粤西琼东海域表层孢粉沉积的形成环境

童国榜^{①*}, 龙江平^②, 李团结^③, 肖霞云^④, 许冬^②, 陈亮^③, 童松梅^①

① 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061;

② 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012;

③ 国家海洋局南海工程勘察中心, 广州 510300;

④ 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008

* 联系人, E-mail: guobangtong@263.net

2012-11-22 收稿, 2013-07-17 接受, 2014-01-25 网络版发表

中国近海海洋综合调查与评价专项(908-01-ZH2)资助

摘要 研究区位于珠江口以西至琼州海峡及琼东海域, 是一个开放的海湾. 在本海域共采集了 400 个表层沉积物样品进行孢粉分析, 所有样品孢粉丰富. 根据孢粉总浓度(重量浓度)及木本植物、陆生草本植物和蕨类植物孢粉浓度的分异程度, 可将本海域的孢粉散布划分为 10 个孢粉区域. 此外, 根据局部孢粉浓度出现极高值与极低值的现象划分了 3 个孢粉浓度高值区和 3 个孢粉浓度低值区. 根据海底形态及动力情况, 可将 10 个孢粉区域归纳为 4 种孢粉沉积环境: 临岸带、近岸带、远岸带及海岛陡坡带. 研究表明, 临岸带(区域 I, VI, IX 及 X)沉积环境较为复杂, 存在孢粉高值区与孢粉低值区的分化, 该带草本植物花粉含量高, 达全区之冠. 近岸带(区域 II, III, V, VII)孢粉浓度中等, 木本植物花粉及蕨类植物孢子含量略有增多, 尤以松属花粉显著. 远岸带(区域 IV)孢粉浓度低, 组合中以蕨类植物孢子含量较多而突出. 海岛陡坡带(区域 VIII)孢粉组合中各组分含量中等, 具有各带混合的特性. 孢粉高值的产生与多水团的活动有关, 如: 高值区 A, 位于珠江冲淡水向西扩散过程中与陆架水混合锋面带处; 高值区 B 和 C, 在雷州半岛以东海域的逆时针环流(低速带)处. 孢粉浓度低值区与波浪、潮流活跃有关, 如: 雷州半岛沿岸波浪强烈冲刷区(区 D), 琼州海峡东口强潮区(区 E), 及陡坡内潮、内波高发区(区 F).

关键词

表层孢粉
海洋沉积
沉积动力
海洋锋
粤西琼东海域

由于海洋沉积具有时间跨度长、沉积连续的特征, 海洋孢粉为更好地理解陆地植被对气候变化的响应提供了理想的数据. 最近几十年以来, 随着海洋钻探的发展, 海洋孢粉学研究有了显著的进展, 并出版了大量文献, 这些文献的研究成果覆盖了世界的主要海洋领域^[1-6]. 然而, 准确地解释海洋化石孢粉记录的关键是对海洋孢粉传输和沉积机制的理解. 由此, 海洋表层沉积物的孢粉研究也逐渐兴起. 在深水、近岸和河流或河口沉积物中孢粉散布的研究工作包括了 Muller^[7]在奥里诺科河三角洲和 Cross 等人^[8]在加

利福尼亚湾的开创性工作, 随后在太平洋^[9,10]、北大西洋^[11,12]和北美沿岸^[13]、西欧沿岸^[14]、非洲西北沿岸^[15-18]及地中海西部^[19]等地的研究工作. 这些研究基本表明, 海洋沉积物中孢粉的系统分布模式与陆源植物组成、花粉产量与散布、风、河流和海洋传播等环境和沉积因素有关, 而且总的来说, 孢粉一旦进入水中, 它们将像黏土和细粉砂大小(约 4~50 μm)的较小沉积颗粒一样运转, 即可以认为在海洋水域和沉积物中的孢粉也具有与这些颗粒相似的沉积机制^[20].

引用格式: 童国榜, 龙江平, 李团结, 等. 粤西琼东海域表层孢粉沉积的形成环境. 科学通报, 2014, 59: 687-700

Tong G B, Long J P, Li T J, et al. Sediment environment of surface pollen in sea area to the west of Guangdong and east of Hainan (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 687-700, doi: 10.1360/972012-1677

我国海洋孢粉研究工作开始于 20 世纪 70 年代. 先是王开发等人^[21-23]对我国黄海、东海和南海三大海域的海底表层沉积物进行了系统的、区域性的孢粉研究. 近年来, 杨蕉文等人^[24]、孙湘君等人^[25]、张玉兰等人^[26,27]、戴璐等人^[28]及罗传秀等人^[29-32]在东海、南海、太平洋海域以及海南岛周边、南海菲律宾沿岸等地区开展了相对较详细的海底表层沉积物的孢粉研究工作, 取得了大量的研究成果. 工作中显示孢粉进入海域后的分布格局与冬季的东北风及由它所驱动的洋流方向一致, 可见冬季风及洋流为花粉传播的主要动力. 从而较好地表述了南海孢粉的展布与花粉源区位置、季风、洋流等活动的关系. 南部海域几乎所有花粉类型的孢粉浓度均由沿岸向深海递减, 说明河流及沿岸流为花粉传播的主要动力^[29]. 南海深部海域的花粉主要来源于南部岛屿^[25]. 对多数属种来说陆地和水流为主要花粉来源区和重要传入方式^[28]. 作者近期在北部湾海域用孢粉浓度表示表层孢粉沉积状况的过程中, 证实孢粉的来源、沉积动力及海底地形等与孢粉的沉积分异密切相关^[32]. 本文将在前人认识的基础上, 进一步探讨与之相邻的粤西琼东海域在多种

海流作用下孢粉的沉积分异情况及特点等. 这些高密度的海洋表层沉积物的孢粉研究结果, 将有助于海洋化石孢粉记录的生物气候解释, 并能为本研究区海洋孢粉研究钻孔位置的选择提供参考意见.

1 研究区概况

粤西琼东海域表层孢粉工作范围东起川山群岛、西至雷州半岛东岸、北起粤南沿岸、南抵海南岛琼海市东部海域, 介于 $20.2^{\circ}\sim 21.7^{\circ}\text{N}$, $110.4^{\circ}\sim 112.8^{\circ}\text{E}$ 之间. 北部有潭江、绵江、漠阳江、鉴江流入; 西部有雷州半岛青年大运河注入; 西南部有海南岛南渡江及万泉河流入; 东北部与珠江口相邻(研究区外). 研究区水深一般小于 60 m, 海底地形平坦, 北高南低, 西高东低. 冬季盛行东北季风, 夏季盛行西南季风. 该海域陆缘植被概况为: 北部沿珠江流域山地为亚热带季雨常绿阔叶林、针叶林等^[33-35], 丘陵地区为亚热带草地, 平原地区为农作物种植区; 西部雷州半岛为热带、亚热带草地^[36]; 西南部海南岛为热带雨林、季雨林^[35]. 研究区的位置、周边主要河流及采样点情况详见图 1.

图 1 研究区概况图及采样点分布

本区主要海流有粤西沿岸流、南海暖流、南海黑潮分支。冬季,在东北季风驱动下,粤西形成稳定而较强的西南向沿岸流;夏季,珠江冲淡水扩展产生的斜压效应驱动西向沿岸流,在东南风特别是东风频率高的年份,夏季西向沿岸流更显著^[37,38]。夏季,当沿岸流到阳江市海陵岛附近被掺混而消失,而海陵岛至湛江湾海域的沿岸流,则是由陆架升涌的高盐水向北流动的加入,增强了海陵岛至湛江湾海域粤西沿岸流^[39]。粤西沿岸流受雷州半岛、海南岛等岸线地形限制,及风力、陆架环流、琼州海峡的水交换影响,在琼东汇入终年存在的逆时针环流(夏强冬弱)^[38]。南海暖流从海南岛东岸开始向东南流动。在琼东与雷州半岛以东海域,夏季西南季风驱动了较强的上升流。在湛江湾和琼州海峡的潮流作用比较强烈,且为垂直于岸的往复性流动^[39,40](图 2)。在南海北部陆坡海域,则有越来越多的观测表明,内潮与内波频繁,造成海底强流与泥沙运动。

2 研究方法

2008 年 4~8 月,国家海洋局南海分局与国家海洋局第二海洋研究所先后在南海北部粤西琼东海域开展了表层孢粉沉积调查工作。调查中采样站点成网格状分布(图 1),采样点水深一般 20~60 m,最大水深达 132 m。采样时使用蚌式取样器,各表层样品的取样深度<10 cm,共采集表层沉积物孢粉样品 400 个。孢粉样品采用氢氟酸方法进行实验室前处理,然后在超声波清洗槽中用孔径为 5 μm 的筛子过筛。若过筛后杂质含量高,则用比重 2.1 的碘化锌重液悬浮,最后将筛上物加甘油保存,待鉴定。为计算孢粉浓度,在样品称重后加入染色石松孢子作指示剂。孢粉鉴定和统计在 Olympus BX51 型生物显微镜下完成,统计的孢粉分别用浓度和百分比表示,浓度为重量浓度,单位为粒/克。孢粉的百分比按所有孢粉总数为基数计算。

图 2 夏季海流示意图

修改自文献[41]

3 研究结果

研究区 400 个样品的孢粉含量丰富, 大部分样品能统计到 500 多粒孢粉, 共鉴定统计到孢粉 248239 粒, 平均每样 621 粒, 总浓度平均为 2495 粒/克. 共发现 129 个孢粉类型, 其中木本植物花粉有 72 个, 其花粉含量平均为 22.4%; 草本植物花粉有 36 个, 花粉含量平均为 6.6%; 蕨类植物孢子 21 个, 孢子含量平均为 71.0%. 木本植物花粉主要类型有: 松属 (*Pinus*)、栲/石栲属 (*Castanopsis/Lithocarpus*)、常绿栎 (*Evergreen oaks*)、大戟科 (*Euphorbiaceae*)、杉科 (*Taxodiaceae*)、桑科 (*Moraceae*), 其次还有泪杉属 (*Dacrydium*)、阿丁枫属 (*Alitigia*)、杨梅属 (*Myrica*)、山茶科 (*Theaceae*)、金缕梅科 (*Hamamelidaceae*)、漆树科 (*Anacardiaceae*)、桃金娘科 (*Myrtaceae*)、无患子科 (*Sapindaceae*)、罗汉松/雪松属 (*Podocarpus/Cedrus*)、卫矛科 (*Celastraceae*)、冬青属 (*Ilex*)、紫金牛科 (*Guttiferae*)、五加科 (*Araliaceae*)、木犀科 (*Oleaceae*) 及竹节树属 (*Carallia*) 等. 草本植物花粉主要类型有: 禾本科 (*Gramineae*)、莎草科 (*Cyperaceae*)、蒿属 (*Artemisia*)、藜科 (*Chenopodiaceae*) 等, 其次还有苦苣苔科 (*Gesneriaceae*)、旋花科 (*Convolvulaceae*)、唇形科 (*Labiatae*) 等. 蕨类植物孢子主要类型有: 芒萁/鳞盖蕨属 (*Dicranopteris/Microlepria*)、水龙骨科 (*Polypodiaceae*)、蹄盖蕨科 (*Athyriaceae*) 及凤尾蕨属 (*Pteris*) 等, 其次还有金星蕨科 (*Thelypteridaceae*)、金毛狗属 (*Cibotium*)、海金沙属 (*Lygodium*)、里白属 (*Hicriopteris*) 及石松属 (*Lycopodium*) 等.

粤西海域表层孢粉浓度的散布情况见图 3. 从图 3(a) 可以看出: 本区孢粉总浓度值自北向南由高渐低; 自东向西经历有节律的高低变化. 再结合等值线的走势, 把浓度值相近的点归并为一个区域. 这样全区可划分 10 个孢粉区域, 分别用 I, II, III...X 表示 (图 3(a)). 各区域的孢粉浓度散布特征与孢粉百分比的组合情况 (图 4) 可简述如下.

孢粉区域 I: 位于川山群岛至海陵岛一线海域. 孢粉总浓度平均为 4047.3 ± 1644.2 粒/克, 最高达 7817.8 粒/克. 该区各植物的孢粉浓度在整个研究区仅低于孢粉区域 VI, 木本植物花粉百分含量及草本植物花粉的百分含量为全区较高, 分别为 25.4% 和 10.1%.

孢粉区域 II: 位于孢粉区域 I 以南, 孢粉总浓度

平均为 3022.3 ± 886.0 粒/克, 最高达 4374.4 粒/克. 该区的孢粉百分比组合中, 木本植物花粉百分含量较高, 平均为 21.5%, 其中松属花粉含量平均为 16.6%.

孢粉区域 III: 位于孢粉区域 II 以南, 孢粉总浓度平均为 1251.4 ± 487.7 粒/克, 最高达 2313.7 粒/克. 该区的孢粉百分比组合中, 蕨类植物孢粉百分含量较高, 平均为 76.4%, 其中芒萁/鳞盖蕨平均为 62.7%.

孢粉区域 IV: 位于孢粉区域 III 以南, 孢粉总浓度为 441.8 ± 102.7 粒/克, 最高达 696.1 粒/克. 该区的孢粉百分比组合中, 蕨类植物孢子含量为全区最高, 平均为 77.0%.

孢粉区域 V: 位于茂名市放鸡岛以南海域, 孢粉总浓度平均为 2125.0 ± 716.7 粒/克, 最高达 3420.0 粒/克. 该区的孢粉百分比组合中, 蕨类植物孢子含量较高, 平均为 76.9%, 其中芒萁/鳞盖蕨平均为 62.6%.

孢粉区域 VI: 位于茂名市水东港以南海域, 孢粉总浓度平均为 4766.3 ± 1321.5 粒/克, 最高达 7136.0 粒/克, 是整个研究区中总浓度最高. 该区的草本植物花粉百分含量非常显著, 平均为 7.1%.

孢粉区域 VII: 位于海南岛七洲洋东北(及南)海域, 孢粉总浓度平均为 2664.8 ± 1419.8 粒/克, 最高达 6437.9 粒/克. 该区的孢粉百分比组合中, 木本植物花粉及蕨类植物孢子含量较高, 平均分别为 22.8% 和 71.9%, 其中松属花粉含量增多, 达 16.6%.

孢粉区域 VIII: 位于海南岛琼海市以东海域, 孢粉总浓度平均为 1799.8 ± 989.4 粒/克, 最高达 4497.0 粒/克. 在孢粉百分比组合中, 各主要孢粉属种的百分含量均不突出, 仅草本植物蒿属花粉较高, 平均为 1.5%.

孢粉区域 IX: 位于湛江市东南海域及雷州湾, 孢粉总浓度平均为 1096.2 ± 910.2 粒/克, 最高达 2967.4 粒/克. 该区的孢粉百分比组合中, 木本植物花粉及草本植物花粉较高, 平均分别为 29.3% 和 10.9%. 红树林植物花粉及泪杉花粉百分含量相对较高, 分别为 0.33% 和 0.27%; 此外, 常绿栎/石栎/栲及典型热带亚热带树种 (主要包括大戟科、阿丁枫属、桑科、无患子科、漆树科、桃金娘科、杜英属 (*Elaeocarpus*)、茶茱萸科 (*Icacinaceae*)、天料木科 (*Samydaceae*)、藤黄科 (*Guttiferae*) 及苏木科 (*Caesalpinaceae*) 等 31 个科属类型) 花粉也有较高含量, 平均分别为 4.5% 及 3.5%.

孢粉区域 X: 位于琼州海峡东出口海域, 孢粉总浓度平均仅 202.9 ± 251.4 粒/克, 最高为 380.0 粒/克. 该区的孢粉百分比组合与孢粉区域 IX 相近, 木本植

图3 粤西海域各类植物的孢粉浓度散布图

(a) 孢粉总浓度、孢粉沉积区域(I, II, III……X)及A-A'剖面的位置; (b) 木本植物花粉; (c) 草本植物花粉; (d) 蕨类植物孢子. 单位: 粒/克

物花粉及草本植物花粉最高, 平均分别为 36.2%和 10.1%. 常绿栎/石栎/栲、泪杉的百分含量平均分别为 7.3%及 0.3%, 是全区之冠; 红树林植物及典型热带亚热带树种花粉含量也相对较高, 仅低于孢粉区域 IX, 其含量平均分别为 0.3%和 2.4%.

纵观全区, 孢粉散布有下列特点(图 4): (1) 陆地边缘区域(I 和 VI)孢粉总浓度平均值高(4047.3 和 4766.3 粒/克), 且草本植物花粉百分含量高 7.1%~

10.1%; (2) 远离岸边的区域(III, IV 和 VIII)蕨类植物孢粉百分含量较高(74.4%~77.0%), 主要类型为芒萁/鳞盖蕨(62.7%~65.5%); (3) 雷州半岛东海区域(X, IX)木本植物花粉百分含量最高(29.3%~36.2%), 常绿栎/石栎/栲、典型热带亚热带树及泪杉植物孢粉百分含量较高, 分别为 4.5%~7.3%, 2.4%~3.5%及 0.28%~0.35%.

由图 3 可见, 各区域浓度存在明显分异, 因此将总浓度>5000 粒/克的称之为孢粉沉积高值区; 另外,

图 4 10 个孢粉区域的主要孢粉类型图谱

将浓度<250 粒/克的称之为孢粉沉积低值区。图 5 显示了 6 个孢粉沉积区的位置, 其中 A, B, C 为孢粉沉积高值区, D, E, F 为孢粉沉积低值区。

根据沉积区主要孢粉类型图谱(图 6), 可简述各沉积区的孢粉组合特征如下。

孢粉高值区 A: 位于南鹏列岛至海陵岛一线以南海域, 呈串珠状分布, 孢粉总浓度平均值为 6544.4 ± 1225.0 粒/克, 最高可达 7817.8 粒/克。在孢粉百分比组合中, 草本植物花粉含量为各区次高值, 平均为 9.3%, 其中禾本科花粉含量突出, 平均为 5.7%; 松花粉含量也相对较高, 平均达 14.7%。

孢粉高值区 B: 位于水东港以南海域, 呈环状。孢粉总浓度平均为 6245.1 ± 790.9 粒/克, 最高达 7748.2 粒/克。在孢粉百分比组合中, 禾本科花粉含量较丰富, 平均为 3.9%; 松属及典型热带亚热带树种花粉含量也相对较高, 平均分别为 11.7% 和 1.3%。

孢粉高值区 C: 位于海南岛七洲列岛东北海域, 呈南北向条状展布。孢粉总浓度平均为 5983.1 ± 843.7 粒/克, 最高可达 8320.5 粒/克。在孢粉百分比组合中, 木本植物花粉及蕨类植物孢子含量丰富, 平均分别为 18.7% 和 79.2%, 均为全区之冠, 木本植物花粉以松属花粉含量最突出, 平均为 16.3%。

孢粉低值区 D: 位于湛江市东海岛附近海域, 总浓度平均为 102.2 ± 72.0 粒/克, 最高达 224.8 粒/克。

孢粉百分比组合中草本植物花粉含量最高, 平均为 15.0%; 常绿栎/石栎/栲属、泪杉及禾本科花粉含量也相对较高, 平均分别为 25.1%, 0.2% 及 6.2%。

孢粉低值区 E: 位于琼州海峡东口处, 总浓度平均为 24.2 ± 20.0 粒/克, 最高为 90.1 粒/克。孢粉百分比组合中木本植物花粉含量相对较高, 平均为 43.5%, 主要是松属(21.6%)、常绿栎/石栎/栲属(9.9%)及典型热带亚热带树种(2.0%)。

孢粉低值区 F: 位于本研究区东南角深水处(水深>67.0 m), 总浓度平均值为 308.0 ± 1.2 粒/克, 最高为 310.0 粒/克。孢粉百分比组合以蕨类植物孢子及木本植物花粉含量较丰富为特点, 主要是芒萁/鳞盖蕨属(62.9%)、蒿属(1.9%)及常绿栎/石栎/栲属(4.7%)含量较高。

上述孢粉散布的情况显示, 由北向南随离岸距离的增加孢粉浓度总体呈下降趋势; 孢粉浓度的快速突变主要发生在岸边及西部海流交互活跃区域。

4 讨论与结论

4.1 孢粉沉积与海岸关系

纵观全区, 孢粉沉积浓度随离岸距离的增加而呈现规律性的降低, 具体以剖面 A-A' 为例加以说明。剖面 A-A' 表示南北向离岸距离远近的一个随机剖面, 把该剖面经过的所有样点的孢粉总浓度及其主要孢粉类型的百分含量按顺序绘制图上(图 7)。剖面由北向南, 孢粉总浓度逐渐降低; 木本植物花粉波动地降低; 草本植物花粉呈下降趋势; 蕨类植物孢子含量呈增长趋势。禾本科、常绿栎及热带亚热带树种在北部最高, 向南波动地降低。蒿属及莎草科南、北偏高, 中部偏低(数值波动在 0.5%~2%)。

海洋表层孢粉的散布与离海岸远近关系密切。依据沉积环境的变化, 可以分为以下 4 个带。

临岸带。位于研究区北部和西部的环岸地带(区域 I, VI, IX 及 X, 见图 5), 水深一般为 0~30 m, 孢粉沉积分异强烈。在该带沿岸流及咸淡水交替活跃, 絮凝作用频发^[39,42~44], 孢粉易于堆积, 形成高值区(如在区域 I 中的孢粉沉积区 A); 但在波浪和潮流活动强烈的地段, 如湛江湾、琼州海峡及其东出口, 其潮流速度最大可超过 100 cm s^{-1} , 而且湛江湾海域还是波浪活动最强烈地段^[38,40], 孢粉不易堆积, 出现低值区(如在区域 IX, X 中的孢粉沉积区 D, E)。这表明

图 5 粤西海域孢粉沉积区位置与孢粉沉积环境分带图
A, B, C 为孢粉沉积高值区; D, E, F 为孢粉沉积低值区

图 7 剖面 A-A'上各样点孢粉总浓度与主要孢粉属种百分含量散布图

临岸地带由于水动力条件反差较大,孢粉堆积环境差异甚大.整个临岸带的孢粉组合特征为孢粉总浓度波动大(平均值为80~4766粒/克),孢粉组合类型丰富,以草本植物花粉含量高(7.1%~10.9%)而突出,其他成分视地理位置的不同而异.

近岸带.位于水深在30~60 m的地带,地形平缓,微向东南(外海)倾斜,海流活动频繁(如:区域Ⅱ,Ⅲ,Ⅴ,Ⅶ).孢粉沉积的总浓度中等,在1329~3022粒/克之间.孢粉组成中,草本植物花粉含量降低,木本植物花粉(19.3%~22.8%)及蕨类植物孢子(74.0%~76.9%)含量略有增加,尤以松属花粉(13.6%~16.6%)较显著.

远岸带.位于水深>60 m的斜坡地带(如:区域

Ⅳ).孢粉总浓度较低,平均值为 441.8 ± 202.7 粒/克.孢粉组合中以蕨类植物孢子含量达全区最高值而突出(平均为77.0%).值得指出的是本区水深、浪缓,一般认为孢粉沉积很平静.但不能忽视,在大陆斜坡地带,沙脊、沙波比联,有潮波发育^[45].近来的研究表明在南海陆坡上的沙波区,时有流速达 $30 \sim 77 \text{ cm s}^{-1}$ 的海底强流发生,对其流速序列的旋转功率频谱分析,揭示其具有内波流性质^[46].阵发性的内波能使铺设在深海区的电缆掏空.因此在远岸带出现孢粉沉积低值区可能与内波的活动有关.

岛屿陡坡带.位于海南岛的东坡(如:区域Ⅷ).由于海底地势陡峻,坡降大,水深由30多米迅速下

降到>100 m, 且夏季常伴有上升流. 因此, 孢粉总浓度不如临岸带高, 蕨类植物孢子含量不像远岸带的那么突出, 具有各带的混合特征, 即各类型孢粉含量处于中等状态.

4.2 孢粉源区及传播机制

本海域表层沉积的孢粉主要来源于我国两广地区(珠江流域)及海南岛的陆缘植物. 珠江流域的地带性植被为亚热带常绿阔叶林、针叶林及北热带季雨林, 平原地区主要为人工种植作物, 如水稻、甘蔗及果树等农业产品^[33,34]丘陵地区自然植被破坏后天然草地繁茂, 特别是先锋植物芒萁等蕨类植物迅速生长^[33]. 海南岛的自然植被为热带季雨林^[35].

大亚湾近岸海域表层沉积物的孢粉分析结果表明, 蕨类孢子占绝对优势, 其次是木本植物花粉, 而草本植物花粉含量较少, 这一结果总体上与岸区丘陵低地植被受人为干扰破坏后的表土孢粉组合特征一致^[30]. 蕨类孢子中以芒萁/鳞盖蕨孢子为主, 这可能由于两广及雷州半岛、海南岛等地的自然植被在人为破坏后大面积生长芒萁群落^[30,33]造成. 这说明海洋孢粉也能反映出陆缘植物的变化.

孢粉进入海域的主要通道是河流(也包括沿岸表流)及大气传播, 然而当孢粉进入海域后, 海流的搬运也不可或缺.

珠江水流带来的孢粉一部分在珠江河口沉积, 一部分向外海扩散, 还有一部分随着粤西、粤东沿岸流的运动向东和向西扩散. 本研究区东部的孢粉受珠江的影响显著(包括: 区域 I, II, III, IV). 本区西部(包括: 区域 VI, VII, IX, X)的孢粉主要来自北部的鉴江、雷州半岛的青年大运河, 此外还有海南岛的南流江及万泉河等将海南岛上热带季雨林的孢粉成分带入琼州海峡以东海域.

本区属季风气候地区, 大气气流是海洋花粉传播的一个重要动力^[29,31], 冬季风可以把东亚大陆大量花粉携带到东海陆架、南海北部^[25]及东菲律宾海等海域^[31], 西北非洲也类似^[15]. 大气传播花粉在粤西琼东海域主要表现于 2 方面: (1) 整个海域冬季受到东北风的作用, 使珠江流域及粤南沿岸的孢粉大量吹入, 并主要影响本海域中部(区域 II, III, 图 2(a)). 尤其是松属在珠江流域及粤南沿岸广泛分布, 其产量很高, 易于传播, 且在早春开花, 以至区域 II, III 松属花粉含量增高. (2) 夏季西南季风盛行, 可把

海南岛热带季雨林植物花粉成分沉降于本海域, 并主要影响茂名以西到琼州海峡一带的海域(区域 IX, X), 使其组合中的常绿栎及热带亚热带乔木树种花粉较其他区域高出 1 倍以上, 平均含量分别为 4.5%~7.3%和 2.4%~3.5%(图 4). 海流的搬运、沉积、再搬运、再沉积的作用也不可忽视, 这主要表现为: (1) 珠江河流出口后, 在沿岸流的作用下把剩余的孢粉带向它处, 另一方面在洪水季节, 珠江的高水位, 在冲淡水羽状锋作用下使孢粉向南扩散^[38], 孢粉传播范围取决于洪峰强弱、风力方向和大小、潮流以及河口上升流等动力要素制约. (2) 夏季来自南海北部的南海暖流可将南部海表层水中的孢粉搬运到北部海域沉积, 从而使区域 II, III 及 V 的孢粉组成复杂化. (3) 在七洲列岛东部海域存在一个南海北部上升流活动, 可把南海中下层水中的孢粉带上来. 该上升流分为 2 支, 一支向北流, 加入到琼东逆时针环流中, 另一支向东流^[47,48]与珠江冲淡水向西扩散的粤西流相遇^[37]. 在区域 V 的孢粉组合中有与南部(区域 VI)孢粉组合相近之处, 蕨类植物孢子含量高, 芒萁/鳞盖蕨尤为显著. 这是否表明深部沉积的孢粉被上升流带到浅部再沉积.

总之, 本区孢粉主要源于珠江流域植被、海南岛植被及沿岸草地植物成分. 传播途径主要是河流(包括沿岸表流)及大气环流, 其次还有海流的传播. 具体分析各部分孢粉的来源时, 差异是明显的. 东部(区域 I, II, III, IV)孢粉主要来自珠江, 为粤西沿岸流所输运. 中部(区域 V)孢粉主要来自粤西沿岸流西南分支所带来的珠江水及南海北部的上升流和南海暖流输运的外海水的孢粉. 西部(区域 VI, VII, IX, X)孢粉主要来自粤西南丘陵(鉴江)、雷州半岛及海南岛河(表)流带入的孢粉及夏季西南季风带入大量海南岛热带季雨林植物花粉(常绿栎/石栎/栲、典型热带亚热带树及泪杉等), 其次还有南海北部的上升流西北分支带入的深部水的孢粉(受到琼东逆时针涡流所搬运). 南部(区域 VIII)孢粉主要来自海南岛(万泉河)及海南岛东岸上升流、南海暖流带入的外海水的孢粉等. 一方面显示了珠江流域范围内生长了大量的芒萁植被, 另一方面说明了珠江水系是芒萁孢子传播的主要动力^[26].

4.3 孢粉散布与沉积物类型

从粤西近岸沉积物类型分布图(图 8(a))可知, 3 个

抱粉沉积高值区基本位于黏土质粉砂或粉砂质黏土的分布范围,而3个低值区基本上位于细砂的沉积分布范围^[40]。前者平均中值粒径 $\Phi > 6$ (< 0.0156 mm),分选差,重矿含量偏低。后者平均中值粒径 $\Phi < 4.5$ (> 0.0442 mm),分选性和磨圆度好,有机质含量低,重矿物种类较多,含量较高^[40]。从本项目最近研究成果的中值粒径分布图^[41](图 8(b))来看,两者结论基本一致,即抱粉沉积高值区基本位于平均中值粒径 $\Phi > 6$ 的区域,低值区基本位于平均中值粒径 $\Phi < 4.5$ 的区域。由此可见,抱粉进入本研究海域后,它们的沉积机制与细粉砂($4 \sim 16 \mu\text{m}$)和黏土($< 4 \mu\text{m}$)大小的颗粒相似,即细粉砂或黏土含量高的区域,其抱粉沉积浓度也高,反之亦然。

陈耀泰^[49]在研究珠江入海泥沙沉积过程中提出

图 8 研究区沉积物类型(a)与平均粒径分布图(b)

(a)修改自文献[40]

有 4 个高速沉积中心区,本研究发现抱粉存在 3 个高值沉积区,其中 B、C 区与陈耀泰研究珠江入海泥沙沉积过程中提出的泥沙高速沉积中心区Ⅳ基本一致。抱粉沉积高值区 A 则与朱成文^[50]的南海西北部近海沉积物类型分布图上黏土质粉砂区对应。

4.4 抱粉沉积区的动力环境

珠江水流出珠江口后在粤西沿岸流的作用下向西及西南方向流动,洪水期则向南流动增强,出现羽状锋^[38]。粤西沿岸流到上、下川岛附近时,水流遇阻减速,泥沙出现大量沉积,同时在絮凝作用下,抱粉也随泥沙沉淀。粤西沿岸流继续西行,当遇上漠阳江口南来的淡水时,出现咸淡水锋面,有利于化学絮凝作用的发生,同时高盐上升流的加入,进一步促进了在上、下川岛附近未聚沉的抱粉与细颗粒物质的继续沉积。抱粉沉积高值区 A 由东向西延伸呈串珠状的形态,显示了粤西沿岸流的西行轨迹。

抱粉沉积高值区 B、C 与泥沙高速沉积第Ⅳ中心区,均位于西部琼东逆时针环流区。该区环流范围宽广、流速缓慢,在它的作用下,一方面由于水体得以充分交混,泥沙浓度增加,悬浮体和溶解质大量落淤式絮凝沉降;另一方面,循环往复的水流作用使沉积物进行很好的簸选分异而出现环带状的分布^[49],从而形成泥沙高速沉积第Ⅳ中心。在悬浮物下沉的同时,抱粉也随之沉积,形成了抱粉沉积高值区 B、C。抱粉沉积高值区 B 呈环形,这环形可能与环流中心的涡旋上升流的活动有关,但是否反映了环流运动时的锋面位置,还有待进一步研究。抱粉沉积高值区 C 呈南北向展布,其位置与形状都和沉积物类型分布图中的粉砂质黏土区相吻合(图 8(a)),而且与上升流出现的位置相近(图 2)。根据海洋锋的作用分析,多个性质不同的水团相互作用时,在其间产生锋面带,锋面带上易于造成悬浮物聚沉;上升流是高盐度海水,与表层环流水及表层暖流水在盐度上相差很大,这也有利于抱粉的聚沉。

由此可见,抱粉要大量沉积,锋面带的存在是一个基本条件。只有当抱粉有条件凝聚成大颗粒时才得以沉积,否则,要使悬浮体浓度不断加大而出现聚沉^[32]。另外有时微体动、植物和鱼类的参与,也可加剧了这一层面处的物理化学、生物等的絮凝作用。抱粉与悬浮物,抱粉与微小生物之间,可以絮凝成大颗粒聚沉,也可以成为生物的饵料以排泄物的形式被

堆积下来,这在渔场尤为显著。

孢粉沉积低值区 D、E 和 F 分别位于湛江市东海岛附近海域、琼州海峡东口处及本研究区东南角深水区。在沉积物类型分布图中,这些低值区对应细砂、中粗砂,甚至砾砂。湛江湾海域波浪和潮流活动强烈,潮流速度最大可超过 100 cm s^{-1} ; 琼州海峡为一冲刷型海槽,存在较强的往复流,且流速很快,这 2 个区域都不易于沉积物沉积,以至出现孢粉沉积低值区。本研究区东南角深水区沙脊、沙波发育,时有潮波、内波发生,使孢粉不易沉积形成低值区 F。

海洋表层沉积物中孢粉浓度的沉积分异是与海洋动力环境的复杂、多变密不可分。孢粉与较小颗粒的碎屑物($<16 \mu\text{m}$)具有总体上相似的沉积机制,但又有它不同之处。除此之外,孢粉浓度沉积可能还受不同类型的孢粉存在形态、大小及比重上差异的影响,其传播方式和沉积速度也不同等。因此,沉积动力环境的微小差异也会导致不同的结果。即是说,孢粉颗粒沉积的细微过程还有待深入研究。

4.5 与已有研究成果的对比

从本文与北部湾表层孢粉沉积情况^[32]来看,其表层孢粉的数量及组合情况是随着孢粉源区位置的不同,海流的变化及海底情况的起伏而变异。因而对孢粉组合的描述不能仅停留在孢粉组合的划分和描述上。因此我们在对表层孢粉划分孢粉带的基础上,再划分孢粉高值区和低值区。这样能有目的地揭示一些极端的海洋动力环境,使我们对研究区孢粉的搬运、沉积、再搬运、再沉积有一个较为全面的认识。因此 2 个海域的孢粉源区、海流及海床各具特色,尤其是内波对开放型水域的影响不容忽视。

有利于孢粉沉积高值区形成的几种环境类型:

(1) 河口/沿岸地段。盐水与淡水频繁交替,盐水楔入

侵河口使细粒悬浮物通过絮凝作用形成絮凝胶体沉积。河流带来的孢粉除部分随海流带入海盆内,大部分在河口堆积。如钦江、防城河、南流江口处的北部湾孢粉沉积高值区 A^[32]及粤西孢粉沉积高值区 A。(2) 海床加大。如海流通过琼州海峡后过水断面突然展开,与沿岸流或潮流带来的咸水相汇,海流速度突然减缓,有利于泥沙及孢粉沉积(北部湾孢粉沉积高值区 D)^[32]。(3) 多水团相互作用。受多个性质不同的水团相互作用,其锋面带上易于造成悬浮物聚沉。如北部湾孢粉沉积高值区 B、C^[32]及粤西孢粉沉积高值区 C。(4) 环流地段。在环流作用下水体得以充分混,泥沙浓度增加,悬浮体和溶解质大量落淤和絮凝沉降。如粤西孢粉沉积高值区 B。

孢粉沉积低值区出现的几种环境类型: (1) 强潮流区。琼州海峡为一冲刷型海槽,最大潮流流速大于 2 m s^{-1} ^[39],海床处于冲刷状态。水动力增强不利于孢粉沉积。如北部湾孢粉沉积低值区 G^[32]。(2) 季风强烈冲刷区。北海市及雷州半岛西海岸,水深较浅,在夏季西南风作用下反复冲刷,孢粉不易沉积。如北部湾孢粉沉积低值区 E、F^[32]。(3) 波浪和潮流强烈活动区。如湛江湾海域及琼州海峡东出口,潮流速度最大可超过 100 cm s^{-1} ,悬浮物不易沉积,以至出现粤西孢粉沉积低值区 D、E。(4) 潮波、内波多发区。粤西东南角深水区沙脊、沙波发育,时有潮波、内波发生,使孢粉不易沉积,如粤西孢粉沉积低值区 F。

综上所述,珠江口以西至琼州海峡及琼东海域的不同海区由于受离岸远近不同、孢粉源区差异、沉积物类型不同以及不同沉积动力环境的影响,导致不同沉积区具有不同的孢粉浓度和孢粉组合特征。因此,本文高密度的海洋表层沉积物的孢粉研究结果,将有助于海洋化石孢粉记录的生物气候解释,并能为本研究区海洋孢粉研究钻孔位置的选择提供参考意见。

致谢

感谢国家海洋局 908-01-CJ16 和 908-01-CJ17 项目组全体工作人员在样品和数据采集过程中给予的帮助和支持,国家海洋局南海工程勘察中心夏华永教授对工作提出宝贵建议和帮助,中山大学郑卓教授在孢粉鉴定上给予指导以及中国地质科学院水文地质环境地质研究所参与孢粉鉴定人员李云岭、徐宁、朱青、陈国彦。

参考文献

- 1 Dupon L M, Marret F, Winn K. Land and sea correlation by means of terrestrial and marine palynomorphs from the equatorial East Atlantic: Phasing of SE trade winds and the oceanic productivity. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 1998, 142: 51–84
- 2 McGlone M S. A late Quaternary pollen record from marine core P69, southeastern North Island, New Zealand. *New Zeal J Geol Geop*, 2001, 44: 69–77

- 3 Sun X J, Luo Y L, Huang F, et al. Deep-sea pollen from the South China Sea: Pleistocene indicators of East Asian monsoon. *Mar Geol*, 2003, 201: 97–118
- 4 Hooghiemstra H, Lézine A-M, Leroy S, et al. Late Quaternary palynology in marine sediments: A synthesis of the understanding of pollen distribution patterns in the NW African setting. *Quat Int*, 2006, 148: 29–44
- 5 Naughton F, Sánchez Goñi M F, Desprat S, et al. Present-day and past (last 25000 years) marine pollen signal off western Iberia. *Mar Micropaleontol*, 2007, 62: 91–114
- 6 Montade V, Nebout N C, Chapron E, et al. Regional vegetation and climate changes during the last 13 kyr from a marine pollen record in Seno Reloncaví, southern Chile. *Rev Palaeobot Palynol*, 2012, 181: 11–21
- 7 Muller J. Palynology of recent Orinoco delta and shelf sediments. *Micropaleontology*, 1959, 5: 1–32
- 8 Cross A T, Thompson G G, Zaitzeff J B. Source and distribution of palynomorphs in bottom sediments, southern part of the Gulf of California. *Mar Geol*, 1966, 4: 467–524
- 9 Heusser L E, Balsam W L. Pollen distribution in the northeast Pacific Ocean. *Quat Res*, 1977, 7: 45–62
- 10 Crouch E M, Mildenhall D C, Neil H L. Distribution of organic-walled marine and Terrestrial Palynomorphs in surface sediments, offshore eastern New Zealand. *Mar Geol*, 2010, 208: 315–330
- 11 Brush G S, DeFries R S. Spatial distributions of pollen in surface sediments of the Potomac estuary. *Limnol Oceanogr*, 1981, 26: 295–309
- 12 Mudie P J. Pollen distribution in recent marine sediments, eastern Canada. *Can J Earth Sci*, 1982, 19: 729–747
- 13 Heusser L E. Pollen distribution in the bottom sediments of the western North Atlantic Ocean. *Mar Micropaleontol*, 1983/84, 8: 77–88
- 14 Chowdhury K. Distribution of recent and fossil palynomorphs in the south-eastern North Sea (German Bay). *Senckenberg Marit*, 1982, 14: 79–145
- 15 Hooghiemstra H, Agwu C O C. Distribution of palynomorphs in marine sediments: A record for seasonal wind patterns over NW Africa and adjacent Atlantic. *Geol Rundsch*, 1986, 75: 81–95
- 16 Hooghiemstra H, Agwu C O C, Beug H J. Pollen and spore distribution in recent marine sediments: A record of NW-African seasonal wind patterns and vegetation belts. *Meteor Forsch Ergebn C*, 1986, 40: 87–135
- 17 Dupont L M, Agwu C O C. Environmental control of pollen grain distribution patterns in the Gulf of Guinea and offshore NW-Africa. *Geol Rundsch*, 1991, 80: 567–589
- 18 Campo E V, Bengo M D. Mangrove palynology in recent marine sediments off Cameroon. *Mar Geol*, 2004, 208: 315–330
- 19 Beaudouin C, Suc J-P, Escarguel G, et al. The Significance of pollen signal in present-day marine Terrigenous sediments: The example of the Gulf of Lions (western Mediterranean Sea). *Geobios*, 2007, 40: 159–172
- 20 Heusser L E. Pollen distribution in marine sediments on the continental margin off northern California. *Mar Geol*, 1988, 80: 131–147
- 21 王开发, 王永吉, 徐家声, 等. 黄海沉积孢粉藻类组合. 北京: 海洋出版社, 1987. 9–23
- 22 王开发, 孙煜华, 张玉兰, 等. 东海沉积孢粉藻类组合. 北京: 海洋出版社, 1987. 10–27
- 23 王开发, 蒋浑, 张玉兰, 等. 南海及沿岸地区等四孢粉藻类与环境. 上海: 同济大学出版社, 1990. 53–110
- 24 杨蕉文, 陈学林. 杭州湾北岸潮滩沉积物中的孢子花粉. *海洋地质与第四纪地质*, 1985, 5: 101–108
- 25 孙湘君, 李邈. 南海现代花粉传播动力与途径在南北海域的差异. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1997, 41: 494–498
- 26 张玉兰, 张卫东, 王开发, 等. 南海东北部表层沉积的孢粉与陆缘植被关系的研究. *海洋通报*, 2002, 21: 28–36
- 27 张玉兰, 龙江平. 海南岛周边近海表层沉积中的孢粉及其周边植被的关系. *海洋学研究*, 2007, 25: 23–30
- 28 戴璐, 翁成郁, 陆钧, 等. 南海北部表层沉积物的孢粉分布及其传播机制. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32: 93–108
- 29 罗传秀, 陈木宏, 刘建国, 等. 广东沿海及海南岛东南部海底表层孢粉分布及其环境意义. *热带海洋学报*, 2012, 31: 55–61
- 30 陈炽新, 邓韞, 郑卓, 等. 香港-大亚湾近岸海域表层沉积物的孢粉分布规律. *热带海洋学报*, 2004, 23: 75–81
- 31 戴璐, 翁成郁. 西太平洋海域冬季花粉传播观测及其在东亚季风研究中的意义. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40: 893–902
- 32 童国榜, 陈亮, 龙江平, 等. 北部湾东部表层孢粉沉积特征及其沉积动力环境. *科学通报*, 2012, 57: 743–752
- 33 郑卓, Cour P, 邹和平, 等. 热带雨林的孢粉垂直分布规律——以海南岛现代孢粉雨为例. *古生物学报*, 2002, 41: 487–496
- 34 中国植被编辑委员会. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980. 868–902
- 35 广东省植物研究所. 广东省植被. 北京: 科学出版社, 1874. 41–247
- 36 Sun X J, Li X, Beug H-J. Pollen distribution in hemipelagic surface sediments of the South China Sea and its relation to modern vegetation distribution. *Mar Geol*, 1999, 156: 211–226
- 37 应秩甫. 粤西沿岸流及其沿岸沉积. *中山大学学报*, 1999, 38: 35–38
- 38 欧素英. 珠江口冲淡水扩展变化及机制研究. 博士学位论文. 广州: 中国科学院海洋研究所, 2005. 1–100
- 39 杨士瑛, 鲍献文, 陈长胜, 等. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制. *海洋学报*, 2003, 25: 1–8
- 40 陈耀泰. 粤西近岸泥沙沉积特征. *中山大学学报(自然科学版)论丛*, 1987, 70–75
- 41 陈亮, 许冬, 李团结. 粤西及琼东北海区悬浮体浓度及海水浊度特征分析. *热带海洋学报*, 2012, 31: 80–86

- 42 陈亮, 张玉芬, 李团结, 等. 珠江口及琼东北海区元素地球化学特征及物质来源. 沉积学报, 2013, 31: 130–138
- 43 陈达森, 陈波, 严金辉, 等. 琼州海峡余流场季节性变化特征. 海洋湖沼通报, 2006, 2: 13–17
- 44 鲍曼 M J, 埃萨阿斯 W E. 沿岸过程中的海洋锋. 北京: 海洋出版, 1986. 70–146
- 45 王文介. 南海北部的潮波传播与海底沙脊和沙波发育. 热带海洋, 2000, 19: 1–7
- 46 夏华永, 刘愉强, 杨阳. 南海北部沙波区海底强流的内波特征及其对沙波运动的影响. 热带海洋学报, 2009, 28: 15–22
- 47 吴日升, 李立. 南海上升流研究概述. 台湾海峡, 2003, 22: 269–277
- 48 于文泉. 南海北部上升流的初步探讨. 海洋科学, 1987, 6: 7–10
- 49 陈耀泰. 珠江入海泥沙的浓度和成分特征及其沉积扩散趋势. 中山大学学报(自然科学版), 1991, 105–113
- 50 朱成文. 南海西北部近海海底沉积物特征. 海洋地质研究, 1981, 1: 50–60

Sediment environment of surface pollen in sea area to the west of Guangdong and east of Hainan

TONG GuoBang¹, LONG JiangPing², LI TuanJie³, XIAO XiaYun⁴, XU Dong², CHEN Liang³ & TONG SongMei¹

¹ Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China;

² Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China;

³ South China Sea Marine Engineering Surveying Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China;

⁴ State Key Laboratory of Lake Science and Environments, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

The study area is an open gulf in the west of Pearl River Estuary, and to the Qiongzhou Strait and east coast of Hainan Island. Here, we palynologically analyzed 400 surface sediment samples collected from this sea area. All these samples contain abundant pollen and spores. According to concentration (weight concentrations) distributions of the total pollen, arboreal and terrestrial herbaceous pollen and fern spores, the study area can be divided into 10 pollen regions. In addition, three high-concentration and three low-concentration subregions can be distinguished within these pollen regions, with the consideration of extremely high values and/or low values of pollen concentrations. Based on the submarine topography and marine dynamic conditions, the 10 pollen regions are summarized as four types of depositional environment, namely, along-shore zone, nearshore zone, offshore zone and steep-slope zone of island. Our results show that depositional environment of along-shore zone (I, VI, IX and X pollen regions) is relatively complex with high-concentration and low-concentration subregions. Herb pollen percentages in the zone are the highest. The pollen concentration of nearshore zone (II, III, V, VII pollen regions) is moderately high, and pollen percentages of trees (especially *Pinus*) and ferns there increase slightly. The pollen concentration of offshore zone (IV pollen region) is low, and its pollen assemblage is highlighted by high percentages of herbs. In steep-slope zone of the island (VIII pollen region), pollen assemblages appear as a mixed characteristics of the other three zones with moderately high pollen percentages. High-concentration subregion is related to activities of water masses. For example, high-concentration subregion A is located in oceanic front belt where the Pearl River freshwater diffuses westward and mixes with the shelf seawater, and high-concentration subregions B and C in the counterclockwise circulation (the low-velocity zone) of the eastern water of Leizhou Peninsula. Low-concentration subregion is usually related to activities of wave and tidal. For instance, low-concentration subregion D is situated in a strong wave-erosion zone along the coast of Leizhou Peninsula, low-concentration subregion E in a strong tide zone in the east of Qiongzhou Strait, and low-concentration subregion F in a zone of frequent internal tides and waves near continental slope.

surface pollen assemblage, marine sediment, sediment dynamic, ocean front, sea area to the west of Guangdong and the east of Hainan

doi: 10.1360/972012-1677