑碳通量可占海洋黑碳总输入量的 5%,说明了河流在黑碳运输过程中的重要地位^[16]。

珠江是华南地区的主要大河,每年向南海输送约 69×10^6 t 悬浮沉积物,约占南海陆源物质供给量的 14%^[17],对南海尤其是西北部陆架的沉积物输

基金项目:国家自然科学基金项目(41576034);亚洲大陆边缘“源-汇”过程与陆海相互作用项目(GASI-GEOGE-03)

作者简介:裴文强(1990—),男,硕士生,从事海洋沉积学和黑炭研究,E-mail: peiwenqiang@126.com

通讯作者:万世明(1978—),男,研究员,从事海洋沉积学研究,E-mail: wanshiming@qdio.ac.cn

收稿日期:2016-08-23;**改回日期:**2017-01-14. 蔡秋蓉编辑

人有重要贡献^[18]。因此,作为珠江的远端沉积,南海西北部陆架沉积物蕴含了珠江流域丰富的古环境、古气候信息。本文旨在通过黏土矿物和常微量元素等限定岩心物源,进而基于黑碳含量和碳同位素组成重建近5万年来珠江流域的火历史,并揭示其控制因素。

1 研究区概况

研究区位于南海西北部内陆架(图1)。南海北部周边河流众多,主要包括珠江、红河、台湾西南部的高屏溪,以及海南、吕宋等地区的小河流。该地区洋流复杂,包括广东沿岸流、南海暖流、黑潮分支、北太平洋深层水等(图1)。该地区沉积物潜在源区的多样性和流系的复杂性吸引了大批研究者对南海北部沉积物展开了一系列物源、搬运、沉积的研究^[19-33]。此外,由于其毗邻亚洲大陆,也使之成为重建地质时期东亚古气候、古环境、古植被的理想载体^[34-39]。

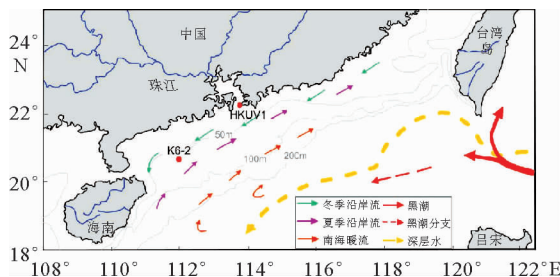


图1 南海北部流系^[22]、周边河流和相关站位

Fig. 1 The ocean currents, surrounding rivers in the northern South China Sea and related core locations

2 材料与方法

研究岩心 K6-2 柱样是由“科学一号”调查船于1985年11月6日执行区域地质调查时采用重力取样器获得。岩心位于南海西北部陆架(20.61°N、112.07°E),水深69 m。岩心长3.6 m。岩性整体较均一,以灰色砂质粉砂为主,并含有少许贝壳和有孔虫,以海相沉积为主。室内对岩心以5 cm(部分层位10~15 cm)间隔进行分样,总共获得53个样品,并用聚乙烯样品瓶密封,置于样品库低温保存。本文对所有样品进行了粒度、黏土矿物、化学元素、黑碳的测试分析,并选取3个层位进行 AMS¹⁴C 年代测定(表1)。

粒度测试只分析沉积物中的陆源组分。测试前取少量样品先后加入过量的15% H₂O₂和0.25 mol/L HCl于60℃水浴反应各半小时,以去除有机质和碳酸盐,离心清洗两次,再加少许蒸馏水超声分散1 min后在中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室的Cilas 940 L激光粒度仪上完成,仪器测试范围为0.3~2 000 μm,重复测量的相对误差小于2%。

黏土矿物分析采用黏土粒级组分(<2 μm)定向薄片的X射线衍射(XRD)方法^[40]。每个样品取大约2 g,先后加入30 mL 15% H₂O₂和25% CH₃COOH于65℃水浴反应各1 h,以去除有机质和碳酸盐,采用离心法提取<2 μm组分,用涂片法制成定向薄片,自然风干。XRD分析采用德国D8 advance X射线衍射仪,CuKα辐射,管压40 kV,管流40 mA,对60℃乙二醇蒸汽饱和12 h的样品薄片进行测试,部分样品进行自然条件和加热条件(490℃,2 h)测试,扫描角度3~30° 2θ,步长0.02°。黏土矿物的鉴定和解释主要依据3种测试条件下(自然片、乙二醇饱和片和加热片)获得的XRD叠加图谱的综合对比^[41],按Biscay等^[42]的方法计算4种黏土矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石和绿泥石)的相对含量。

常、微量元素测试是基于沉积物中<63 μm细粒级陆源组分。取2 g左右样品,加入过量10% H₂O₂浸泡12 h以去除有机质,过63 μm筛,将<63 μm部分加入过量0.25 mol/L HCl以去除碳酸盐,离心清洗并烘干后称取40 mg样品,用研钵研成粉末状并转移至消解罐,加入1.5 mL 49% HF、0.5 mL 70% HNO₃,放置于150℃的加热板上加热12 h以上,加入0.5 mL HClO₄继续150℃加热3 h(蒸干为止),蒸干以后加入1 mL 70% HNO₃、1 mL 蒸馏水继续150℃加热回溶12 h,随后加入蒸馏水,冲洗3遍消解罐,转移至塑料瓶内,继续加入蒸馏水至40 g左右,最后进行上机测试,常、微量元素测试分别由中科院海洋研究所的ICAP6300电感耦合等离子体光谱仪(ICP-AES)和电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成。测试中选取标准样品(GBW07315、GBW07316、BCR-2、BHVO-2)和空白样进行重复消解和测量,以监控分析质量,结果显示误差在标准值的±10%范围内,常量和微量元素的分析精度分别小于1%~2%和1%~3%。

黑碳提取参照Lim等提出的化学氧化法^[43]。称取1~3 g干样,加入15 mL 3 mol/L HCl以去除碳酸盐;加入15 mL 10 mol/L HF;1 mol/L HCl混

合液以去除大部分硅酸盐;加入 10 mL 0.1 mol/L $K_2Cr_2O_7$:2 mol/L H_2SO_4 的混合液以氧化非黑碳类有机质(干酪根等),剩余样品中的碳即为黑碳。称取约 400 μg 样品进行上机测试。黑碳含量和碳同位素测试分别在中国科学院海岸带研究所的 FLASH 2000 系列元素分析仪和 MAT 253 型稳定同位素比质谱仪上完成。重复测试结果显示,黑碳含量的相对误差在 $\pm 7\%$ 范围内;对已知碳同位素比值的标准样品重复测试表明,碳同位素比值的测量值与真实值之间的误差 $\leq \pm 0.2\%$ 。

挑取 3 个层位(20, 185 和 335 cm)沉积物中 $> 150 \mu m$ 的混合种浮游有孔虫进行 AMS¹⁴C 测年,测年由美国 Beta 实验室完成。基于海洋校正数据库 Marine13^[44] 和区域¹⁴C 储库年龄($\Delta R=18 \pm 37$)^[45],利用 CALIB7.0.4 软件对原始放射性碳年龄数据进行校正。测年结果见表 1。

表 1 K6-2 孔 AMS¹⁴C 年龄数据
Table 1 AMS¹⁴C dating of core K6-2

深度/cm	测试材料	¹⁴ C 年龄 /aBP	校正年龄 /aBP
20~25	混合种有孔虫	4 700±30	4 910
185~190	混合种有孔虫	10 880±40	12 250
335~345	混合种有孔虫	41 760±720	44 774

3 结果

测年结果显示,岩心底部 3.4 m 处 AMS¹⁴C 校正年龄约为 45 kaBP,岩心中部 1.9 m 处年代为 12 kaBP,而上部 0.2 m 处约为 5 kaBP,据此可计算出

末次冰期时(45~12 kaBP)岩心的平均沉积速率为 5 cm/ka,而冰消期-全新世(12 kaBP 以来)的平均沉积速率高达 16 cm/ka。此外,岩心自 5kaBP 以来沉积速率很低(约 4 cm/ka),也远低于冰消期-全新世的总体平均沉积速率。浅地层分析结果也揭示研究区上部为很薄的全新世泥质沉积^[46],与测年结果非常吻合。

K6-2 孔样品平均粒径约为 60 μm (图 2),属砂质粉砂沉积。根据矩法粒度参数的定义^[47],K6-2 岩心沉积物分选系数约为 1.8,属分选较差;偏度系数约为 0.8,属正偏;峰度系数约为 3,属很宽平类型。总体上看,K6-2 孔的粒度参数自下往上没有明显变化趋势。

岩心黏土矿物(图 2)以伊利石和蒙脱石为主,分别占 50% 和 30% 左右,其次为高岭石,约占 15%,绿泥石最少,仅占 6% 左右。其中,伊利石含量向上逐渐降低,高岭石含量自底部至 2 m 左右逐渐增加,随后往顶部整体降低,而蒙脱石的变化和高岭石大致相反。绿泥石含量虽有波动,但无明显整体变化趋势。伊利石化学风化指数一般大于 0.45,为富 Al 伊利石,形成于较强烈的化学风化环境。伊利石结晶度指数变化范围为 $0.25^\circ \sim 0.60^\circ \Delta 2\theta$,平均为 $0.30^\circ \Delta 2\theta$ 。伊利石化学风化指数和结晶度指数虽波动较大,但无明显整体变化趋势。

常量元素以 SiO_2 (未测)、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 为主, K_2O 、 MgO 、 Ca_2O 、 MnO 、 Na_2O 、 P_2O_5 、 TiO_2 含量较低(图 3)。自底部至约 0.7 m,常量元素含量相对稳定;0.7 m 以上,常量元素含量波动较大,其中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 有升高趋势,而 Ca_2O 有降低趋势。微量元素含量自底部至约 2 m 总体较稳定,

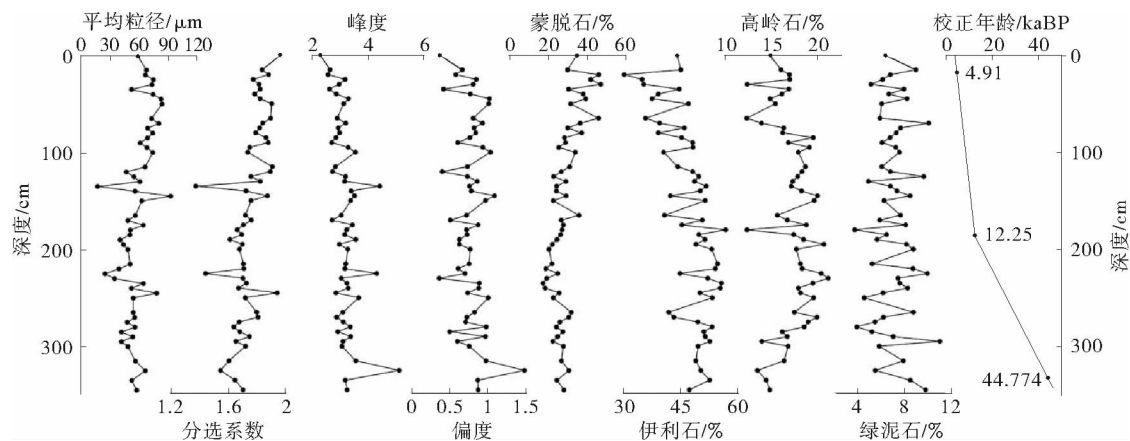


图 2 K6-2 孔粒度、黏土矿物分布曲线

Fig. 2 Grain size and mineral assemblages of Core K6-2

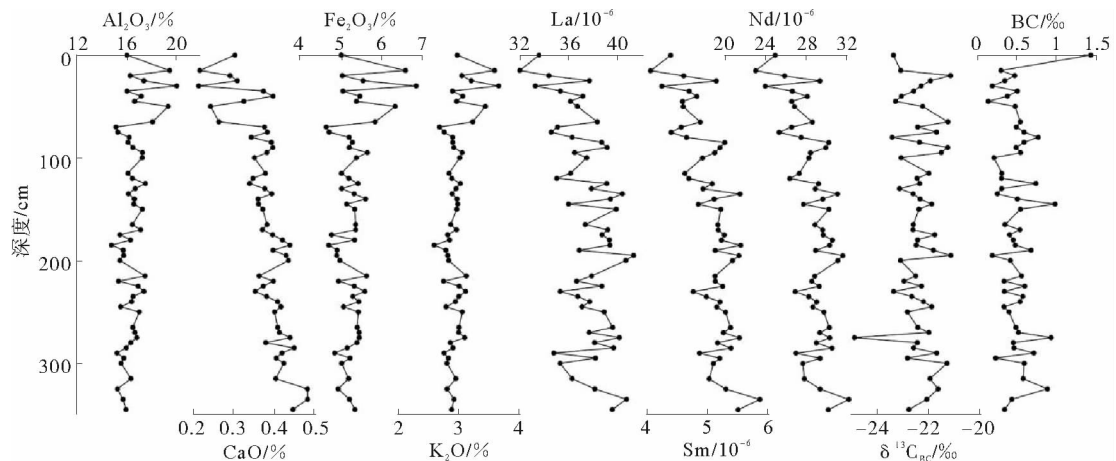


图3 K6-2孔部分长微量元素、黑碳碳同位素和黑碳含量分布曲线

Fig. 3 Some of major and trace elements, $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ and BC content of Core K6-2

2 m以上有降低趋势(图3)。沉积物的化学风化程度常用化学蚀变指数(CIA)表示,据公式 $\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \times 100$ ^[48] 计算得到K6-2岩心CIA平均值约75,为中等化学风化程度,相对低于现代珠江流域的表层沉积物CIA(70~90)^[23]。

岩心黑碳含量总体变化范围在0.2‰~1.0‰,与我国东海内陆架(0.50‰~1.29‰,CTO-375法提取黑碳)^[49]和渤海泥质区(0.24‰~0.49‰,CTO-375法提取黑碳)^[50]相当(图3),表明利用不同提取方法得到的黑碳含量是可以对比的。自岩心底部往上:3.6~2.7 m,黑碳含量总体较高;2.7~1.9 m,黑碳含量波动降低;1.9~0.5 m,黑碳含量虽有波动,但总体较之前升高;0.5~0 m,黑碳含量又有所降低,但最顶部层位出现一个黑碳含量的异常高值(1.5‰)。

黑碳碳同位素比值($\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$)总体分布在-23.5‰~-21.0‰,自下而上具体为:3.6~2.7 m,碳同位素比值较大;2.7~1.9 m,碳同位素比值逐渐减小;1.9~0 m,碳同位素比值较下部增大,虽波动较大,但无明显的升高或降低趋势。此外,由于生物质在燃烧过程中仅发生很小的碳同位素分馏^[51,52], C_3 和 C_4 型植物的比例可据下列黑碳碳同位素组成公式计算^[53]:

$$C_4\% = (\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}} - 1.8\text{‰} - \delta^{13}\text{C}_{\text{C}_3}) \times 100\% / (\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_4} - \delta^{13}\text{C}_{\text{C}_3})$$

式中 $C_4\%$ 为 C_4 型植物所占比例, $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_3}$ 为 C_3 型植物碳同位素组成(取均值-27.5‰), $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_4}$ 为 C_4 型植物碳同位素组成(取均值-12.6‰), $\delta^{13}\text{C}_{\text{BC}}$ 为黑碳碳同位素组成(-23.5‰~-21.0‰)。结

果表明,参与燃烧的 C_3 型植物和 C_4 型植物分别占68%~85%和15%~32%。

4 讨论

4.1 古环境演化

测年结果显示,K6-2岩心记录了南海西北部近5万年来的沉积历史。这期间海平面的大幅变化^[54]对珠江口及邻近陆架区的沉积演化具有重要影响。地震和钻孔资料揭示^[55],MIS3时期(57~29 kaBP,末次冰期),珠江口外海域形成一套高位体系域,为末次冰期间冰阶次高海平面时期形成的沉积;MIS2时期(29~14 kaBP,末次盛冰期(LGM)-冰消期),全球海平面经历了下降至最低(LGM时期)此后又上升的过程,珠江口外海域依次形成低位体系域和海侵体系域;MIS1时期(14 kaBP以来,末次冰消期-全新世),在14~7 kaBP,海平面迅速上升并继续形成海侵体系域,7 kaBP以来,海平面升至最高并趋于稳定,形成一套高位体系域。

LGM时期南海海平面最低降至-130 m,陆架大面积暴露,接受陆相沉积(河湖相或沼泽相)或出现沉积间断^[55]。考虑到K6-2孔取样水深69 m,即使扣除上部沉积物3.6 m,研究岩心位于现代海平面约73 m之下,所以研究区在LGM时期应该位于海平面之上。根据K6-2岩心的岩性、粒度特征总体较均一,生物化石也指示为海相沉积,不具有陆相沉积特征,推断K6-2岩心在LGM时期可能有沉积间断。

结合浮游有孔虫AMS¹⁴C测年结果,岩心下段(3.4 m)年龄约为45 kaBP,表明研究区在末次冰期

间冰阶的次高海平面时期是接受沉积的,而岩心中段(1.9 m)年龄约为 12 kaBP,表明此时海平面已上升至一定高度并淹没研究区。南海北部陆架其他相近水深的钻孔也记录到约 13 kaBP 以来的海相沉积^[56]。结合全球海平面变化曲线^[54],推断岩心在约 50~27 kaBP 和约 13 kaBP 以来 K6-2 位于海平面之下,这段时间的沉积记录是相对连续的。相比之下,可能缺失了 27~13 kaBP 低海平面时期的记录。遗憾的是,岩心分样工作是由前人完成的,缺失岩心描述记录,从而缺乏对岩心宏观特征的了解,尚不能指出不整合面的准确深度。

4.2 物源分析

利用海洋陆源沉积记录重建古环境、古气候的基本前提是明确其物质来源。前面已经提到,浅海陆架区的黑碳主要来自河流,这部分黑碳往往吸附于其他陆源碎屑表面并与之一同输送。因此,可以通过判别陆源碎屑物源的方法来间接推断黑碳的来源。前人研究表明,红河物质由于受到海南岛的阻挡,很难到达研究区^[57]。而对长江口-台湾海峡表层沉积物的研究也基本排除了长江对南海北部的物质贡献^[58]。所以珠江、台湾和吕宋河流是南海北部主要潜在源区。

黏土矿物组成常被用来限定物源。黏土矿物三角图(图 4a)显示,K6-2 样品落在台湾、珠江、吕宋三端元之间,似乎显示三者对研究区均有物质贡献。如 K6-2 岩心沉积物中含有较多的蒙脱石(30%~40%),对于南海北部如此高含量的蒙脱石,通常认为是由吕宋岛弧的河流提供的^[23]。但由于吕宋岛西部涡流的存在,可能限制了吕宋源物质向南海北部陆架的搬运^[59]。此外,吕宋岛河流的输沙量仅为 $16 \times 10^6 \text{ t}$ ^[60],较低的输沙量也难以用单一来源解释南海如此广布的蒙脱石高值区。而珠江口的 HKUV1 孔黏土矿物分析发现^[19],珠江源的黏土矿物组成在 2.5 kaBP 前后发生显著变化,在 2.5 kaBP 之前,黏土矿物中含有较多的蒙脱石,而 2.5 kaBP 以来,由于人类活动的加剧,如森林砍伐和土地开垦使得土壤侵蚀加剧、风化速率增强,使黏土矿物组成向着蒙脱石减少而高岭石增多的趋势变化,并最终趋近于现代珠江源黏土矿物组成特征(高含量的高岭石,几乎不含蒙脱石)。如黏土矿物三角图所示(图 4a),K6-2 与 HKUV1 岩心 2 500 aBP 之前的黏土矿物组成非常相似,因此,推断研究区高含量的蒙脱石并非来自吕宋岛弧,而是来自 2 500 aBP 之前的珠江。表层沉积物 Nd 同位素分析也揭示,

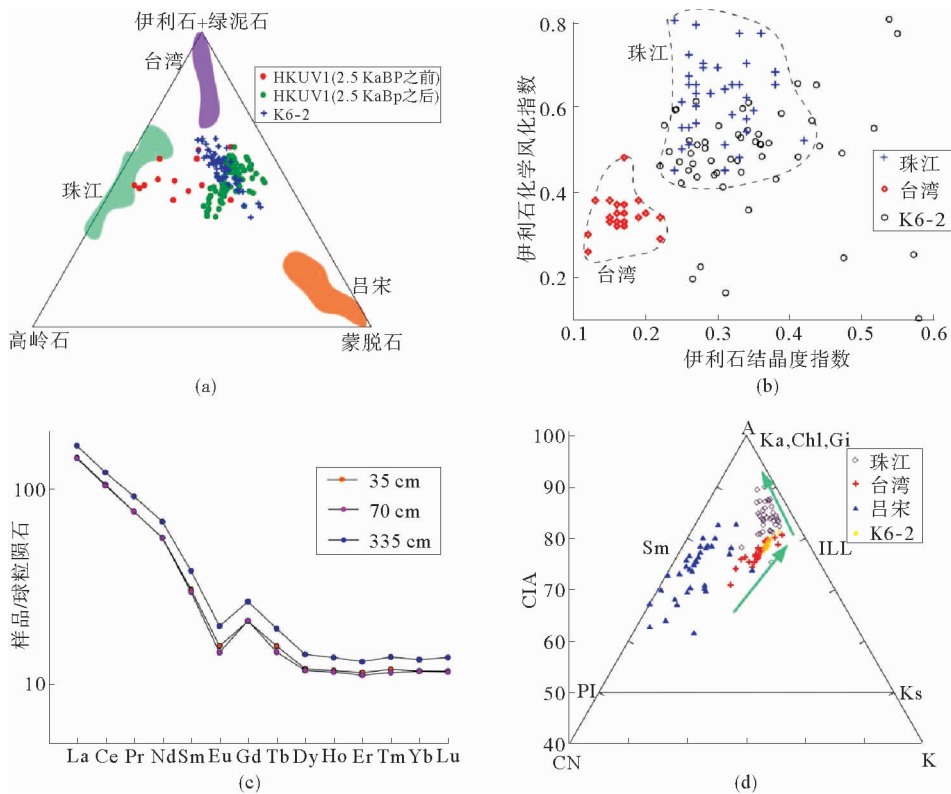
南海北部蒙脱石含量高值区的 ϵNd (约 -11.80)与珠江物质 ϵNd (约 -11.79)非常接近,而与吕宋岛弧物质的高 ϵNd (约 6.73)相差很远^[23]。此外,K6-2 黏土矿物组合中含有较多伊利石(50%左右)。珠江和台湾河流均能提供较丰富的伊利石,但由于形成条件的差异,珠江、台湾源伊利石在化学风化指数和结晶度方面存在差异,其中台湾来源伊利石化学风化指数和结晶度指数均明显低于珠江(如图 4b),暗示台湾岩石的物理风化速率远高于珠江流域。基于此二参数可区分伊利石来源^[61]。K6-2 与珠江和台湾源伊利石矿物学特征对比显示,K6-2 孔伊利石的化学风化指数和结晶度均与珠江源伊利石相似,表明研究区伊利石主要是珠江提供的(图 4b)。考虑到台湾河流黏土矿物以伊利石和绿泥石为主,且两者在运输过程中具有相似的性质,因此,可以认为台湾河流对研究区的伊利石和绿泥石没有重要贡献。

K6-2 孔 $<63 \mu\text{m}$ 细粒级陆源组分的稀土元素配分模式表现为强烈的轻稀土富集,并具有明显的 Eu 负异常,且不同层位稀土元素配分模式基本相同(图 4c),表明研究岩心近 5 万年来的沉积物物源是非常稳定的。A-CN-K 三角图显示,与台湾物质相比,其脱 Ca 和 Na 更为显著;与现代珠江物质相比,其脱 K 不太明显(图 4d),这与黏土矿物组成特征吻合。K/Al、K/Rb 通常用来指示化学风化强度^[19,36],比值越低暗示 K 元素的淋滤作用越强,从而指示更强的化学风化程度。过去 5 万年来,K6-2 孔 K/Al、K/Rb 比值与董哥洞石笋氧同位素记录的东亚夏季风强度具有较一致的变化(图 5),季风降水强盛时,化学风化程度较高,暗示季风降水变化对珠江流域化学风化强度的控制作用。

以上分析表明,K6-2 孔细粒物质主要来自珠江。珠江物质入海后,经西南向的广东沿岸流搬运,沉积于南海西北部陆架。南海北部陆架表层黏土矿物、重矿物分布及物质输移模型研究也证实了这一推论^[23,30,62]。虽然过去 5 万年来南海海平面及相应的古海洋格局经历了大幅变化,但广东沿岸流即使在冰期也可能一直存在^[38],因为其主要由冬季风驱动,而冰期冬季风更为强盛。海平面升降会引起沿岸流向岸或离岸迁移^[63],继而引起沉积中心的变动,导致研究区沉积速率变化。

4.3 近 5 万年来珠江流域火的历史及其与气候的关系

基于上述研究区细粒级组分主要来自珠江的结论,进而可以用 K6-2 孔的黑碳含量来反映珠江流



(a)黏土矿物三角图;(b)伊利石结晶度指数与化学风化指数;(c)稀土元素配分模式;(d)A-CN-K图
 (珠江、台湾数据、吕宋数据^[23], HKUV1数据^[19])
 (a)Ternary diagram of clay mineral composition; (b)Illite chemistry index and illite crystallinity;
 (c)REE distribution patterns; (d)A-CN-K ternary diagram

图4 K6-2孔与潜在源区对比

Fig.4 Comparison of Core K6-2 with potential source

域火的演变历史。根据黑碳含量并结合 AMS¹⁴C 测年,可将近 5 万年来的火历史划分为如下 3 个阶段(图 5)。(1)约 47~27 kaBP:黑碳含量整体偏高,指示该时期火活动较频繁,但自约 35 kaBP 之后有降低

趋势;(2)约 13~6 kaBP:火活动逐渐增多,尤其在 11~6 kaBP 火活动十分频繁,但也有个别火活动偏少时期;(3)约 6~4 kaBP,火活动整体较之前减少,但~4 kaBP 似乎是一个火活动异常频繁时期。

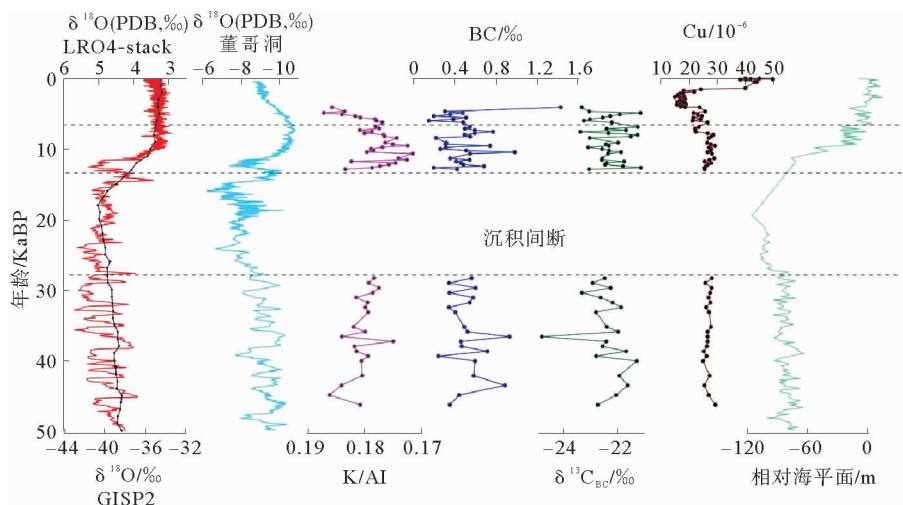


图5 K6-2孔化学元素比值、黑碳含量及碳同位素与气候指标(深海氧同位素^[65],格陵兰冰心氧同位素,董哥洞石笋氧同位素^[64]、相对海平面^[54]和珠江流域重金属 Cu 含量(2.5 kaBP 以来数据来自^[19])的对比(图中虚线示意不同阶段)

Fig.5 Comparison of element ratio and black carbon with climate proxies and Cu content

通常认为董哥洞石笋氧同位素^[64]可以反映东亚夏季风降水强度指标,而岩心 K/Al 比值主要指示流域化学风化强度,在一定程度上也可以暗示降水强度,更强的降水将导致更高的硅酸盐风化强度^[19]。格陵兰冰心氧同位素和深海氧同位素^[65]分别可以指示北半球和全球温度的变化,虽然不同地区对气候存在差异响应,但两者可大体作为珠江流域温度变化的参考指标。

根据黑碳含量所确定的 3 个火历史阶段,并结合多种气候指标,发现气候对珠江流域火历史有显著控制作用(图 5)。(1)约 47~27 kaBP,为末次冰期间冰阶,是冰期环境中的气候显著回返期,火活动总体较频繁。董哥洞石笋氧同位素显示该时期降水稍多,黄土高原诸多剖面也在该时期存在多层弱发育古土壤^[66],格陵兰冰心记录也显示当时温度比末次冰盛期稍高,湛江湖光岩玛珥湖孢粉记录也指示当时气候较温湿^[67]。但在该时段晚期,火活动有减少趋势,格陵兰冰心记录和董哥洞石笋氧同位素也分别指示温度降低和降水减少趋势,华南地区大九湖孢粉记录也显示 30 kaBP 开始,草甸发育,亚热带常绿阔叶林减少^[68]。推测该时段晚期为向末次冰盛期过渡阶段。(2)约 13~6 kaBP,为冰消期至中全新世,火活动很频繁。其中 13~11 kaBP,董哥洞石笋氧同位素显示降水持续增多,K/Al 比值也迅速升高,格陵兰冰心记录显示该时期温度大幅升高,湛江湖光岩玛珥湖孢粉记录也显示约 14 kaBP 开始,热带花粉含量急剧增加^[67],表明气候快速回暖。11~6 kaBP,各项指标均显示温度、降水维持在较高水平。(3)6~4 kaBP,为中全新世-晚全新世,火强度较之前减少。董哥洞石笋氧同位素和 K/Al 比值显示该时期降水开始减少,江西大湖孢粉记录也显示 6 kaBP 以来森林面积减少^[69],指示气候变冷干。综上可看出,在气候暖湿时期,珠江流域火较频繁,而当气候冷干时,火强度较弱。

前人对全球 679 个地点的碳屑数据与气候指标对比发现^[70]:温度升高有利于火发生;而降水与火的关系则相对复杂。当某地区降水较少时,植被(燃料)缺乏,降水量的适度增多会促进植被生长,增加燃料量,进而促进火发生;但当降水量达到一定程度后,植被(燃料)相对充足,降水继续增多会引起燃料湿度大大增加,抑制火发生,即适中降水量最有利于火发生。结合前述的温度指标、孢粉证据与火历史的关系以及 Daniau 等^[70]的结论,可以认为温度升高确实能够促进珠江流域火的产生。而火频繁时期也对应湿润气候,似乎暗示降水增多也能促进该地

区火发生,但华南地区为典型的季风气候,温度升高往往伴随降水增多,而火的频繁程度是两者叠加的结果,因此,不能简单地通过降水指标与火活动的对比来判断该地区降水与火的关系。考虑到珠江流域降水丰沛,即使在末次冰盛期,也仍以森林植被为主,所以珠江流域降水很可能超过了 Daniau 等提出的适中降水量的情况,即珠江流域降水增加引起的火抑制效应(增加燃料湿度)大于火促进效应(提高植被量)。黑碳含量的绝对值和变化幅度似乎也支持这种观点,比如在 11~6 kaBP,虽然温度、降水均增至最高,但黑碳含量总体上仅比末次冰期间冰阶晚期和中-晚全新世稍高,与末次冰期间冰阶早中期相当,这可能正是由于该时期降水较多对火产生的抑制作用叠加于升温对火产生的促进作用之上,导致该时期火活动仅有小幅增加。综上分析,珠江流域温度升高促进火发生,降水增多应该对火起抑制作用。就近 5 万年来珠江流域的火历史来看,温度对火的促进作用大于降水对火的抑制作用,所以温度控制了该地区火活动的总体变化趋势。根据这个规律,在全球变暖的气候背景下,珠江流域火活动可能会趋于频繁。

上述结论似乎与前人在南海地区的黑碳研究存在矛盾。比如,罗运利等^[71]对 ODP1144 孔近 3 个冰期-间冰期旋回碳屑记录的分析发现,冰期碳屑含量较间冰期高,暗示冰期干旱的气候更利于火的发生;孙湘君等^[72]对深海钻孔 17940 近 3.7 万年的碳屑分析也得出相似的结论。但他们均认为冰期陆架暴露,其上生长的草本植物是冰期火频繁发生的重要因素,而且这些近源碳屑也更容易被搬运至深海并形成碳屑高值^[71,72]。所以,ODP1144、17940 钻孔的碳屑记录可能受到近源碳屑供给量和搬运距离变化的影响,由于这两个站位水深较深(>2 000 m),导致其物质来源存在多元性(台湾、珠江、吕宋等),而且通过冬季风输入的亚洲内陆源黑碳可能相对增多^[73],因此,其反映的并非珠江流域的火历史。而 K6-2 孔水深较浅,珠江物质对其贡献显著,所以能更好地记录珠江流域火动态。

值得注意的是,K6-2 顶部层位(~4 kaBP)出现黑碳含量异常高值,其值相当于下部层位的 3~5 倍(图 5),暗示该时期火活动尤为频繁。诸多研究并未发现该时期存在大幅度的气候变化,如此显著的火活动增多很难用气候来解释,更可能是由于人类活动造成的。考古证据表明,珠江流域稻作文化在青铜时期(3.5~2.5 kaBP)开始发展,至秦汉时期得到普及,并逐渐替代了原有的捕捞文化^[74]。Zong

等^[35]对珠江三角洲演化过程的研究认为,约2 kaBP以来海岸线加速向海推进与人类活动的显著加强有关。K6-2及HKUV1孔Cu含量曲线显示(图5),2.5 kaBP之前Cu维持在较低水平(约 27×10^{-6}),2.5 kaBP以来Cu含量明显升高(达 45×10^{-6}),这也证实了此时人类活动的加强^[19]。毁林开荒、刀耕火种、冶炼金属等一系列人类活动可能是导致该时期珠江流域火灾频发的主因。在黄土高原和长江下游地区也有全新世以来人为火增多的报道^[9,75]。由于K6-2孔4 ka以来沉积速率很低(或顶部被剥蚀),尚需更完整的高分辨率记录来深入研究珠江流域人类活动与火动态的关系。

5 结论

南海西北部内陆架K6-2孔柱状样的黏土矿物组成、常微量元素组成均表明,细粒级陆源组分主要来自珠江,其黑碳含量从而可以在一定程度上重建珠江流域火动态变化。在过去5万年以来,珠江流域火活动明显受气候控制:在暖湿气候条件下火较频繁,反之火较少。进一步分析认为,升温是促进该地区火发生的主要因素,而降水的增多可能对火起抑制作用。所以,在全球变暖背景下,推测珠江流域火活动将会趋于频繁。而自4 kaBP以来,人类活动(毁林开荒、刀耕火种、冶炼金属、战争等)的加强可能是导致珠江流域火灾频发的主因。由于本文研究材料分辨率所限,珠江流域更为详细的火历史还需要未来对更合适的岩心进行高分辨率的研究工作。

致谢:感谢“科学一号”调查船1985年区域调查航次的全体科学家和船员的辛苦努力,也感谢审稿专家给予的宝贵意见和建议。

参考文献(References)

- [1] 谭志海,黄春长,庞奖励,等. 陇东黄土高原北部全新世野火历史的木炭屑记录[J]. 第四纪研究, 2008, 28(4): 733-738. [TAN Zhihai, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Charcoal recorded Holocene fire history in the northern part of the Longdong Loess Plateau[J]. Quaternary Science, 2008, 28(4): 733-738.]
- [2] Brunelle A, Minckley T A, Blissett S, et al. A~8000 year fire history from an Arizona/Sonora borderland ciénega[J]. Journal of Arid Environments, 2010, 74(4): 475-481.
- [3] Krawchuk M A, Moritz M A, Parisien M A, et al. Global pyrogeography: The current and future distribution of wildfire[J]. PLoS One, 2009, 4(4): e5102.
- [4] Thevenon F, Williamson D, Bard E, et al. Combining charcoal and elemental black carbon analysis in sedimentary archives: Implications for past fire regimes, the pyrogenic carbon cycle, and the human - climate interactions[J]. Global and Planetary Change, 2010, 72(4): 381-389.
- [5] Davis B A S, Stevenson A C. The 8.2 ka event and Early - Mid Holocene forests, fires and flooding in the Central Ebro Desert, NE Spain[J]. Quaternary Science Reviews, 2007, 26(13-14): 1695-1712.
- [6] Wang X, Ding Z L. Paleofires and the dynamics of carbon cycling in Chinese Loess Plateau over the last two glacial cycles[J]. Biogeosciences Discussions, 2011, 8(3): 4459-4492.
- [7] Wang X, Peng P A, Ding Z L. Black carbon records in Chinese Loess Plateau over the last two glacial cycles and implications for paleofires[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2005, 223(1-2): 9-19.
- [8] Tan Z H, Han Y M, Cao J J, et al. Holocene wildfire history and human activity from high-resolution charcoal and elemental black carbon records in the Guanzhong Basin of the Loess Plateau, China[J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 109: 76-87.
- [9] Wang X, Xiao J L, Cui L L, et al. Holocene changes in fire frequency in the Daihai Lake region (north-central China): Indications and implications for an important role of human activity[J]. Quaternary Science Reviews, 2013, 59: 18-29.
- [10] Han Y M, Marlon J R, Cao J J, et al. Holocene linkages between char, soot, biomass burning and climate from Lake Daihai, China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(4): GB4017.
- [11] Goldberg E D. Black Carbon in the Environment: Properties and Distribution[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [12] Forbes M S, Raison R J, Skjemstad J O. Formation, transformation and transport of black carbon (charcoal) in terrestrial and aquatic ecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2006, 370(1): 190-206.
- [13] Wang X C, Li A C. Preservation of black carbon in the shelf sediments of the East China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(22): 3155-3161.
- [14] Hu L M, Shi X F, Bai Y Z, et al. Distribution, input pathway and mass inventory of black carbon in sediments of the Gulf of Thailand, SE Asia[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, 170: 10-19.
- [15] 姜晓华,陈颖军,唐建辉,等. 渤海湾海岸带表层沉积物中黑碳的分布特征[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1617-1621. [JIANG Xiaohua, CHEN Yingjun, TANG Jianhui, et al. The distribution of black carbon in the surface sediments of coastal zone, Bohai Bay[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(7): 1617-1621.]
- [16] Mitra S, Bianchi T S, McKee B A, et al. Black carbon from the Mississippi River: Quantities, sources, and potential implications for the global carbon cycle[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(11): 2296-2302.

- [17] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the Oceans[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(1): 1-21.
- [18] Liu Z F, Colin C, Huang W, et al. Clay minerals in surface sediments of the Pearl River drainage basin and their contribution to the South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(8): 1101-1111.
- [19] Hu D K, Clift P D, Böning P, et al. Holocene evolution in weathering and erosion patterns in the Pearl River delta[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 14(7): 2349-2368.
- [20] Zong Y, Lloyd J M, Leng M J, et al. Reconstruction of Holocene monsoon history from the Pearl River Estuary, southern China, using diatoms and carbon isotope ratios[J]. *The Holocene*, 2006, 16(2): 251-263.
- [21] 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[J]. *The Holocene*, 2012, 22(6): 705-715.
- [22] Fang G H, Fang W D, Fang Y, et al. A survey of studies on the South China Sea upper ocean circulation[J]. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1998, 37(1): 1-16.
- [23] Liu Z F, Zhao Y L, Colin C, et al. Source-to-Sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 238-273.
- [24] Liu Z F, Tuo S T, Colin C, et al. Detrital fine-grained sediment contribution from Taiwan to the northern South China Sea and its relation to regional ocean circulation[J]. *Marine Geology*, 2008, 255(3-4): 149-155.
- [25] Liu Z F, Colin C, Li X J, et al. Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: Source and transport[J]. *Marine Geology*, 2010, 277(1-4): 48-60.
- [26] Liu J G, Chen M H, Chen Z, et al. Clay mineral distribution in surface sediments of the South China Sea and its significance for in sediment sources and transport[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(2): 407-415.
- [27] Ge Q, Liu J P, Xue Z, et al. Dispersal of the Zhujiang River (Pearl River) derived sediment in the Holocene[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(8): 1-9.
- [28] 陈丽蓉, 徐文强, 申顺喜, 等. 南海北部大陆架和北部湾沉积物中的矿物组合及其分布特征[J]. *海洋科学*, 1986, 10(3): 6-10. [CHEN Lirong, XU Wenqiang, SHEN Shunxi, et al. Mineral assemblages and their distribution pattern in the sediments from the north continental shelf of the South China Sea and the Beibu Gulf[J]. *Marine Sciences*, 1986, 10(3): 6-10.]
- [29] 贾建军, 高抒, 高建华, 等. 珠江口河流输沙、河口沉积与粒度信息之间的联系[J]. *海洋科学进展*, 2005, 23(3): 297-304. [JIA Jianjun, GAO Shu, GAO Jianhua, et al. Linkage of grain size information with river sediment discharge and estuarine deposition at the Pearl River Estuary[J]. *Advances in Marine Science*, 2005, 23(3): 297-304.]
- [30] 方建勇, 陈坚, 李云海, 等. 南海北部陆架表层沉积物重矿物分布特征及物源意义[J]. *应用海洋学报*, 2014, 33(1): 11-20. [FANG Jianyong, CHEN Jian, LI Yunhai, et al. Distribution characteristics of heavy minerals on the surface sediments in continental shelf of northern South China Sea and its provenance significance[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2014, 33(1): 11-20.]
- [31] Wan S M, Li A C, Clift P D, et al. Increased contribution of terrigenous supply from Taiwan to the northern South China Sea since 3 Ma[J]. *Marine Geology*, 2010, 278(1-4): 115-121.
- [32] Liu Z F, Alain T, Clemens S C, et al. Quaternary clay mineralogy in the northern South China Sea (ODP Site 1146): Implications for oceanic current transport and East Asian monsoon evolution [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46(12): 1223-1235.
- [33] 黄杰, 李安春, 万世明. 南海北部陆坡 50 ka 以来黏土矿物来源与运输机制分析[J]. *海洋科学*, 2013, 37(1): 17-22. [HUANG Jie, LI Anchun, WAN Shiming. Clay minerals in core sediments of the northern South China Sea slope since 50 ka and their indication to sources and transport[J]. *Marine Sciences*, 2013, 37(1): 17-22.]
- [34] Wan S M, Li A C, Clift P D, et al. Development of the East Asian monsoon; Mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(3-4): 561-582.
- [35] Zong Y, Yu F, Huang G, et al. Sedimentary evidence of Late Holocene human activity in the Pearl River delta, China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(9): 1095-1102.
- [36] Hu D K, Böning P, Köhler C M, et al. Deep sea records of the continental weathering and erosion response to East Asian monsoon intensification since 14 ka in the South China Sea[J]. *Chemical Geology*, 2012, 326-327: 1-18.
- [37] Ge Q, Chu F Y, Xue Z, et al. Paleoenvironmental records from the northern South China Sea since the Last Glacial Maximum[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(3): 46-62.
- [38] Liu Z F, Trentesaux A, Clemens S C, et al. Clay mineral assemblages in the northern South China Sea; Implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years [J]. *Marine Geology*, 2003, 201(1-3): 133-146.
- [39] Huang J, Li A C, Wan S M. Sensitive grain-size records of Holocene East Asian summer monsoon in sediments of northern South China Sea slope[J]. *Quaternary Research*, 2011, 75(3): 734-744.
- [40] 万世明, 李安春, 胥可辉, 等. 南海北部中新世以来粘土矿物特征及东亚古季风记录[J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2008, 33(3): 289-300. [WAN Shiming, LI Anchun, XU Kehui, et al. Characteristics of clay minerals in the Northern South China Sea and its implications for evolution of East Asian Monsoon since Miocene[J]. *Earth Science-Journal*

- of China University of Geosciences, 2008, 33(3): 289-300.]
- [41] Moore D M, Reynolds Jr R C. X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals[M]. 2nd ed. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.
- [42] Biscaye P E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans[J]. GSA Bulletin, 1965, 76(7): 803-832.
- [43] Lim B, Cachier H. Determination of black carbon by chemical oxidation and thermal treatment in recent marine and lake sediments and Cretaceous-Tertiary clays[J]. Chemical Geology, 1996, 131(1-4): 143-154.
- [44] Reimer P J, Bard E, Bayliss A, et al. IntCal13 and marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50 000 years cal BP[J]. Radiocarbon, 2013, 55(4): 1869-1887.
- [45] Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, et al. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia[J]. Radiocarbon, 2002, 44(1): 167-180.
- [46] Liu Y L, Gao S, Wang Y P, et al. Distal mud deposits associated with the Pearl River over the northwestern continental shelf of the South China Sea[J]. Marine Geology, 2014, 347: 43-57.
- [47] McManus J. Grain size determination and interpretation [M]//Tucker M. Techniques in Sedimentology. Oxford: Blackwell, 1988: 112-116.
- [48] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. Nature, 1982, 299(5885): 715-717.
- [49] 黄亮, 张国森, 吴莹, 等. 东海内陆架表层沉积物中黑碳的分布及来源 [J]. 地球与环境, 2012, 40(1): 63-69. [HUANG Liang, ZHANG Guosen, WU Ying, et al. Distribution and source of black carbon in the surface sediments of the inner continental shelf of the East China Sea[J]. Earth and Environment, 2012, 40(1): 63-69.]
- [50] 方引, 陈颖军, 林田, 等. 黑碳在渤海泥质区的百年沉积记录[J]. 海洋学报, 2014, 36(5): 98-106. [FANG Yin, CHEN Yingjun, LIN Tian, et al. One hundred year sedimentary record of black carbon from mud area in Bohai Sea, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2014, 36(5): 98-106.]
- [51] Bird M I, Gröcke D R. Determination of the abundance and carbon isotope composition of elemental carbon in sediments [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(16): 3413-3423.
- [52] Liu L, Song Y, Cui L L, et al. Stable carbon isotopic composition of black carbon in surface soil as a proxy for reconstructing vegetation on the Chinese Loess Plateau[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 388: 109-114.
- [53] Dzurec R S, Boutton T W, Caldwell M M, et al. Carbon isotope ratios of soil organic matter and their use in assessing community composition changes in Curlew Valley, Utah[J]. Oecologia, 1985, 66(1): 17-24.
- [54] Siddall M, Rohling E J, Almogi-Labin A, et al. Sea-level fluctuations during the last glacial cycle[J]. Nature, 2003, 423(6942): 853-858.
- [55] 韦成龙, 张珂, 余章馨, 等. 珠江口外海域与珠江三角洲晚更新世以来的地层层序对比[J]. 沉积学报, 2015, 33(4): 713-723. [WEI Chenglong, ZHANG Ke, YU Zhangxin, et al. Correlation of stratigraphic sequences between the Pearl River Delta and its offshore continental shelf since the Late Pleistocene[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(4): 713-723.]
- [56] Yim W W S, Huang G, Fontugne M R, et al. Postglacial sea-level changes in the northern South China Sea continental shelf: Evidence for a post-8200 calendar yr BP meltwater pulse[J]. Quaternary International, 2006, 145-146: 55-67.
- [57] Clift P D, Van Long H, Hinton R, et al. Evolving East Asian river systems reconstructed by trace element and Pb and Nd isotope variations in modern and ancient Red River-Song Hong sediments [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2008, 9(4): Q04039.
- [58] Xu K H, Milliman J D, Li A C, et al. Yangtze- and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(18): 2240-2256.
- [59] Liu J G, Xiang R, Chen M H, et al. Influence of the Kuroshio current intrusion on depositional environment in the Northern South China Sea: Evidence from surface sediment records[J]. Marine Geology, 2011, 285(1-4): 59-68.
- [60] Liu Z F, Zhao Y L, Colin C, et al. Chemical weathering in Luzon, Philippines from clay mineralogy and major-element geochemistry of river sediments[J]. Applied Geochemistry, 2009, 24(11): 2195-2205.
- [61] Li C S, Shi X F, Kao S J, et al. Clay mineral composition and their sources for the fluvial sediments of Taiwanese rivers [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(6): 673-681.
- [62] 杨毅, 徐艳东, 王发云, 等. 粤西沿岸流和物质输移模型研究及应用[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(19): 80-85. [YANG Yi, XU Yandong, WANG Fayun, et al. A numerical hydrodynamic and transport model in the West Coast of Guangdong Province[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(19): 80-85.]
- [63] 肖尚斌, 陈木宏, 陆钧, 等. 南海北部陆架柱状沉积物记录的残留沉积[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(3): 1-5. [XIAO Shangbin, CHEN Muhong, LU Jun, et al. New evidence for remnant deposits recorded by columnar sediments in the shelf of the northern South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2006, 26(3): 1-5.]
- [64] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial- and orbital-scale changes in the East Asian monsoon over the past 224,000 years[J]. Nature, 2008, 451(7182): 1090-1093.
- [65] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. Paleoceanography, 2005, 20(1): PA1003.
- [66] Xiao J L, Zheng H B, Zhao H. Variation of winter monsoon intensity on the Loess Plateau, Central China during the Last 130,000 years: Evidence from grain size distribution[J]. The Quaternary Research (Daiyonki-Kenkyu), 1992, 31(1): 13-19.

- [67] 吕厚远,刘嘉麒,储国强,等. 末次冰期以来湛江湖光岩玛珉湖孢粉记录及古环境变化[J]. 古生物学报, 2003, 42(2): 284-291. [LÜ Houyuan, LIU Jiaqi, CHU Guoqiang, et al. A study of pollen and environment in the Huguangyan Maar Lake since the last glaciation[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2003, 42(2): 284-291.]
- [68] 黄康有,郑卓,廖文波,等. 末次冰期以来中国亚热带地区古植被演替及其迁移的探讨[C]//中国古生物学会孢粉学会第九届二次学术年会论文摘要集. 南京:中国古生物学会, 2015. [HUANG Kangyou, ZHENG Zhuo, LIAO Wenbo, et al. A study on the succession of vegetation succession and its migration in subtropical region of China since the last glaciation[C]//The 2nd Annual Meeting of the Chinese Society of Paleontology. Nanjing: Palaeontological Society of China, 2015.]
- [69] 萧家仪,吕海波,周卫健,等. 末次盛冰期以来江西大湖孢粉植被与环境演变[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(6): 789-797. [XIAO Jiayi, Lü Haibo, ZHOU Weijian, et al. Evolution of vegetation and climate since the last glacial maximum recorded at Dahu peat site, South China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(8): 1209-1217.]
- [70] Daniou A L, Bartlein P J, Harrison S P, et al. Predictability of biomass burning in response to climate changes[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2012, 26(4): GB4007.
- [71] Luo Y L, Chen H C, Wu G X, et al. Records of natural fire and climate history during the last three glacial-interglacial cycles around the South China Sea[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2001, 44(10): 897-904.
- [72] Sun X J, Li X, Chen H C. Evidence for natural fire and climate history since 37 ka BP in the northern part of the South China Sea[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2000, 43(5): 487-493.
- [73] Jia G D, Peng P A, Zhao Q H, et al. Changes in terrestrial ecosystem since 30 Ma in East Asia: Stable isotope evidence from black carbon in the South China Sea[J]. Geology, 2003, 31(12): 1093-1096.
- [74] 翁齐浩. 珠江三角洲全新世环境变化与文化起源及传播的关系[J]. 地理科学, 1994, 14(1): 1-8. [WENG Qihao. The relationship between the environmental change of the Zhujiang River Delta in the Holocene and its cultural origins and propagation[J]. Scientia Geographica Sinica, 1994, 14(1): 1-8.]
- [75] Zong Y, Chen Z, Innes J B, et al. Fire and flood management of coastal swamp enabled first rice paddy cultivation in east China[J]. Nature, 2007, 449(7161): 459-462.

FIRE HISTORY IN PEARL RIVER BASIN SINCE 50 kaBP: SEDIMENT RECORDS FROM THE SOUTH CHINA SEA

PEI Wenqiang^{1,2}, WAN Shiming¹, TAN Yang³, QU Chengli³, YIN Xuebo¹, LI Anchun¹

(1. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Science, Yantai 264003)

Abstract: Black carbon (BC), a special kind of charred materials, is the product of incomplete combustion, which can be found in soils, sediments, atmosphere and ice cores. Due to its physical and chemical inertness, BC is often used as a proxy for wildfires reconstruction. Here we present a combined analysis of clay minerals, major and trace elements, black carbon content and isotopes of sediments from core K6-2 on the inner continental shelf of the northwestern South China Sea in order to constrain the sediment source and further reconstruct the fire history of South China. Clay mineral assemblages and trace elements composition suggest that the fine-grained silicate fractions of the sediment are mainly derived from Pearl River by the Guangdong offshore current. Therefore, BC of core K6-2 can be used to reconstruct fire history around the Pearl River Basin. From this study, we draw the following conclusions: (1) 47~27 kaBP: fire activities were relatively high, but showed a decrease trend since 35 kaBP. (2) 13~6 kaBP: fire activities were almost the highest except for some particular phases. (3) 6~4 kaBP: fire activities weakened than before. In general, there were more fires when climate was warmer and wetter, and less fires when climate became colder and drier, suggesting the dominant control of climate on fire dynamics since 50 kaBP. Further study indicates that an increase in temperature can always promote fires while an increase in precipitation may reduce fires. So fire activities around the region may be more frequent with global warming. However, intensified human activities such as deforestation for farmland, slash-and-burn cultivation, metal smelting and wars may play important roles in increasing fire activities since 4 kaBP.

Key words: sediment source; black carbon; Pearl River Basin; Fire history; the Last Glaciation; South China Sea