科学通报 2012 年 第 57 卷 第 9 期：743 ~ 752
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

北部湾东部表层孢粉沉积特征及其沉积动力环境

童国榜[①], 陈亮[②], 龙江平[③], 李团结[②], 肖霞云[④], 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 国家海洋局南海工程勘察中心, 广州 510300;
③ 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012;
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
E-mail: guobangtong@263.net

2011-09-20 收稿, 2011-11-23 接受
中国近海海洋综合调查与评价专项(908-01-ZH2)和国家海洋公益性研究项目(200805063-3)资助

摘要 北部湾位于我国南海西北部, 是一个半封闭的海湾. 在其东部采集了 306 个表层沉积物样品, 对这些样品进行了孢粉分析. 据各类植物孢粉浓度(重量浓度)在空间散布的相似程度, 将全区孢粉组合划分为 5 个孢粉区域. 据孢粉区域中主要孢粉类型浓度分布的不均匀性, 又可划分出 4 个孢粉浓度高值区和 3 个孢粉浓度低值区. 孢粉浓度沉积的分异与孢粉的来源, 海流、潮流、波浪的搬运、沉积作用及海底地形等密切相关. 海湾东部海盆边部蕨类植物孢子偏高(东部), 松属等木本植物花粉向海盆中心逐渐增多; 环岸地带草本植物花粉偏高(北部). 对孢粉浓度高值区和低值区的沉积动力环境初步探讨认为, 河口是孢粉进入海盆的重要通道, 也是主要的沉积场所; 潮汐的往返运动, 在临岸地带的有利地段可以形成孢粉堆积. 海湾尺度的环流有利于孢粉的搬运, 但在多种海流交互作用的情况下, 往往会造成有利于孢粉堆积的环境. 本区东北部是海湾夏季风浪活动最强烈地带, 在风浪反复冲刷下孢粉不易沉积, 孢粉总浓度低. 在琼州海峡内, 潮流很强, 悬浮物难于沉降, 不利于孢粉沉积, 形成孢粉浓度的低值区.

关键词
北部湾
表层沉积
孢粉
沉积高值区
沉积动力环境

近年来, 海洋表层沉积物的孢粉研究相对增多, 主要侧重于讨论海域孢粉散布、传播、沉积及其与沿岸植被间的相互关系. Muller[1]较早对加勒比海海区的奥里诺科河口三角洲沿岸及近海区的表层沉积物进行了孢粉研究, 分析了源区位置与大气、水流传输作用对孢粉散布的影响; Melia[2], Hooghiemstra 和 Agwu[3], Hooghiemstra 等人[4], Dupont 等人[5], Campo 和 Bengo[6]先后对几内亚湾的孢粉散布及其与风和水流传输作用的关系进行了研究, 阐述了这些海区表层沉积物中主要孢粉属种的分布模式; Beaudouin 等人[7]对地中海西部利翁湾现代海洋陆源沉积物的孢粉意义进行了研究, 认为本区沉积物中的孢粉主要是由风传播带来, 沉积物中孢粉含量较低, 来自大陆架的再悬浮再沉积孢粉也有一定作用; Crouch 等人[8]对新西兰东部沿岸的 38 个海表沉积物样品的孢粉分布进行了研究, 在查塔姆上升流区, 被子植物占 10%左右, 这些生长在北部区域的植物花粉被亚热带表层流搬运到南部沉积. 我国早期有王开发等人[9,10]对黄海、东海, 杨蕉文等人[11]对杭州湾等海域表层孢粉进行了研究, 认为表层孢粉主要来源于中国东部陆缘植物. 孙湘君等人[12]对南海表层孢粉沉积研究指出冬季风及海流是孢粉传播的主要动力, 在古植被与古环境恢复中必须对松粉的巨大噪音予以注意. 张玉兰等人[13,14]对南海东北部及海南岛周边海域的表层孢粉进行了研究, 认为孢粉组合与陆缘地区植被的特征基本一致, 但又存在一些差异, 这与植物的花粉产量、海流、沉积物类型以及海底地貌有关. 这些海表沉积的孢粉研究结果, 为相应海区化石孢粉

英文版见: Tong G B, Chen L, Long J P, et al. Surface pollen distribution patterns in Beibu Gulf and corresponding sediment dynamics environment. Chin Sci Bull, 2012, 57: 902–911, doi: 10.1007/s11434-011-4912-2

记录的生物气候解释以及古植被与古环境的准确重建提供了参考.

北部湾位于我国南海的西北部, 是一个半封闭的大海湾. 深入了解这一海域的自然环境和资源情况, 有利于更好地保护环境、开发资源; 同时, 也将为本区第四纪环境分析及石油勘探中的环境解释提供依据. 对该区 306 个样点的表层沉积物孢粉分布规律的认识与沉积动力分析, 可为北部湾海区化石孢粉记录的生物气候解释提供依据, 进而为海-陆环境变化的对比提供证据.

1 研究区概况

北部湾东部海域表层孢粉工作范围东起雷州半岛, 西至北部湾海域中部, 北起南流江河口, 南抵海南岛北部海域, 介于 20.0°~21.6°N, 108.1°~110.4°E之间. 北部广西沿岸的河流有南流江、大风江、钦江、茅岭江、防城河、北仑河等; 西侧越南沿岸有红河流入; 南部海南岛有南渡江流入; 雷州半岛有雷州青年运河注入. 研究区内水深一般小于 60 m, 海底地形相对平坦, 具有北高南低, 东高西低的趋势. 冬季盛行东北季风, 夏季盛行西南季风. 研究区北岸的广西南部及东岸的雷州半岛一带植被为热带亚热带草地[15]; 南岸海南岛植被为热带雨林、季雨林; 西岸红河在越南境内植被类型为热带雨林、季雨林、耕地, 在中国境内元江一带为亚热带常绿阔叶林及亚热带针叶林[16]. 研究区的位置、周边主要河流及采样点情况, 详见图 1.

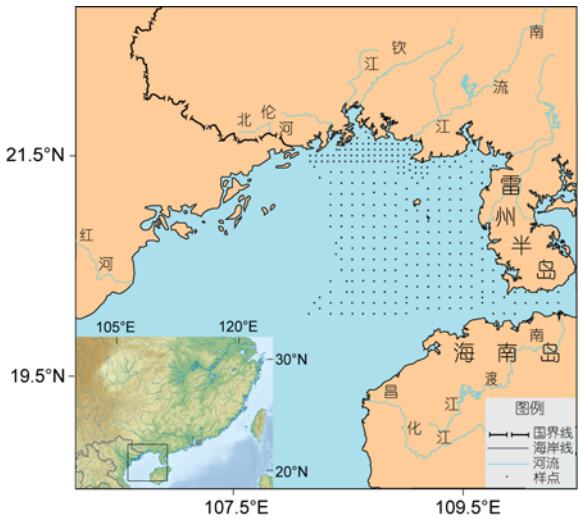

图 1 研究区概况图

北部湾海流主要有海湾尺度的气旋型环流、沿岸流、南海(上升流)及红河冷水团的东扩等四部分组成. 海湾尺度的环流一般认为北部湾冬季整体表现为逆时针环流, 风应力是该环流形成的主要因子; 但夏季的环流结构是顺时针还是逆时针尚有分歧, 即夏季环流是风生流占主要地位还是密度流? 近 10 年通过对北部湾的风生流和密度流的模拟, 比较春夏季冷水团及盐度的分布, 支持北部湾终年为逆时针环流的观点[17], 得出广西沿岸夏季余流的主导因子为密度梯度. 沿岸流在海南岛西岸为向北流, 经过雷州半岛至广西沿岸折向西. 海南岛以西海域自南向北存在一个冷水团, 将深层的低温高盐水带入表层[18]. 另外北部湾西岸越南红河等河流的冲淡水在北部湾北部逆时针环流作用下将低盐水带至北部湾中东部[19]. 特别要提到的还有东部从琼州海峡进入的高盐海流向北流动[20]. 这些海流的相互作用加强了本区气旋型环流, 同时也有利于孢粉在湾内的搬运和沉积.

2 研究方法

2007 年 3~6 月, 国家海洋局南海工程勘察中心及国家海洋局第二海洋研究所组织实施了北部湾东部区块的调查工作, 通过两个航次的工作, 采用蚌式采样器对北部湾东部海域 300 多个站位进行了表层沉积物取样, 各站点成网格状分布(图 1). 样品的采集深度小于 10 cm, 共采集表层沉积物孢粉样品 306 个, 对样品采用常规的氢氟酸方法处理[21]. 样品过筛在超声波清洗槽中用孔径为 5 μm 的筛子进行, 最后将筛上物加甘油保存, 待鉴定. 若过筛后杂质含量过高, 则用比重 2.1 的碘化锌重液悬浮. 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, 一般样品都能统计到 500 多粒孢粉. 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 grains/g. 陆生植物花粉的百分比, 以陆生植物花粉总数为基数计算; 而水生(包括湿生)草本植物花粉与蕨类植物孢子的百分比按所有孢粉总数为基数计算.

3 研究结果

在 306 个样品中共统计鉴定孢粉 200962 粒, 平均每样 657 粒, 其总浓度平均每样为 2653.2 grains/g, 分属 164 个孢粉类型. 其中, 木本植物花粉占 32.7%; 陆生草本植物花粉占 8.9%; 水生草本植物花粉占

0.2%; 蕨类植物孢子占 58.4%. 木本植物花粉类型主要有: 松属(*Pinus*)、栲/石栎属(*Castanopsis*/*Lithocarpus*)、常绿栎(Evergreen oaks)、大戟科(Euphorbiaceae)等. 其次, 还有罗汉松属(*Podocarpus*)、泪杉属(*Dacrydium*)、阿丁枫属(*Altigia*)、金缕梅科(Hamamelidaceae)、漆树科(Anacardiaceae)、桃金娘科(Mytaceae)、无患子科(Sapindaceae)、紫金牛科(Myrsinaceae)等. 草本植物花粉类型主要有禾本科(Gramineae)、藜科(Chenopodiaceae)、蒿属(*Artemisia*)及湿生草本莎草科(Cyperaceae)等. 蕨类植物孢子主要有芒萁属/鳞盖蕨属(*Dicranopteris*/*Microlepria*)、水龙骨科(Polypodiaceae)、凤尾蕨属(*Pteris*)等, 其次还有金毛狗属(*Cibotium*)及海金沙属(*Lygodium*)等.

表层孢粉散布的特征, 可以通过孢粉浓度分布图显示(图 2). 孢粉总浓度分布具有北部浓度最高(总浓度达 4500 grains/g 以上), 向南渐低的总趋势, 其中东北及东南部的孢粉总浓度最低. 各孢粉类型的散布则具有木本植物花粉浓度西高东低、蕨类植物孢子东高西低、草本植物花粉北高南低的总趋势. 依据这种差异可将全区分为 5 个孢粉区域, 用Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ和Ⅴ表示, 见图 3(a). 孢粉区域Ⅰ: 孢粉总浓度一般>4500 grains/g, 各孢粉类型的浓度均为全区之首, 尤以草本植物花粉浓度最高为特征, 如: 禾本科(图 2(c),(i)). 孢粉区域Ⅱ: 孢粉总浓度一般为 2000 grains/g 左右, 以木本植物花粉浓度高为特征, 随之松属、常绿栎/栲/石栎属、泪杉属也频频出现(图 2(b),(e),(f),(g)). 孢粉区域Ⅲ: 孢粉总浓度一般>2000 grains/g, 以蕨类植物孢子浓度较高为特征, 相应地芒萁/鳞盖蕨属为高(图 2(d),(j)). 孢粉区域Ⅳ: 孢粉总浓度为 500~2000 grains/g, 各组分浓度均较低, 相对来说红树林的花粉较为占优势(图 2(h)). 孢粉区域Ⅴ: 孢粉总浓度一般<500 grains/g, 各组分浓度均较低.

进一步分析各区域, 发现其浓度是很不均匀的, 有的地方浓度达全区最高值, 有的地方则出现全区最低值. 将其圈定出来分别冠以孢粉高值区及孢粉低值区. 全区共有 4 个高值区和 3 个低值区, 分别用 A, B, C, D, E, F 和 G 表示, 各沉积区的具体界线见图 3(b). 这些沉积区的孢粉浓度特征分述如下.

高值区 A: 在海区北部, 即钦江、防城河及南流江口外海域, 形成东西向的孢粉沉积区. 孢粉总浓度一般>4000 grains/g, 个别达 7000 grains/g 以上, 是木本、草本植物花粉与蕨类孢子浓度的最高区域; 本中心东西成串珠状排列, 特别是东部的变窄区浓度明显降低, 为突出河口(三角洲)的整体形态将其连接(见图3(b)). 高值区 B: 在防城港南, 涠洲岛以西海域, 呈北北西, 南南东向的沉积区; 孢粉总浓度一般>2000 grains/g, 是木本植物花粉浓度的次高值区, 一般>1000 grains/g. 高值区 C: 在涠洲岛以南, 形成南北向的串珠状沉积区; 孢粉总浓度一般>2000 grains/g, 有时达 4500 grains/g 以上, 其中蕨类植物孢子浓度近 3000 grains/g, 成为次高值区. 高值区 D: 在琼州海峡出口以西海域, 形成北东南西的沉积区; 孢粉总浓度一般>2000 grains/g, 其中个别地段蕨类植物孢子浓度可达 3000 grains/g 以上. 低值区 E: 在北海市南海域, 总浓度一般<500 grains/g 左右. 低值区 F: 在雷州半岛西北海域, 呈北北东向的沉积区, 总浓度一般为 500 grains/g 左右. 低值区 G: 在琼州海峡内, 成东西向延伸, 总浓度一般<500 grains/g.

木本植物花粉在上述 4 个高值区内浓度值均较高, 但最高值出现在沉积区 A 和 B(图2(b)). 在这 2 个高值区, 松属浓度值可达 1400 及 1000 grains/g 以上(图 2(e)). 常绿栎/栲/石栎属花粉浓度值在上述地区可高达 80 grains/g 以上(图 2(f)). 泪杉植物花粉主要分布于本研究区的西部海域及海南岛北部海域(图 2(g)); 红树林植物花粉则主要分布在海区东北缘、雷州半岛西南及海南岛东北海域等地(图 2(h)). 草本植物花粉浓度最高值仅出现在 A 区(图 2(c)), 浓度值一般在 500 grains/g 以上, 其中禾本科花粉浓度值达 120 grains/g 以上(图 2(i)). 蕨类植物孢子浓度的最高值分布与草本植物花粉不同, 主要存在于沉积区 A, C 及 D(图 2(d)), 特别要指出的是仅芒萁/鳞盖蕨属浓度值可高达 2000 grains/g 以上(图 2(j)).

各孢粉高值沉积区浓度向外延伸一般呈递降趋势, 低值区向外延伸浓度一般呈递增趋势, 其孢粉组合特征从属于所在孢粉区域的规律. 孢粉高值沉积区是孢粉区域中主要组分浓度最高的地区; 孢粉低值沉积区是孢粉区域中各组分浓度最低的地区.

沉积区各样点孢粉浓度的组成可用孢粉浓度图谱展示如图 4. 由图可见: (1) 4 个高值区与 3 个低值区之间, 在丰度上差一个数量级, 反映两类沉积区之间的沉积环境有较大差异(其原因见讨论). (2) 各孢粉沉积高值区的主要孢粉类型平均浓度在数量级上很接近, 特别是具有地带代表性的主要成分如芒萁

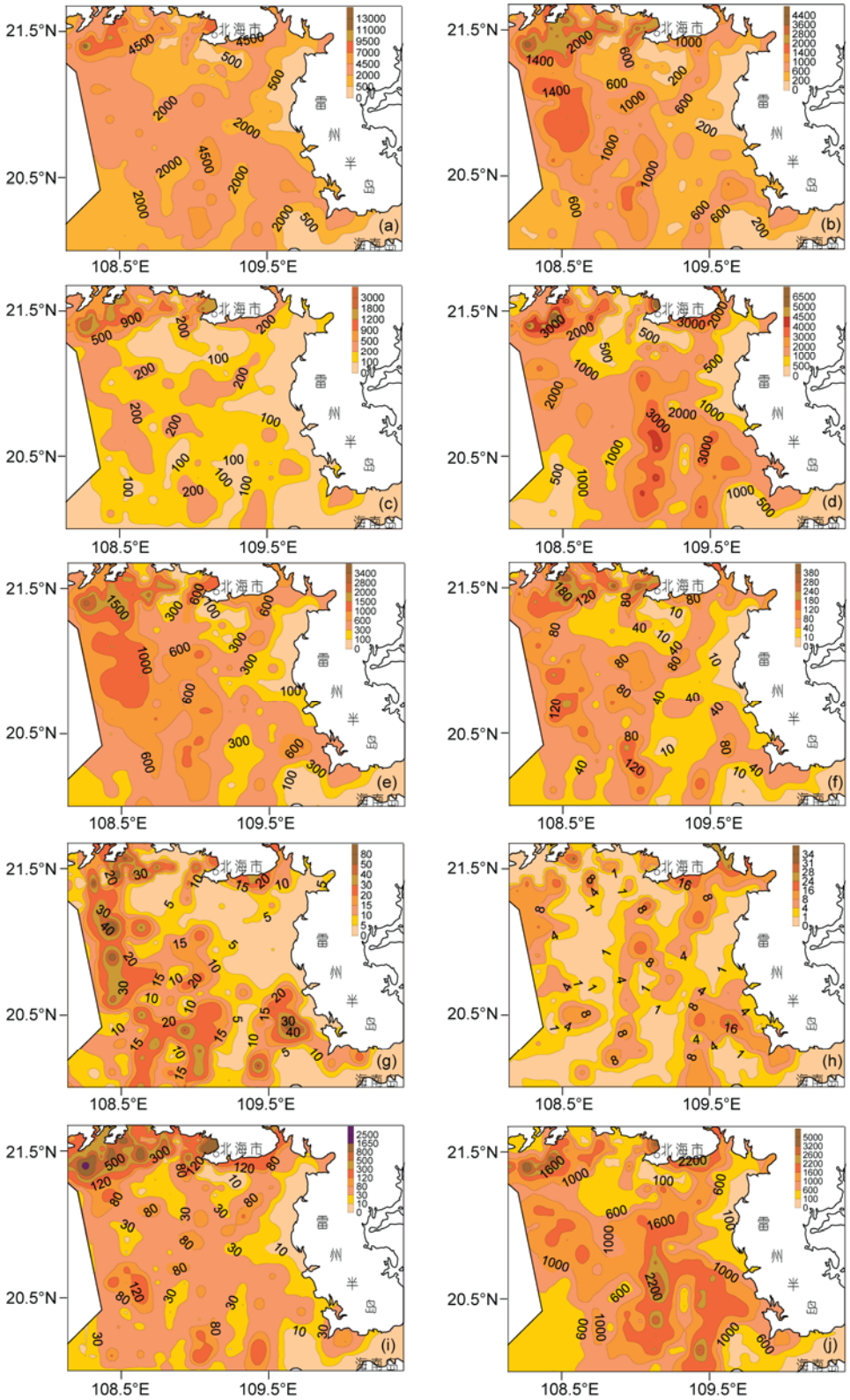

图 2　北部湾东部主要孢粉类型的浓度分布图(grains/g)

(a) 孢粉总浓度; (b) 木本植物花粉; (c) 草本植物花粉; (d) 蕨类植物孢子; (e) 松属花粉; (f) 常绿栎/石栎/栲花粉; (g) 油杉花粉; (h) 红树林植物花粉; (i) 禾本科花粉; (j) 芒萁/鳞盖蕨孢子

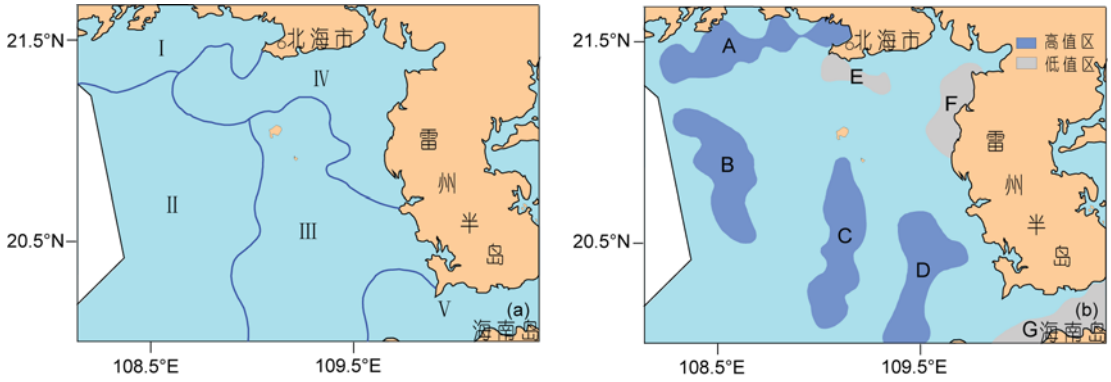

图 3　北部湾东部孢粉区域(a)和沉积区(b)分布图

Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ和Ⅴ为孢粉区域; A, B, C 和 D 为孢粉沉积高值区; E, F, G 为孢粉沉积低值区

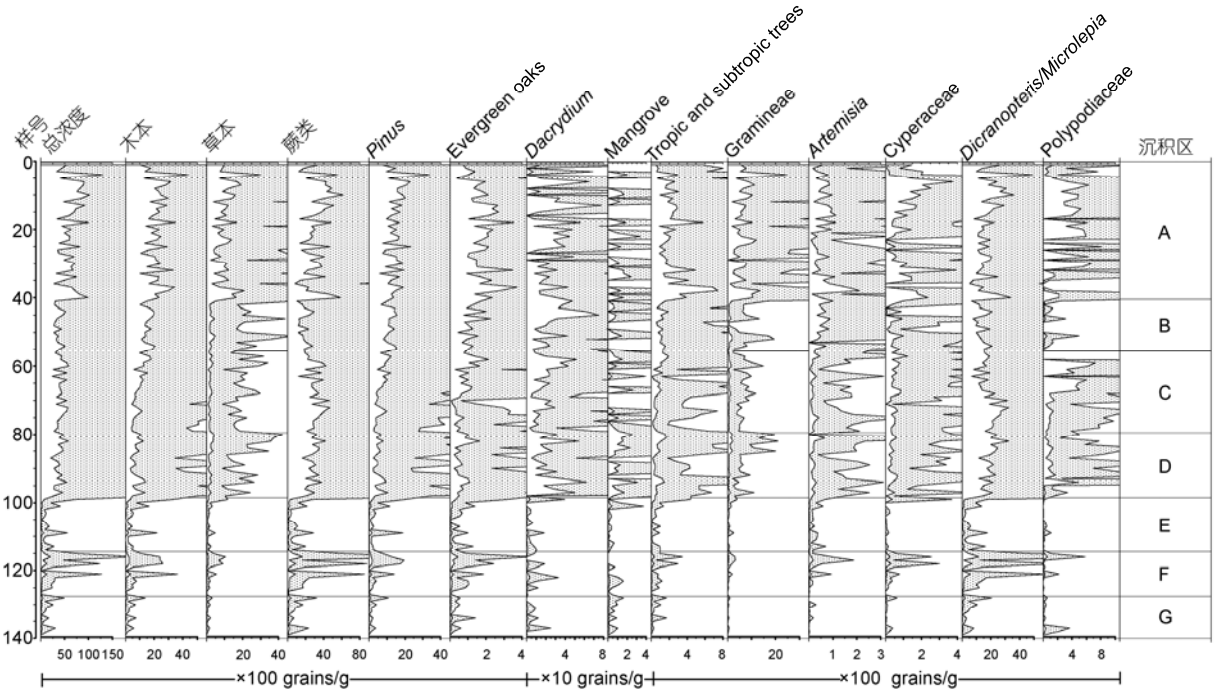

图 4　各沉积区主要孢粉类型浓度对比图

阴影部分为放大 10 倍. Evergreen oaks 包括常绿栎/石栎/栲属

孢子、泪杉属、常绿栎/栲/石栎属、红树林植物花粉和典型热带、亚热带木本植物花粉(主要包括大戟科、阿丁枫属、桑科(Moraceae)、无患子科、漆树科、桃金娘科、杜英属(*Elaecarpus*)、茶茱萸科(Icacinaceae)、天料木科(Samydaceae)、藤黄科(Guttiferae)及苏木科(Caesalpiniaceae)等 31 个科属类型). 这种较大范围的趋同性是孢粉在海水的搬运、沉积、再搬运、再沉积过程中受到充分混合的结果, 使其组合特征能够反映周边地区(广西、海南岛、雷州半岛及越南北部)植被的总体面貌.

沉积区各样点孢粉百分比的组成可用孢粉百分比图谱展示如图 5. 从图可看出, 7 个孢粉沉积区的孢粉组合可分为 3 类. 第一类, 以沉积区 A 孢粉组合为代表. 该类孢粉组合中草本植物花粉百分含量比其他沉积类型高, 平均值为 31.0%, 主要是禾本科, 其含量平均值为 18.8%; 莎草科占孢粉总量的 1.6%, 为各区之冠. 第二类, 以沉积区 B 和 C 孢粉组合为代表. 该类木本植物花粉百分含量比其他沉积类型高, 平

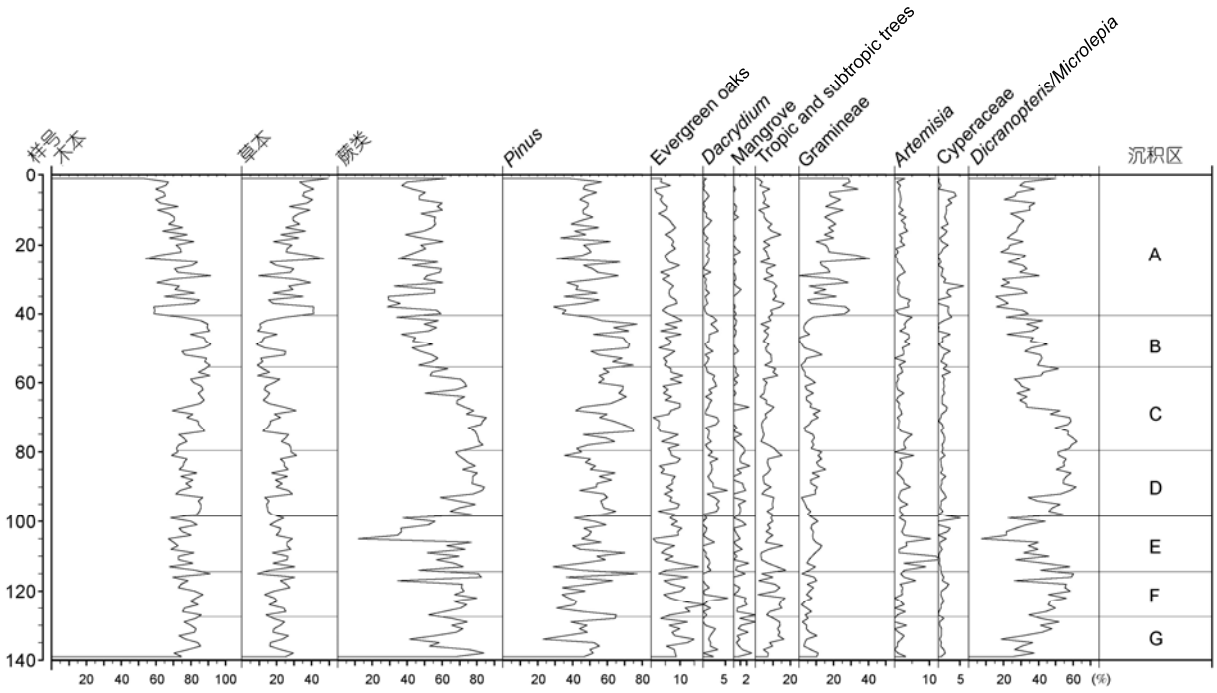

图 5 各沉积区主要孢粉类型的百分比图

Evergreen oaks 包括常绿栎/石栎/栲属

均分别为 81.8%及 85.7%, 以松属为主, 松属的平均值分别为 59.8%和 64.6%. 第三类, 包括沉积区 D, E, F 和 G 的孢粉组合. 该类蕨类植物孢子含量高, 占孢粉总量的 52.6%~74.4%(见图 5), 以芒萁/鳞盖蕨属孢子为主, 达孢粉总量的 36.0%~88.0%. 同时该类的常绿栎/石栎/栲属、红树林植物及典型热带亚热带木本植物花粉含量较其他沉积区高, 平均值分别在 6.7%~9.6%, 0.6%~1.3%和 8.2%~11.0%之间, 其中尤以沉积区 G 的孢粉组合含量偏高而有别于沉积区 D, E, F. 因此, 不难看出北部湾东部海盆的东、中、西与北部孢粉组合有明显差异, 即东部(沉积区 D, E, F 和 G)以蕨类植物孢子含量较高为特点: 中、西部(沉积区 B 和 C)以木本植物花粉(松属)含量偏多而突出; 而北部(A 区)则以草本植物花粉(禾本科、莎草科)居多而显著.

4 讨论

4.1 海表孢粉分布与粒度关系

研究区内孢粉沉积的 4 个高值区位于表层沉积物的极细粉砂-细粉砂级范围内[22,23], 平均粒径一般为>7.0 Φ (<0.008 mm). 而 3 个低值区则位于沉积物为细砂级的范围内, 平均粒径分别为<3.5 Φ (>0.088 mm, 为极细砂)和<2.5 Φ (>0.177 mm, 为细砂)[22], 表明低值区沉积时水动力较强. 0.177~0.088 mm 的粒径相当于大-很大型花粉直径, 考虑到孢粉比重比矿物轻, 因此在这种水动力环境中很难有大量孢粉沉积. 此外, 孢粉的 4 个高值区与二维沉积物粒径趋势分析模型(GSTA 模型)[24]计算的悬浮物汇聚中心很接近, 孢粉浓度沉积的高值区 B 可以与沉积物粒径趋势分析模型计算的 A 汇聚中心对应[25]. 孢粉浓度沉积的高值区 C 和 D 与沉积物粒径趋势分析模型计算的悬浮物 C, D, E, F 汇聚中心相近[22].

从本项目最近完成的粒度总结看, 4 个孢粉高值区位于平均粒径Φ值>5 的区域内, 而 3 个孢粉低值区则位于Φ值<4 的区域内(见图 6(a)). 此外, 4 个孢粉高值区内沉积物的含砂量一般低于 30%, 而低值区则一般高于 60%(见图 6(b)).

这揭示孢粉的沉积是伴随着悬浮物的沉积同时发生, 极细粉砂和细粉砂沉积时孢粉沉积丰富, 极细砂和细砂沉积时, 孢粉可能沉积, 但数量不丰富.

4.2 孢粉源区与传播机制

本区沉积的孢粉主要来自陆缘植物, 即北岸广西南部及东岸雷州半岛一带的热带亚热带草地[15]、南

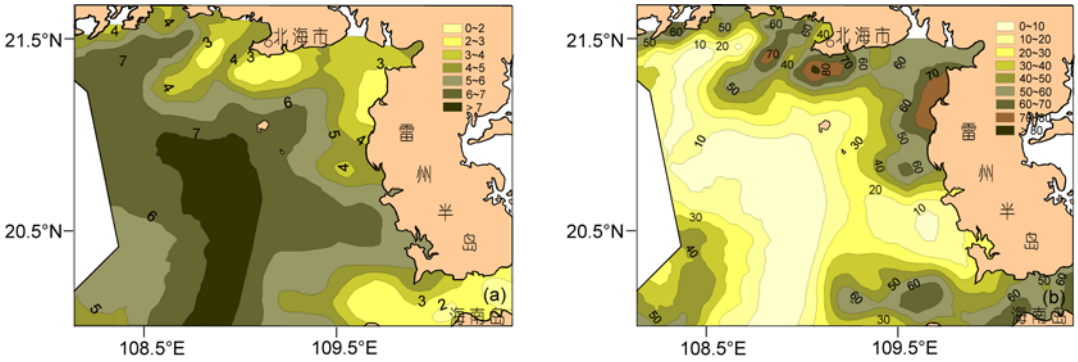

图 6　北部湾表层沉积物平均粒径(a)(Φ)和砂的百分含量(b)(%)分布图

岸海南岛的热带雨林、季雨林[16]、西岸越南境内的热带雨林、季雨林、耕地[15]以及元江一带的亚热带常绿阔叶林与亚热带针叶林[16]，另外，珠江流域的植物孢粉也会通过琼州海峡注入本区. 本区孢粉传播的途径主要是通过河流，包括北部广西沿岸南流江、大风江、钦江、茅岭江、防城河、北仑河、西侧越南沿岸的红河、南部海南岛的南渡江以及雷州半岛的雷州青年运河等. 陆缘植物的孢粉传入研究区后，还要经过海流的搬运、沉积、再搬运、再沉积等过程.

其次，大气传播也是陆缘植物孢粉传入研究区的一个重要途径. 冬季，大陆盛行西北风，可把海区北部广大热带、亚热带植物分布区的植物花粉传输到本海域，如，带气囊的松粉和个体小的常绿栎/栲/石栎属花粉等. 夏季，盛行西南风(和频繁的气旋活动)，可把越南和海南岛上热带雨林和季雨林的植物花粉传入本海域，例如，海域西部的泪杉可能主要来自越南，海域东部的常绿栎可能与海南植被密切相关.

研究区孢粉浓度在北部最高，向南渐低的特征表明，北部湾东部研究区的孢粉主要来自于研究区北部的陆缘植被，并主要通过北部广西沿岸的河流传入. 在孢粉进入海盆后，进一步向南扩散，展示了孢粉沉积的不均衡现象，并主要出现了 7 个孢粉沉积区.

沉积高值区 A 的孢粉组合中草本含量比其他沉积区都高，主要体现于禾本科，莎草科. 这与注入沉积区 A 的江河主要流经热带、亚热带草地植被地区有关，其植物成分以禾本科占优势，同时也含有较多的莎草科成分.

沉积高值区 B 和 C 的孢粉组合中木本植物花粉百分含量比其他沉积区高，以松属为主. 这两个沉积高值区，可能与琼州海峡西向流、红河冷水团向东的扩散及冬季西北风的活动有关，这些水体和风输送的孢粉，在适合的环境下沉降，形成高浓度分布区. 琼州海峡地区受到海南岛热带雨林、季雨林植物花粉的散布(通过西南季风、夏季气旋及南渡江等途径带入)，同时也受粤西沿岸流[26,27]带入孢粉的影响(另文详述)，以致琼州海峡内木本植物花粉偏多(如松属、常绿栎/栲/石栎属等). 由于琼州海峡余流终年为西向[26]，能将传入琼州海峡的木本植物花粉输送到北部湾沉积，导致B和C区木本植物花粉含量高的组合特征.

D, E, F 和 G 区的孢粉组合中蕨类植物孢子含量高，以芒萁/鳞盖蕨孢子为主，这可能主要与雷州半岛、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[28]有关. 而且自然植被破坏以后，地表侵蚀加强，地表径流和沿岸河流可将陆缘的芒萁孢子带入北部湾沿岸. 同时，孢粉在沉积过程中，带气囊的花粉易被海流带到更远的地方[11~14]，这也是造成这些沉积区蕨类植物孢子含量相对增高的一个原因.

各沉积区的孢粉组合除分别具有较高含量的草本植物、木本植物和蕨类植物孢粉外，都还含有一定量的常绿栎/石栎/栲属、热带亚热带木本植物花粉，这些组分来自何处？另外，在样品中还见少量铁杉属(*Tsuga*)和落叶栎(Deciduous oaks)等的花粉，它们又来源于何处？已有资料表明，北部湾周边的我国西南亚热带针叶林、阔叶林[16]和越南北部的热带雨林、季雨林[15]中含有大量的这类植物，它们的花粉通过红河被携带进入北部湾. 由于北部湾终年为一个气旋型环流(见图 7)[17]，在夏季，除了海湾尺度的气旋型环流外，在北部还存在次级气旋环流. 因此，经过红河输入北部湾的孢粉在北部湾北部气旋环流的作用下，被携带到北部湾东部海域和北部海域. 同时，海湾尺度气旋型环流的东翼也能将海南岛输入的花

粉带到北部近岸海域. 此外, 冬季的西北风能将海区以北广大陆地热带、亚热带植物分布区的植物花粉传输到本海域, 夏季的西南季风能将海南岛、越南雨林和季雨林中的孢粉扩散到本区. 这也是导致常绿栎/石栎/栲属及典型热带亚热带木本植物花粉含量在沉积区 D, E, F 和 G 偏高的原因.

泪杉属植物主要产于海南岛[16]及越南境内的热带季雨林[15]中, 而其花粉的高含量主要分布于本研究区的高值区 B, C 和 D. 西部海域的较高泪杉花粉应与红河冷水团的东移有关, 而海南岛北部海域的泪杉花粉高值应是受海南岛沿岸流北上的影响. 同时, 夏季西南季风将上述两地的花粉直接传入本区的作用也是相当重要的. 红树林植物主要出现在防城港、钦州湾、英罗港、山口(21°28′N, 109°43′E)[29]、雷州半岛企水、角尾[30]及海南岛的后水湾[31]等地, 其花粉也主要分布在这一线临近海域的沉积区 D, E, F 和 G, 这应该是与就地流水的搬运散布有关. 由此认为, 作为地区特有的泪杉植物花粉与红树林植物花粉, 它们的较高分布区与植物的生长地带紧邻.

4.3 孢粉沉积动力环境

北部湾东部的孢粉沉积过程有两种情况. 一是近岸的环岸带, 这是孢粉进入海盆的主要通道. 在该带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, 落潮时盐水楔对退潮流起了阻滞作用, 更有利于泥沙落淤[32,33],

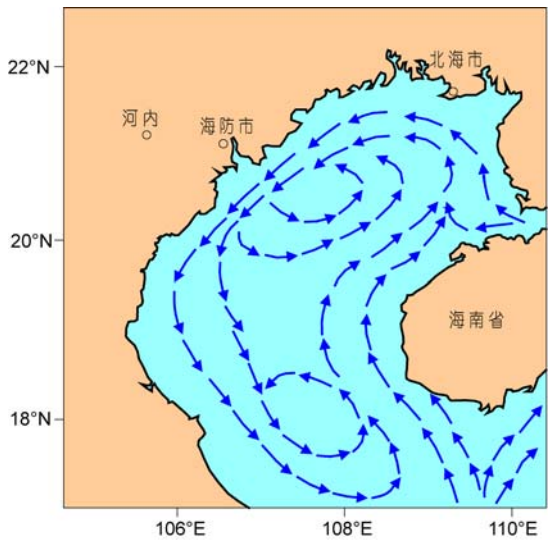

图 7 北部湾夏季环流形势图[17]

与悬浮物共存的孢粉也随之沉积. 这一过程主要发生在河口或沿岸咸淡水锋面地带, 是个物理化学作用过程, 沉积区 A 即属于这一类型. 在环岸带, 由于地形、海流、潮流、波浪及海水盐度等情况的变化, 也可以出现物理沉积过程, 如沉积区 D, E, F 和 G 都属于这一类型.

另一过程发生在离岸稍远(一般无淡水体)的海区, 即近海带. 在海流运动过程中, 当流速减缓或两股海流幅合时, 上层悬浮物下沉, 补充中层或底层悬浮物, 底层悬浮物浓度达到一定量值时则开始沉积[22]. 孢粉与海水中的悬浮物的聚集是同时发生的, 在上层悬浮物浓度高或者悬浮物不断得到补充时, 则出现孢粉的大量沉积, 形成孢粉沉积区. 这是一个物理作用过程, 主要发生在近海带. 当海流运动速度再次加大时, 部分孢粉又重新进入运动状态, 首先被搬运的是那些不易沉积的组分. B 和 C 区即属于近海带类型.

本研究区内的 7 个沉积区, 其沉积环境各不相同, 可以归纳成 6 种沉积环境情况(由于孢粉沉积是多种因素共同作用的结果, 此处仅就部分主导因素而言). ① 沉积区 A 为河口地段. 该区大量的淡水通过河流注入该区, 与沿岸流和潮流带来的咸水相汇, 在河口地段形成咸/淡水锋面. 在锋面上出现絮凝作用等, 有利于大量悬浮质沉积, 而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. 以至河口地段的孢粉组合总浓度高, 木本及草本植物花粉偏多. ② 沉积区 D 位于琼州海峡西出口处, 潮流基本为向西北和向西流动, 出口外过水断面突然展开, 海流速度减缓, 有利于泥沙与孢粉沉降, 因而形成孢粉堆积区. ③ 沉积区 C 位于雷州半岛以西海域. 雷州半岛西岸悬浮物随潮流向岸外扩散, 随着水深加大, 动力条件减弱, 悬浮物逐渐沉降, 所以在涠洲岛以南形成孢粉堆积. 本区的孢粉组合以孢粉总浓度高, 蕨类植物孢子(芒萁)含量高为特色. ④ 沉积区 B 位于涠洲岛以西海域, 受到三股海流的相互作用, 即琼州海峡高盐水流[20]、西侧红河淡水团向东的扩散[19]及南海北部(海南岛以西)上升冷水流的北上[18]. 海流汇合, 但流幅增大, 能量削弱, 在此水域形成孢粉堆积. ⑤ 沉积区 E 及 F, 分别位于北海市南海域及雷州半岛西北岸地段. 该两区水深较浅, 在夏季西南风作用下该区最大增水约 6 cm[17], 风浪较强, 海床泥沙容易悬浮, 在风浪反复冲刷下孢粉不易沉积, 以至该区沉积

物粒级较粗, 孢粉总浓度低. ⑥ 沉积区 G 位于琼州海峡内. 该区潮流很强(最大潮流流速大于 2 m/s)[27], 悬浮物难于沉降, 海床处于冲刷状态. 水动力增强不利于孢粉沉积, 表层沉积物的组成粗也证实了这点[22], 因此该区的孢粉组合以浓度低为特征.

从而可见, 河口地段是孢粉进入海盆的重要通道, 同时也是主要的沉积场所; 潮汐的往返运动, 在临岸地带的有利地段可以形成孢粉的堆积区. 海湾尺度的环流有利于孢粉的搬运, 但在多种海流的交互作用下, 有时也往往会造成有利于孢粉堆积的环境. 本区东北部是海湾夏季风浪活动最强烈地带, 海水浅, 海床泥沙容易悬浮, 在风浪反复冲刷下孢粉不易沉积, 形成孢粉沉积的低值区. 同时, 在琼州海峡内潮流很强, 悬浮物难于沉降, 海床处于冲刷状态, 不利于孢粉沉积, 也出现了孢粉沉积低值区.

5 结论

综上所述, 我们可以得出以下结论:

(1) 海表沉积物的孢粉浓度散布在北部湾东部存在不均匀现象. 依据孢粉组合特征的不同可将全区划分为5个孢粉区域, 即草本植物花粉突出的孢粉区域Ⅰ、木本植物花粉突出的孢粉区域Ⅱ、蕨类植物孢子突出的孢粉区域Ⅲ、蕨类植物和木本植物孢粉较多(尤以红树林植物花粉常见)的孢粉区域Ⅳ以及蕨类植物和木本植物孢粉较多(尤以常绿栎/栲/石栎属花粉相对较多)的孢粉区域Ⅴ.

在孢粉区域内又可进一步分出孢粉沉积丰富的孢粉高值区和孢粉贫乏的低值区. 各高值区孢粉总浓度值在数量级上很接近, 为 3600~5800 grains/g; 而低值区比高值区低出一个数量级, 为 146~818 grains/g.

(2) 孢粉的沉积与水体中的悬浮物沉积同时发生. 孢粉沉积高值区的展布位于表层沉积物的极细粉砂-细粉砂级范围内, 平均粒径一般为>7.0 Φ (<0.008 mm); 而低值区则位于沉积物为细砂级的范围内, 平均粒径分别为<3.5 Φ (>0.088 mm).

(3) 孢粉分布格局: 海盆边部蕨类植物孢子偏高, 松属等木本植物花粉向海盆中心逐渐增多; 环岸(孢粉源区)地带草本植物花粉偏高; 泪杉花粉及红树林植物花粉含量不高, 其分布临近植物源区.

(4) 具有不同孢粉浓度和孢粉组合特征的沉积区反映了不同的沉积动力环境. 河口地段是孢粉沉积的主要场所; 潮汐的往返运动, 在临岸地带的有利地段可以形成孢粉的堆积区. 海湾尺度的环流有利于孢粉的搬运, 但在多种海流的交互作用下, 有时也往往会造成有利于孢粉堆积的环境. 相反, 本区东北部夏季风浪活动最强烈, 在风浪反复冲刷下孢粉不易沉积, 形成孢粉沉积的低值区. 同时, 在琼州海峡内潮流很强, 海床处于冲刷状态不利于孢粉沉积, 也出现了孢粉沉积低值区.

同一海区, 由于不同沉积动力环境的存在, 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, 在海洋的古环境研究中, 无论是海洋化石孢粉谱的古植被、古气候重建, 或是古气侯的定量估算, 都必须考虑海盆的沉积动力条件及沉积分异给孢粉组合带来的影响.

致谢 感谢国家海洋局 908-01-CJ16 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, 夏华永教授对工作提出宝贵建议和帮助, 王苏民研究员对原稿提出宝贵的修改意见. 感谢张玉兰教授在孢粉鉴定上给予指导. 参加孢粉鉴定人员有李云岭、徐宁、朱青、陈国彦等, 一并致谢.

参考文献

1 Muller J. Palynology of recent Orinoco delta and shelf sediments. Micropaleontology, 1959, 5: 1–32

2 Melia M B. The distribution and relationship between palynomorphs in aerosols and deep-sea sediments off the coast of Northwest Africa. Mar Geol, 1984, 58: 345–371

3 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

4 Hooghiemstra H, 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

5 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
6 Campo E V, Bengo M D. Mangrove palynology in recent marine sediments off Cameroon. Mar Geol, 2004, 208: 315–330
7 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
8 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
9 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
10 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
11 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
12 孙湘君, 李遜. 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 B 辑, 1887, 41: 494–498
13 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
14 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
15 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
16 中国植被编辑委员会. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980. 884–916
17 夏华永, 李树华, 侍茂崇. 北部湾三维风生流与密度流模拟. 海洋学报, 2001, 23: 11–23
18 孙双文, 王毅, 兰健. 2006 年夏季及冬季北部湾东部的海洋水文特征与环流. 见: 胡建宇, 杨圣云, 编. 北部湾海洋科学研究论文集. 北京: 海洋出版社, 2008. 64–72
19 陈照章, 胡建宇, 孙振宇, 等. 2006 年 7~8 月北部湾海区温盐度的断面分布特征. 见: 胡建宇, 杨圣云, 编. 北部湾海洋科学研究论文集. 北京: 海洋出版社, 2008. 79–87
20 杨士英, 陈波, 李培良. 用温盐资料研究夏季南海水通过琼州海峡进入北部湾的特征. 海洋湖沼通报, 2006, 1: 2–7
21 Faegri K, Ivrsen J. Textbook of Pollen Analysis. 3rd ed. Oxford: Blackwell, 1989. 295
22 陈亮, 李团结, 许冬. 北部湾东北部沉积物运移趋势分析. 热带地理, 2010, 30: 587–590
23 徐志伟, 马菲, 张凡, 等. 北部湾东部海域表层底质的粒度分布特征. 见: 胡建宇, 杨圣云, 编. 北部湾海洋科学研究论文集. 北京: 海洋出版社, 2008. 143–154
24 高抒, Michael C. 沉积物粒径趋势与海洋沉积动力学. 中国科学基金, 1998, 4: 241–246
25 马菲, 徐志伟, 张凡, 等. 北部湾东部海域沉积物粒径趋势与物质输运. 见: 胡建宇, 杨圣云, 编. 北部湾海洋科学研究论文集. 北京: 海洋出版社, 2008. 155–161
26 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
27 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
28 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
29 黎遗业. 广西红树林湿地现状与生态保护的研究. 资源调查与环境, 2008, 29: 55–60
30 邹发生, 杨琼芳, 蔡俊钦, 等. 雷州半岛红树林湿池鸟类多样性. 生态学杂志, 2008, 27: 383–390
31 张国钢, 梁伟, 钱法文, 等. 海南岛红树林的消长对水鸟的影响. 林业科学, 2008, 44: 97–100
32 徐君亮, 李永兴, 蔡福祥, 等. 珠江口伶仃洋滩槽发育演变. 北京: 海洋出版社, 1985. 34–36
33 董耀华, 惠晓晓, 汪秀丽. 海洋、海岸与河口泥沙运动研究综述. 水利电力科技, 2009, 35: 1–24