



东海内陆架泥质体远端表层沉积物孢粉分布规律及其环境意义

袁忠鹏, 胡刚, 王永红, 黄畅, 贾仲佳, 梁伟强, 彭锦

引用本文:

袁忠鹏, 胡刚, 王永红, 等. 东海内陆架泥质体远端表层沉积物孢粉分布规律及其环境意义[J]. 沉积学报, 2021, 39(3): 610–620.
YUAN ZhongPeng, HU Gang, WANG YongHong, et al. Pollen Distribution and its Environmental Interpretation for the Surficial Sediment in the Southern Mud Belt along the East China Sea Inner Shelf[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(3): 610–620.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

长江远端三角洲多源沉积分异作用及其动力机制

Sedimentary Differentiation and Hydrodynamic Environment of Multi-sourced Sediment in the Changjiang Distal Delta
沉积学报. 2020, 38(3): 528–537 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.064>

沉积过程对自生黄铁矿硫同位素的约束

Constraint of Sedimentary Processes on the Sulfur Isotope of Authigenic Pyrite
沉积学报. 2020, 38(1): 124–137 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.073>

古近纪气候变化在东海盆地内的化石记录

Sedimentary Response to Paleoclimate Change in the East China Sea Shelf Basin
沉积学报. 2019, 37(2): 320–329 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.133>

东海表层沉积物碎屑矿物组合分布特征及其物源环境指示

Detrital Mineral Distributions in Surface Sediments of the East China Sea: Implications for Sediment Provenance and Sedimentary Environment
沉积学报. 2016, 34(5): 902–911 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.05.009>

鲁北平原晚第四纪地层结构及沉积演化

Stratigraphic Structure and Sedimentary Evolution during Late Quaternary in Lubei Plain
沉积学报. 2016, 34(1): 90–101 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.01.008>

文章编号:1000-0550(2021)03-0610-11

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2020.113

东海内陆架泥质体远端表层沉积物孢粉分布规律及其环境意义

袁忠鹏^{1,2}, 胡刚^{2,3}, 王永红¹, 黄畅¹, 贾仲佳¹, 梁伟强¹, 彭锦¹

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071

3. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071

摘要 东海内陆架泥质沉积区是全新世高海平面时期以来形成的重要地貌单元,其包含了高分辨率沉积环境与气候变化信息,对该地区现代沉积环境及其影响条件的分析,将有助于长时间尺度古记录识别与反演。孢粉是研究植被和气候环境的重要代用指标,通过对东海内陆架泥质沉积区远端海域150个表层沉积物样品的孢粉分析,揭示了孢粉特征的分布规律,并探讨了其影响因素和传播机制。结果显示:研究区内共鉴定出93个孢粉类型,其中木本植物花粉47个,草本植物花粉28个,蕨类植物孢子12个,藻类孢子6个。松属花粉含量占有绝对优势,其次为禾本科;研究区孢粉浓度呈现近岸浓度高,随着离岸距离的增加而降低的整体规律。进一步研究表明,各孢粉类型的分布和传播机制不同,主要是受邻岸植被和水流作用影响。松属花粉在近岸区域呈现高浓度分布,可能是受季风和水流强度的共同影响;栎属、草本植物花粉的传播都和洋流有关;蕨类孢子仅仅出现一个高值区,可能是海底地形和海流相互作用的结果。孢粉指示的现代沉积环境研究结果将有助于泥质区沉积记录识别与古环境重建。

关键词 东海内陆架;泥质沉积区;环境重建;孢粉

第一作者简介 袁忠鹏,男,1996年出生,硕士研究生,海洋地质,E-mail: 535478138@qq.com

通信作者 胡刚,男,教授级高工,E-mail: hugang@mail.cgs.gov.cn

中图分类号 P736.2 **文献标志码** A

0 引言

孢粉个体小、传播广、易于保存,已经成为获取气候环境变化信息的良好载体,是研究植被和气候环境重要的代用指标之一^[1-2]。孢粉研究在陆相沉积和海相沉积研究中占有重要地位^[3-7]。一般来说,水中的孢粉具有与黏土和细沙相似的运动表现,因此可以认为海洋中的孢粉具有与黏土和细沙等较小的沉积颗粒相似的输运与沉积机制^[8],孢粉组合特征不仅能够反映特定源区及植被覆盖情况,而且与特定的沉积环境相对应。海洋沉积物中的孢粉能够很好地反映陆缘植被历史,帮助理解孢粉从陆地到海洋的传播途径和散布机制,同时记录了海陆气候演化的历程^[9]。

在世界范围内,20世纪初就已经开始了关于孢

粉的分析研究^[10]。20世纪50年代,我国早期孢粉学研究主要集中在孢粉形态以及陆地岩层中的孢粉组合的研究^[11]。我国陆架海区孢粉学研究始于20世纪70年代。随着海洋地质的发展,一些学者对中国边缘海^[12-14],特别是南海表层^[15-19],沉积物中的孢粉做了大量研究,并取得了一系列成果。此外,在东海泥质区海域也进行了一些孢粉研究工作。陆继军^[20]对福建沿海的6个钻孔中的孢粉样品进行分析,对比划分出福建沿岸晚第四纪8个孢粉组合带,反映了气候的交替性变化;荆夏等^[21]对莆田海域沿海的表层沉积物样品中的孢粉进行分析,划分出4个孢粉区,探讨了其影响因素、传播机制和沉积环境;吴同^[22]对温州瓯江河口海岸带附近2个钻孔中的孢粉进行分析,探讨了温州沿海平原第四纪以来的古植被演替和古气候变迁。

收稿日期:2020-06-23; 收修改稿日期:2020-11-08

基金项目:国家自然科学基金(41676052);国家留学基金委项目(201609370007);中国地质调查项目(DD20190236) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41676052; The Project of China Scholarship Council, No. 201609370007; China Geological Survey Project, No. DD20190236]

近海陆架区接受河流携带来自陆地的大量陆源碎屑沉积,含有丰富的物理、化学和生物信息,其挟带保存的孢粉化石十分丰富,为研究区域内的环境变化提供了重要材料。对于东海表层沉积物的孢粉学研究主要集中在东海北部和长三角区域^[23],而对重要的地貌单元—东海内陆架泥质沉积体远端的研究相对薄弱,限制了对现代泥质区整体认识和影响因素分析。本文拟通过研究我国东海内陆架泥质沉积体远端海域150个表层沉积物中的孢粉,分析表层沉积物中孢粉的组合特征和分布规律,并探讨传播机制及其对环境的指示意义。

1 研究区概况

研究区位于我国福建省与浙江省交汇的海域,介于 $26^{\circ}00' \sim 27^{\circ}00' \text{ N}$, $120^{\circ}00' \sim 121^{\circ}30' \text{ E}$ 之间,水深范围为16.3~87.7 m,平均水深53.4 m,覆盖海域面积约 $1.30 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)。研究区是长江远端三角洲的重要组成部分,位于东海内陆架泥质沉积区分布

的南端,主要由黏土和粉砂组成,含砂量低,且主要受到长江来源物质与沿岸中小河流的影响^[29]。

研究区属于亚热带季风气候,季风特点明显。受海洋气候影响,冬季盛行东北季风,夏季盛行西南季风。年平均气温 $16^{\circ}\text{C} \sim 19^{\circ}\text{C}$,年降雨量1 100~1 800 mm。影响研究区入海物质的主要河流为长江、甌江、闽江以及台湾西北浊水溪,另外浙闽沿岸也有众多小型河流入东海,但对局部海域沉积物类型和孢粉影响具有局限性,所以不着重考虑。影响研究区的洋流主要有浙闽沿岸流、台湾暖流等^[24,26,28,30]。浙闽沿岸流其流向随季节而变,夏季因东南风和西南风占优势而流向北和东北,与长江冲淡水汇合直达济州岛附近,冬季因盛行东北风而顺岸南下。台湾暖流流向较为稳定,主要沿闽浙沿海岸域北上,具有高温高盐的特征。其流幅和强度具有明显的季节变化,夏季盛行西南季风,海水离岸输送,流幅加宽,流速加快;冬季盛行东北季风,海流向岸靠近,流幅变窄,海流势力减弱。

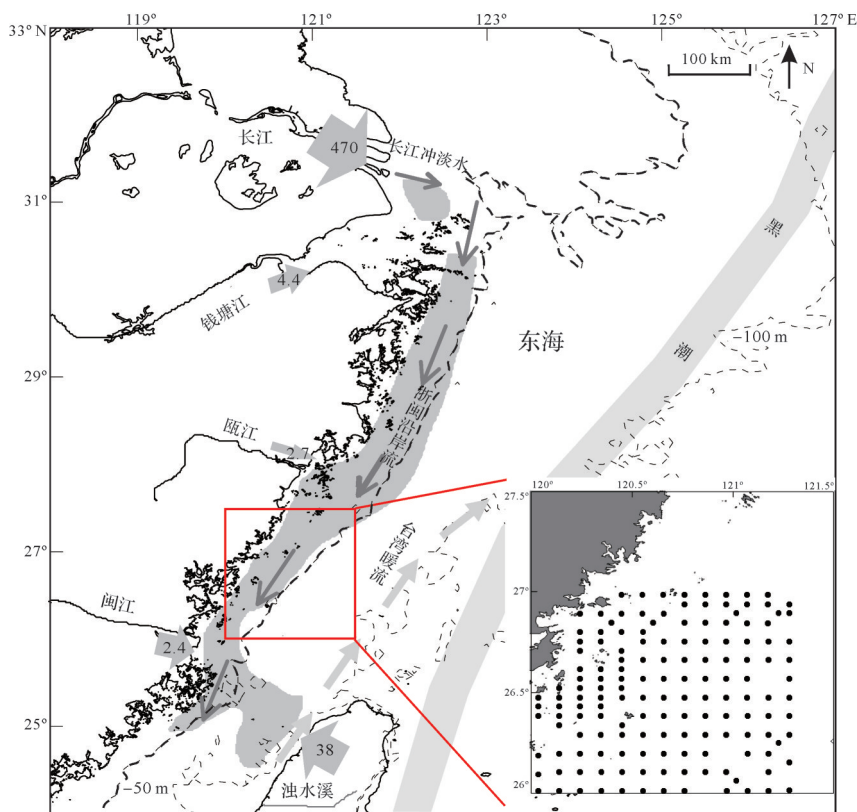


图1 研究区位置及站位分布图(据丛静艺等^[24]修改)

图中箭头数字代表河流泥沙通量单位为 Mt/a ^[25-26];沿岸灰色条带代表东海内陆架泥质沉积体^[27];海洋环流^[26,28]

Fig.1 Location of study area and sampling sites (modified from Cong *et al.* ^[24])

The arrows represent the river sediment flux (Mt/a). Gray area along the coastal strip represents the geographical location of the mud area, and the station distribution of the study area is shown in the inset image

研究区西岸毗邻福建省东北部,地貌以山地丘陵为主,森林覆盖率极高,植被类型属于中亚热带常绿阔叶林(图2d),该区域影响研究区孢粉特征的主要河流为瓯江和闽江。但由于长江携带的大量水沙物质在沿岸流输送下也大规模沉积于此,因此也会包含有北亚热带常绿—落叶阔叶混交林信息(图2c),长流域以上有山地丘陵地貌和下游冲积平原为主。常见的主要阔叶树种有:甜槠(*Castanopsis eyrei*),米槠(*C. carlesii*),青钩栲(*C. kawakamii*),栲树(*C. fargesii*),南岭栲(*C. fordii*),青冈(*Cyclobalanopsis glauca*),鹿角栲(*C. lamontii*),黧蒴栲(*C. fissa*)等^[32];针叶林主要有马尾松林(*Pinus massoniana* Lamb.)、杉木林(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)等,还有一些灌木等次生林,沿海平原、沿河流域有丰富的农业用地,农作物包含的孢粉信息也有可能在海域沉积物的孢粉组合特征中有所体现。

2 材料与方法

本研究表层沉积物样品来自于青岛海洋地质研究所承担的“1:25万霞浦县幅海洋区域地质调查”项目,取样时间为2016年6月,采用的是箱式取样方法,采样就位偏差平均值为14 m。本次研究分析的样品为150个表层沉积物样品,采用箱式取样取海底表面1~2 cm深度样品进行分析,站位分布如图1所示。

所有样品均在中山大学地球科学与工程学院第四纪环境分析测试实验室处理。每个样品称重10~20 g沉积物,样品经过加入10%的HCl除钙、洗酸、除沙、加入10%的KOH除有机质、洗碱等预处理之后,孢粉的实验室提取采用酸碱—重液浮选法,并采用外加石松孢子示踪来测定孢粉浓度。孢粉薄片在德国蔡司显微镜Axio Lab.A1数码摄像生物显微镜下进

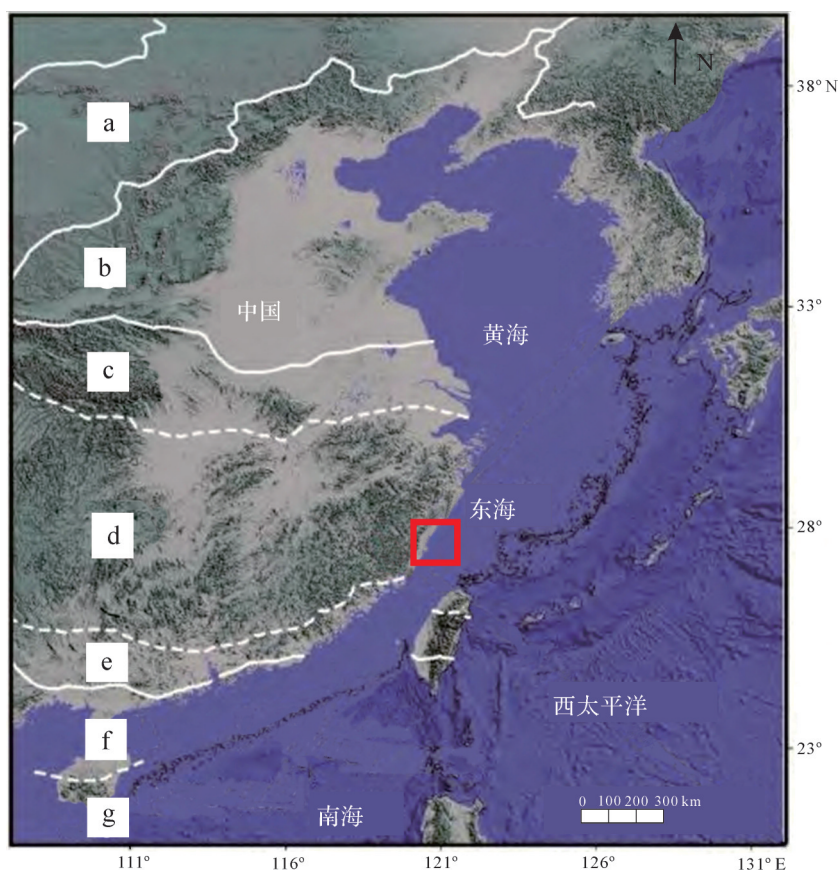


图2 中国东部植被区划(据于俊杰等^[31]修改)

(a)温带草原;(b)温带落叶阔叶林;(c)北亚热带常绿—落叶阔叶混交林;(d)中亚热带常绿阔叶林;(e)南亚热带常绿阔叶林;(f)北热带季雨林和热带雨林;(g)南热带季雨林和热带雨林。红框表示研究区位置

Fig.2 Vegetation division in eastern China (modified from Yu *et al.*^[31])

(a) temperate grassland; (b) temperate deciduous broad-leaved forest; (c) north subtropical evergreen deciduous broad-leaved mixed forest; (d) middle subtropical evergreen broad-leaved forest; (e) south subtropical evergreen broad-leaved forest; (f) north tropical seasonal rain forest and tropical rain forest; (g) south tropical seasonal rain forest and tropical rain forest. Red box indicates the location of the study area

行观察和鉴定统计,每个孢粉统计数目在200粒以上。在鉴定过程中,主要参考《中国植物花粉形态》^[33]、《中国热带亚热带被子植物花粉形态》^[34]和《中国蕨类植物孢子形态》^[35]等专著及其他参考文献中的孢粉图片及形态描述。

3 结果

3.1 孢粉主要科属类型

经过鉴定统计,150个表层沉积物样品全部见有孢粉,共鉴定统计孢粉49 679粒,平均每样331粒。共鉴定出93个孢粉类型,其中47个木本植物花粉类型,28个草本植物花粉类型,12个蕨类植物孢子类型和6个藻类孢子类型。木本植物花粉主要类型有:松属(*Pinus*)、栎属(*Quercus*)、栗属(*Castanea*)、大戟科(*Euphorbiaceae*)、胡桃属(*Juglans*)、鹅尔枥属(*Carpinus*)、榆属(*Ulmus*)、铁杉属(*Tsuga*)、桤木属(*Alnus*)、枫香属(*Liquidambar*)、桦木属(*Betula*)、桑科(*Moraceae*)、榛属(*Corylus*)、山毛榉属(*Fagus*)、鼠李科(*Rhamnaceae*)、杨梅属(*Myrica*)、柳属(*Sailx*)等。草本植物花粉主要类型有:禾本科(*Poaceae*)、毛茛科(*Ranunculaceae*)、莎草科(*Cyperaceae*)、蒿属(*Artemisia*)、藜科(*Chenopodiaceae*)、十字花科(*Cruciferae*)、香蒲属(*Typha*)、蒲公英(*Taraxacum*)等。蕨类植物孢子主要类型有:三缝孢子(*Trilete spores*)、桫欏属(*Adiantum*)、单缝孢子(*Monolet spore*)、苔藓孢子(*Bryophytes*)、里白属(*Hicriopteris*)、凤尾蕨属(*Pteris*)、水龙骨属(*Polypodiaceae*)、海金沙属(*Lygodium*)、金毛狗属(*Cibotium*)、紫萁属(*Osmunda*)、卷柏属(*Selaginella*)、水蕨属(*Ceratopteris*)等。

藻类主要类型有:刺球藻(*Baltisphaeridium*)、环纹藻(*Concentricystes*)、沟鞭藻(*Dinoflagellate*)等。

3.2 孢粉浓度分布特征及分区

研究区域表层沉积物的孢粉浓度的差异较大(图3a),最高浓度达到3 148粒/克,最小浓度仅为85粒/g,平均浓度为822粒/g。表层孢粉散布的特征,可以通过孢粉浓度分布图(图3b)显示,研究区孢粉浓度随着离岸距离的增加而降低,总体呈现西部近岸滨海带浓度较高,向外海一侧近似平行于海岸线逐渐降低,并在中部镶嵌有部分高值区的分布特征。依据孢粉浓度值并结合孢粉等值线分布趋势,将研究区孢粉浓度分布划分为3个次级区域,分别用孢粉区域Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ表示,由图4可以发现,从分区Ⅰ到分区Ⅲ,木本植物花粉含量依次增加,而蕨类含量依次降低,草本和藻类含量几乎没有变化。

孢粉区域Ⅰ:位于研究海域最东及东南侧,离大陆最远,是研究区表层沉积物中孢粉含量低值区,包含了63个站位。孢粉浓度为85~600粒/g,平均浓度仅为349粒/g。木本植物花粉在本区组合中约占50.4%,草本约占30.3%,蕨类约占16.9%,藻类孢子约占2.4%。

孢粉区域Ⅱ:几乎占据了研究海域整个中东部,平行于海岸带分布,为孢粉浓度中等区,包含了58个站位。孢粉浓度为600~1 200粒/g,平均浓度为896粒/g。木本植物花粉在本区组合中约占53.3%,草本约占30.2%,蕨类约占14.3%,藻类孢子约占2.2%。

孢粉区域Ⅲ:位于近岸中部及西北一侧,研究海域中部也见几块区域镶嵌于Ⅱ区,为研究区域中孢粉浓度的高值区,包含了29个站位。孢粉浓度为

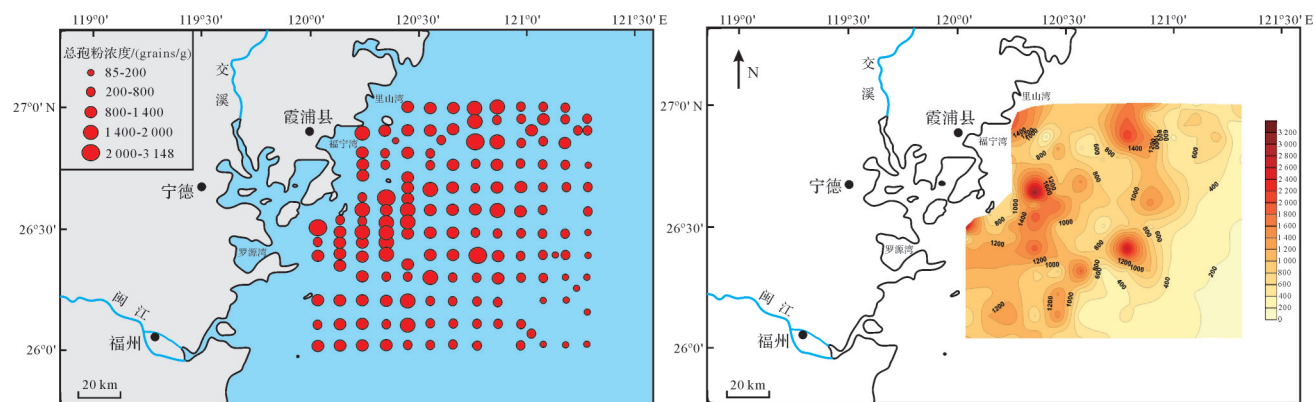


图3 (a)研究区孢粉浓度分布圆饼图;(b)研究区孢粉浓度等值线分布图

Fig.3 (a) Circular pie chart of sporopollen concentration distribution in the study area;
(b) Contour map of sporopollen concentration in the study area

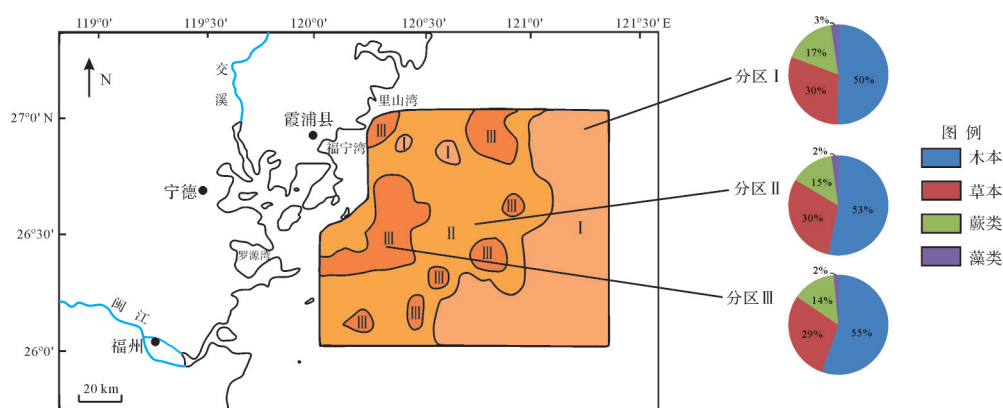


图4 研究区孢粉浓度分区图

Fig.4 Partition of sporopollen concentrations in the study area

600~3 148 粒/g, 平均浓度为 1 701 粒/g。木本植物花粉在本区组合中约占 55.4%, 草本约占 29.1%, 蕨类约占 14%, 藻类孢子约占 1.5%。

3.3 主要孢粉类型的分布特征

木本植物花粉在整个研究区的含量普遍较高(图 5a), 其分布主要受松属和栎属花粉影响。其中松属花粉的含量最高, 多数站位的百分含量可在 20% 以上, 最高可达到 59%, 其百分比含量等值线图与木本植物花粉百分含量等值线图基本一致(图 5e)。研究区中部和东北部近岸海域存在明显的松属花粉高值区, 中部、东部以及南部存在呈条带状分布的 3 个低值区。从图 5f 可见, 栎属花粉在研究区海域内的百分含量普遍较低, 其百分含量最高值只有 13%, 仅仅在研究区最东部, 中部及西南位置存在零星的几个相对略高区域。

研究区的草本花粉的含量也相对较高(图 5b), 以禾本科、毛茛科和莎草科花粉为主要类型。禾本科花粉百分含量最高值达到 17%。毛茛科花粉的百分含量最高值达到 14%, 莎草科花粉的百分含量最高值达到 14%。三者均在研究区中部存在相对高值区, 在西部存在低值区(图 5g~i)。

研究区蕨类植物孢子和藻类孢子在整个研究区的含量较低(图 5c, d)。蕨类植物孢子以三缝孢子和桫欏属孢子为主, 两者占蕨类孢子数量的 58.3%, 又因为蕨类植物孢子整体含量较少, 所以将三缝孢子和桫欏属孢子作为一个整体研究。如图 5c 与图 5j, 两者的百分含量等值线图与蕨类植物孢子等值线图较为相似, 仅仅在 26°10'~26°20' N, 120°20'~120°30' E 范围内存在一个高值区。

4 讨论

4.1 孢粉浓度分布与海底地形的关系

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, 研究区 50 m 等深线是重要的沉积界线(图 1), 东海内陆架泥质区主要分布在 50 m 以浅水域, 由图 6 可见, 水深在 50 m 以浅区域内, 孢粉浓度相对较高, 孢粉浓度高值的站点主要分布在 50 m 以浅海区, 这些样品站位均在离岸较近的地区, 说明孢粉主要是陆地植物花粉和孢子经河流或大气输运而在近岸海域沉积, 主要为沿岸河流带来的陆地孢粉的影响。

水深大于 50 m 时, 孢粉丰度偶见极高值, 这可能与该地区也同时受到了沿岸流搬运下长江物质的影响, 长江物质会挟带更多的陆缘孢粉进入该地区。分布较为复杂, 可能是受洋流运动的影响, 水深大于 50 m 时, 孢粉丰度明显降低, 沉积孢粉浓度呈现总体较低的特征, 该地区离岸较远, 接收陆源碎屑沉积物较少, 从而导致孢粉浓度的降低, 加之离岸较远地区主要受到台湾暖流的强烈影响, 在强动力条件下沉积物冲刷为晚更新世以来残留沙沉积, 不利于细颗粒沉积物和孢粉的有效沉积。

4.2 孢粉源区与传播机制

海洋中的孢粉基本上全部来源于周围陆地和沿岸地区^[21], 少数由风、河流和海流等途径从较远的地方带来。因此周边植被是影响孢粉分布的最基本、最重要的因素之一。本次研究区离岸较近, 可以认为福建东北部、浙江南部等地区的陆缘植物是表层沉积孢粉的主要来源, 主要是中亚热带常绿阔叶林以及一些灌木、蕨类等形成的次生林、农业用地等。

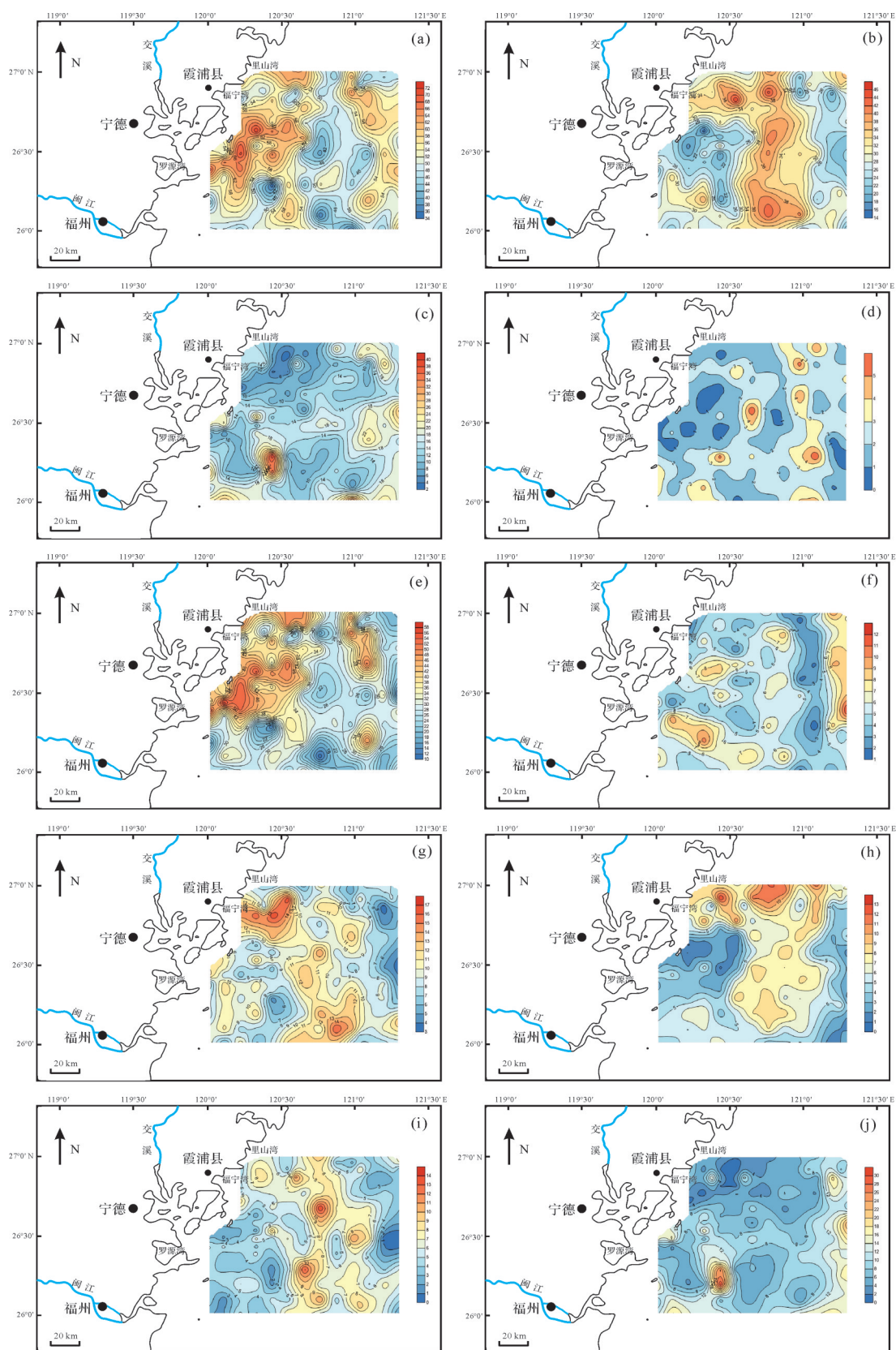


图5 研究区主要孢粉类型的百分含量分布图

(a) 木本植物花粉; (b) 草本植物花粉; (c) 蕨类植物孢子; (d) 藻类植物孢子; (e) 松属; (f) 栎属; (g) 禾本科; (h) 毛茛科; (i) 莎草科; (j) 三缝孢子

Fig.5 Percentage distribution of major sporopollen types in the study area

(a) arboreal; (b) herbaceous; (c) fern; (d) algal; (e) *Pinus*; (f) *Quercus*; (g) *Gramineae*; (h) *Ranunculaceae*; (i) *Cyperaceae*; (j) *Trilete* spores

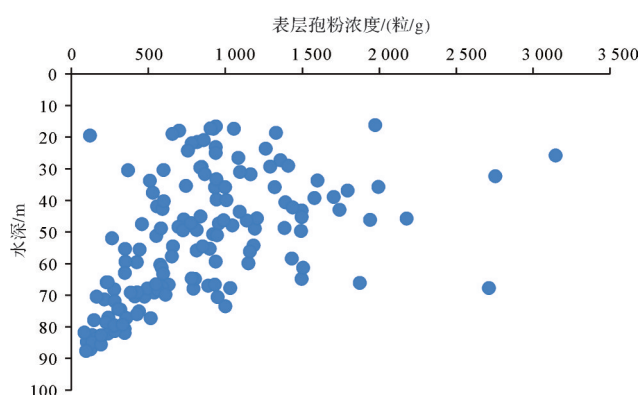


图6 研究区孢粉浓度和水深关系图

Fig.6 Relationship between sporopollen concentration and water depth in the study area

陆源植被类型决定孢粉组合类型,其他因素共同影响孢粉组合中各类孢粉比例。从上述孢粉分布规律可以看出:

研究区的木本花粉的丰度最高,其中松属占较大比例,其次为栎属。松属植物为原生植被破坏后次生的主要树种,在我国大陆南部及东南沿海均有分布,其中人工栽培松林也占一定的面积^[21]。松属花粉产量高,密度小,传播广,带有气囊结构,容易受风和海流携带^[19,36],一般在离岸较近的浅海区 and 入海口不易沉积。但很难证明水流和空气对于孢粉传播相对定量贡献的大小,孢粉浓度分布图只能表明孢粉分布和离岸距离的相对关系。松属的花期在3—4月,此时华南地区正盛行东北风,研究区东北方向为广阔的海域,没有表现出风向与孢粉分布的关系。因此,研究区的松属花粉除受沿岸松林(图2d)分布影响外,其分布受水流影响较大,推测可能来源于福建东北部、浙江南部等地区(图2c,d)。栎属是亚热带常绿阔叶林中重要的成分,其花粉普遍存在于海底表层沉积物中^[21]。研究区栎属花粉主要来源于沿岸常绿阔叶林(图2d),总体含量不高。

研究区的草本花粉以禾本科、毛茛科和莎草科为主要类型。在草本组合中,三者所占的比例非常高,在整个孢粉组合中,也仅次于松属花粉。由于森林植被受到人类活动的破坏,禾本科和莎草科植物一般作为野草广泛生长在田间、林缘^[7]。毛茛科位于真双子叶植物的基部,是联系基部被子植物和真双子叶植物的关键类群^[37]。草本植物花粉是飞翔距离不远的类型^[15],由于草本植物花粉漂移能力和水流搬运能力较弱,草本植物花粉主要分布在河流入海口和离岸较近的浅海区^[38]。而图6b显示中部

海域存在条带状高值区,推测受洋流输运影响,可能与浙闽沿岸流有关,对应孢粉源区为图2c~d区域。

蕨类植物主要分布于湿润的森林环境^[39],不易被空气传播,孢子在水中具有较大的浮力和被水携带的能力^[30]。因此海洋中蕨类植物的孢子,除少数由风直接带入外,主要是靠水流运输。研究区蕨类植物孢子较少,仅在研究区西南位置存在一高值区,这与进入该海区的陆地地形地貌和植被类型是相符合的,研究区沿岸地区主要以山地丘陵为主,植被覆盖类型为中亚热带常绿阔叶林,蕨类植物相对较少。

4.3 孢粉含量分布与沉积物输运

通过表层沉积物编制的研究区沉积物类型表明^[24]:该调查区的沉积物类型主要为黏土和粉砂质黏土组成的泥,其分布面积约占研究区面积的一半,主要分布在研究区西北近岸区域。粉砂主要分布在研究区中部,约占研究区分布范围的20%,呈东北西南向带状分布,向西南方向变窄。粉砂类型分布区向海方向变为砂质粉砂,约占研究区范围30%。粉砂质砂类型分布在东南角,约占研究区范围的10%左右(图7)。总体上,沉积物类型从近岸到外海,主要沉积物类型成平行海岸或水深线分布,50 m等深线以浅为泥质沉积物,以深地区主要为含砂或砂质沉积物为主。而本研究表明孢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研究区,与该地区的沉积物分布有比较好的吻合,说明孢粉浓度的多少与沉积物类型具有一定关系,主要是由于不同的粒径大小对其他物质的吸附作用不同造成的。

另外,由于研究区受到了浙闽沿岸流和台湾暖流引起的切变锋的“水障”作用的影响^[24],其中东南部主要受到了台湾暖流带来的台湾入海物质的混合影响,中部受浙闽沿岸流带来的长江物质的影响,近岸地区受到了由于浙闽沿岸流的季节变化造成了瓯江和闽江等河流物质的混合作用影响,因此造成了孢粉浓度的分布西侧高浓度地区,而中部也由于大量长江物质的影响,出现孢粉浓度的峰值,而东部和东南部由于台湾暖流的高温高盐和强动力条件的影响,阻隔了物源碎屑物质的输入,而且对已有的细颗粒沉积物具有冲刷和再悬浮的影响,造成了孢粉浓度降低。

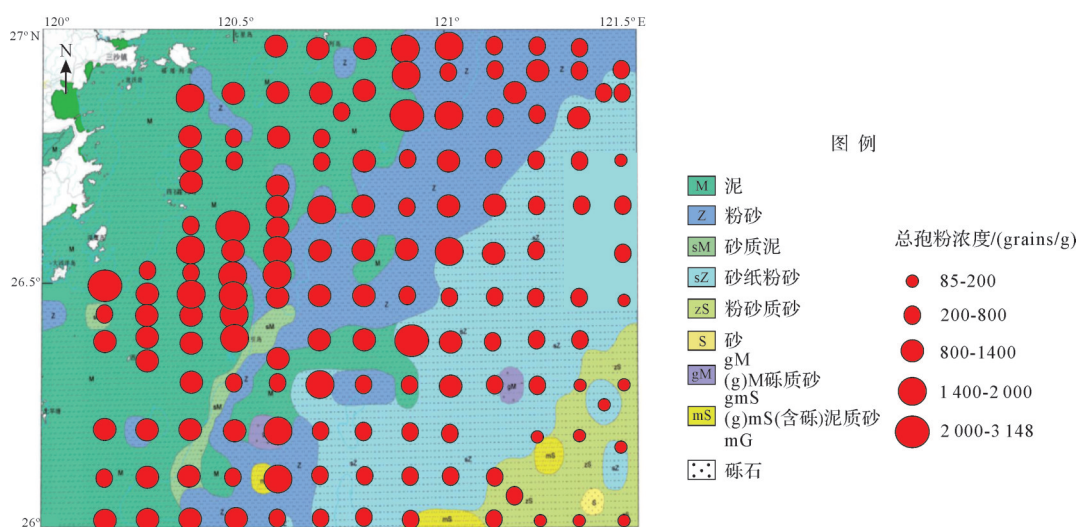


图7 研究区表层沉积物类型、分布(按照 Folk *et al.*^[40]分类)及取样站位孢粉总浓度

Fig.7 Type and distribution of surface sediments in the study area (Folk *et al.*^[40] classification) and Total sporopollen concentration at each sampling station

5 结论

(1) 研究区表层沉积物中含有较丰富的木本和草本植物花粉,而蕨类孢子、藻类孢子含量相对较低,其中松属花粉含量占绝对优势。

(2) 根据孢粉浓度值以及结合孢粉等值线走势,将研究区孢粉分布划分为3个孢粉区域。总体呈现西部近岸滨海带浓度较高,以50 m等深线为界向东孢粉浓度显著降低,向海方向孢粉浓度近似平行于海岸线逐渐降低的分布。

(3) 不同的陆源植被类型形成不同的海区孢粉组合类型,但研究区孢粉基本都来源于近岸福建省东北部植被。松属花粉可能是受季风和水流的共同影响而呈现近岸海湾出口高浓度分布的特征;栎属、草本植物花粉的传播都和洋流有关;蕨类高值区的出现可能是海底地形和海流相互作用的结果。

(4) 孢粉浓度的多少与研究区表层沉积物分布具有高相关性,孢粉浓度主要受到河流入海物质的细颗粒泥质沉积物类型吸附,造成孢粉浓度的高值,并且由于该地区特有的东北—西南向沉积动力条件,孢粉浓度分布具有沿海岸线条带状分布特征。

致谢 对“业治铮”号全体船员在表层沉积物取样工作、青岛海洋地质研究所测试中心和中山大学地球科学与工程学院在样品分析测试中所做的工作一并感谢。

参考文献(References)

- [1] 杨振京,杨庆华,刘林敬. 孢粉:古人生活环境的记录[J]. 国土资源科普与文化,2019(2):28-29. [Yang Zhenjing, Yang Qinghua, Liu Linjing. Sporopollen: A record of the living environment of the ancients[J]. Scientific and Cultural Popularization of Land and Resources, 2019(2): 28-29.]
- [2] 蔡庆芳,刘冬雁,贾培蒙,等. 孢粉指标在我国海岸带古气候、古海面变化中的应用现状[J]. 地质学刊,2015,39(4):621-626. [Cai Qingfang, Liu Dongyan, Jia Peimeng, et al. Application status of pollen proxies to paleoclimate and paleo sea-level changes in Chinese coastal zone[J]. Journal of Geology, 2015, 39(4): 621-626.]
- [3] 柳蓉,闫旭,刘招君,等. 银额盆地白垩统巴音戈壁组含油页岩系孢粉化石特征及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2020,50(2):341-355. [Liu Rong, Yan Xu, Liu Zhaojun, et al. Characteristics and geological significance of palynological fossils from Bayingebi Formation of Lower Cretaceous in Yin'e Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2): 341-355.]
- [4] 韩箫屿,舒军武. 抚顺盆地东露天煤矿早始新世孢粉组合特征及其古气候意义[J]. 世界地质,2020,39(1):72-89. [Han Xiaoyu, Shu Junwu. Early Eocene palynological assemblages from Donglutian coal mine in Fushun Basin and their paleoclimatic significance[J]. Global Geology, 2020, 39(1): 72-89.]
- [5] 李洁,许清海,张生瑞,等. 相对花粉产量及其在古植被定量重建中的应用[J]. 第四纪研究,2013,33(6):1101-1110. [Li Jie, Xu Qinghai, Zhang Shengrui, et al. Relative pollen productivity and its use in quantitative reconstruction of paleovegetation[J]. Quaternary Sciences, 2013, 33(6): 1101-1110.]
- [6] 荆夏,陈芳,高红芳,等. 南海东部ZSQD225柱状样的孢粉记录

- 及其古环境意义[J]. 地质学刊, 2015, 39(1): 76-80. [Jing Xia, Chen Fang, Gao Hongfang, et al. Spore and pollen record from the Core ZSQD225 in eastern South China Sea and its paleoenvironmental significance[J]. Journal of Geology, 2015, 39(1): 76-80.]
- [7] 陈金霞, 石学法, 乔淑卿. 渤海地区全新世孢粉序列及古环境演化[J]. 海洋学报, 2012, 34(3): 99-105. [Chen Jinxia, Shi Xuefa, Qiao Shuqing. Holocene palynological sequences and palaeoenvironmental changes in the Bohai Sea area[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(3): 99-105.]
- [8] Heusser L E. Pollen distribution in marine sediments on the continental margin off northern California [J]. Marine Geology, 1988, 80(1/2): 131-147.
- [9] 陶明华, 吴健平, 王宏霞. 孢粉组合特征与沉积环境[C]//中国古生物学会孢粉学分会第八届二次学术年会论文摘要集. 中国古生物学会孢粉学分会, 2011: 66-67. [Tao Minghua, Wu Jianping, Wang Hongxia. Characteristics of pollen assemblages and sedimental environment[C]//Palynological Society of China, 2011.]
- [10] 孙湘君, 罗运利, 陈怀成. 中国第四纪深海孢粉研究进展[J]. 科学通报, 2003, 48(15): 1613-1621. [Sun Xiangjun, Luo Yunli, Chen Huaicheng. Deep-sea pollen research in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(15): 1613-1621.]
- [11] 徐仁. 孢粉学的现状与孢子花粉分析在我国发展的展望[J]. 科学通报, 1956, 7(7): 49-52. [Xu Ren. The current situation of palynology and the prospect of spore pollen analysis in China [J]. Chinese Science Bulletin, 1956, 7(7): 49-52.]
- [12] 王开发, 王永吉, 徐家声, 等. 黄海沉积孢粉藻类组合[M]. 北京: 海洋出版社, 1987: 9-23. [Wang Kaifa, Wang Yongji, Xu Jiasheng, et al. Spore-pollen and algal assemblages in the Yellow Sea sediments [M]. Beijing: China Ocean Press, 1987: 9-23.]
- [13] 王开发, 孙煜华, 张玉兰, 等. 东海沉积孢粉藻类组合[M]. 北京: 海洋出版社, 1987: 10-27. [Wang Kaifa, Sun Yuhua, Zhang Yulan, et al. Spore-pollen and algal assemblages in the East China Sea sediments[M]. Beijing: China Ocean Press, 1987: 10-27.]
- [14] 王开发, 蒋辉, 张玉兰. 南海及沿岸地区第四纪孢粉藻类与环境[M]. 上海: 同济大学出版社, 1990: 53-110. [Wang Kaifa, Jiang Hui, Zhang Yulan. Quaternary spore, pollen and algae form the South China Sea and the coastal region and their environment [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990: 53-110.]
- [15] 余少华, 陈芳, 荆夏. 南海东北部表层孢粉的分布规律及传输模式[J]. 微体古生物学报, 2017, 34(3): 302-319. [Yu Shaohua, Chen Fang, Jing Xia. Pollen distribution and their transportation pattern in the marine surface sediments of the north-eastern continental margin, South China Sea, China[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2017, 34(3): 302-319.]
- [16] 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[J]. 科学通报, 2014, 59(8): 687-700. [Tong Guobang, Long Jiangping, Li Tuanjie, et al. Sediment environment of surface pollen in sea area to the west of Guangdong and east of Hainan [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(8): 687-700.]
- [17] 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[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(2): 93-108. [Dai Lu, Weng Chengyu, Lu Jun, et al. Pollen and spore distribution in the surface sediments of the northern South China Sea and their transportation[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(2): 93-108.]
- [18] 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[J]. 科学通报, 2012, 57(9): 743-752. [Tong Guobang, Chen Liang, Long Jiangping, et al. Surface pollen distribution patterns in Beibu Gulf and corresponding sediment dynamics environment[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(9): 743-752.]
- [19] 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[J]. 海洋通报, 2002, 21(4): 28-36. [Zhang Yulan, Zhang Weidong, Wang Kaifa, et al. Studies on the relationship between spore-pollen of surface sediments and vegetation of the continental margin in the northeastern South China Sea[J]. Marine Science Bulletin, 2002, 21(4): 28-36.]
- [20] 陆继军. 福建沿岸晚第四纪孢粉组合古植被和古气候[J]. 地理科学, 1994, 14(4): 381-383. [Lu Jijun. Late Quaternary spore-pollen assemblages, paleovegetation and paleoclimate along Fujian coast[J]. Scientia Geographica Sinica, 1994, 14(4): 381-383.]
- [21] 荆夏, 陈芳, 李顺, 等. 台湾海峡西北部表层沉积孢粉分布规律及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(5): 81-88. [Jing Xia, Chen Fang, Li Shun, et al. Distribution pattern of sporopollen in surface sediments of northwestern Taiwan Strait and its geological significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(5): 81-88.]
- [22] 吴同. 温州沿海平原第四纪地层及古环境演变[D]. 成都: 成都理工大学, 2019. [Wu Tong. Quaternary strata and paleoenvironmental evolution in coastal plain of Wenzhou[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.]
- [23] 李杰, 杨士雄, 梅西, 等. 中国陆架海区第四纪孢粉学研究进展[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(2): 42-51. [Li Jie, Yang Shixiong, Mei Xi, et al. Progress of Quaternary palynology researches in Chinese shelf areas[J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(2): 42-51.]
- [24] 丛静艺, 袁忠鹏, 胡刚, 等. 长江远端三角洲多源沉积分异作用及其动力机制[J]. 沉积学报, 2020, 38(3): 528-537. [Cong Jingyi, Yuan Zhongpeng, Hu Gang, et al. Sedimentary differentiation and hydrodynamic environment of multi-sourced sediment in the Changjiang distal delta[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(3): 528-537.]
- [25] Milliman J D, Farnsworth K L. River discharge to the coastal

- ocean: A global synthesis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 304-307.
- [26] Liu X T, Li A C, Dong J, et al. Provenance discrimination of sediments in the Zhejiang-Fujian mud belt, East China Sea: Implications for the development of the mud depocenter[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 151: 1-15.
- [27] 刘喜停, 李安春, 马志鑫, 等. 沉积过程对自生黄铁矿硫同位素的约束[J]. *沉积学报*, 2020, 38(1): 124-137. [Liu Xiting, Li Anchun, Ma Zhixin, et al. Constraint of sedimentary processes on the sulfur isotope of authigenic pyrite[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(1): 124-137.]
- [28] Dou Y G, Yang S Y, Shi X F, et al. Provenance weathering and erosion records in southern Okinawa Trough sediments since 28 ka: Geochemical and Sr - Nd - Pb isotopic evidences[J]. *Chemical Geology*, 2016, 425: 93-109.
- [29] 李安春, 张凯棣. 东海内陆架泥质沉积体研究进展[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 705-727. [Li Anchun, Zhang Kaidi. Research progress of mud wedge in the inner continental shelf of the East China Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2020, 51(4): 705-727.]
- [30] Liu J P, Li A C, Xu K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(17/18): 2141-2156.
- [31] 于俊杰, 彭博, 兰佑, 等. 孢粉证据揭示 MIS 5a 以来福建东北沿海地区人类活动、海平面及气候变化[J]. *地球科学*, 2021, 46(1): 281-292. [Yu Junjie, Peng Bo, Lan You, et al. Palynological record revealed anthropogenic deforestation, sea level and climate changes since marine isotope stage 5a in the northeastern coast of Fujian province [J]. *Earth Science*, 2021, 46(1): 281-292.]
- [32] 吴少元. 中全新世以来福建东北地区植被与环境变化[J]. *微体古生物学报*, 2019, 36(2): 181-189. [Wu Shaoyuan. Reconstructing climate change and human activities based on pollen and spore data in northeast Fujian province since the Middle Holocene [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2019, 36(2): 181-189.]
- [33] 王伏雄, 钱南芬, 张玉龙, 等. 中国植物花粉形态[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 1995. [Wang Fuxiong, Qian Nanfen, Zhang Yulong, et al. Pollen flora of China[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1995.]
- [34] 中国科学院植物研究所, 华南植物研究所. 中国热带亚热带被子植物花粉形态[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 1-672. [Institute of botany and South China Institute of Botany, Academia Sinica. Angiosperm pollen flora of tropic and subtropic in China [M]. Beijing: Science Press, 1982: 1-672.]
- [35] 中国科学院北京植物研究所古植物研究室孢粉组. 中国蕨类植物孢子形态[M]. 北京: 科学出版社, 1976. [Palynology, Laboratory Paleobotanical, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences. Spore morphology of pteridophytes in China [M]. Beijing: Science Press, 1976.]
- [36] 张玉兰, 龙江平. 海南岛周边近海表层沉积中的孢粉及其与周边植被的关系[J]. *海洋学研究*, 2007, 25(3): 23-31. [Zhang Yulan, Long Jiangping. Studies on the relationship between spore-pollen of submarine surface sediments and vegetation around Hainan Island [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2007, 25(3): 23-31.]
- [37] 罗敏蓉. 基于不同方法的毛茛族(毛茛科)导管穿孔板比较研究[J]. *广西植物*, 2021, 41(1): 123-132. [Luo Minrong. Comparative investigation of vessel perforation plates of Ranunculaceae Ranunculaceae based on different methods [J]. *Guihaia*, 2021, 41(1): 123-132.]
- [38] 彭玉琼, 魏明建, 徐岱楠, 等. 南黄海西部表层沉积孢粉分布规律及成因研究[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(4): 24-30, 38. [Peng Yuqiong, Wei Mingjian, Xu Dainan, et al. Research on the distribution characteristics and the formation causes of spore-pollen of the west of southern Yellow Sea [J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2010, 31(4): 24-30, 38.]
- [39] 孙煜华, 章永昌. 东海外陆架蕨类孢子的研究[J]. *海洋学报*, 1984, 6(6): 843-850. [Sun Yuhua, Zhang Yongchang. Research on fern spores in the outer shelf of East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1984, 6(6): 843-850.]
- [40] Folk R L, Andrews P B, Lewis D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand [J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1970, 13(4): 937-968.

Pollen Distribution and its Environmental Interpretation for the Surficial Sediment in the Southern Mud Belt along the East China Sea Inner Shelf

YUAN ZhongPeng^{1,2}, HU Gang^{2,3}, WANG YongHong¹, HUANG Chang¹, JIA ZhongJia¹,
LIANG WeiQiang¹, PENG Jin¹

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao, Shandong 266071, China

3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China

Abstract: The mud belt is a unique geomorphological unit that originated along the East China Sea Inner Shelf during the Holocene high sea level, which contains abundant high resolution information of sedimentary environment and paleoclimate. Pollen analysis is an effective proxy from the mud belt for researching the modern environment and has contributed to reconstructing the paleoenvironment. Based on 150 surficial sediments acquired from the mud belt, the characteristics and distribution mechanism of pollen were analyzed, as well as its influence factors. The results indicate that there are 93 types of pollen, including 47 arboreal pollen, 28 terrestrial herbaceous pollen, 12 fern spores, and 6 alga spores. *Pinus* pollen is the predominant component in pollen concentration. The pollen concentration is distributed parallel to the coastline, showing a decreasing trend seaward. Furthermore, the pollen in the research area originated from the local area and is transported to the ocean by the rivers, such as the Changjiang River, Oujiang River, and Minjiang River. The distribution of pollen concentration is controlled by the sediment type, especially the mud type, and the local ocean currents. The results present the modern depositional environment and influence factors contributing to the reconstruction of the paleoenvironment for the mud belt within the Holocene.

Key words: East China Sea inner shelf; mud belt; environmental reconstruction; pollen