

# 河口有孔虫的搬运作用及其 古环境意义(I)\*

汪品先 闵秋宝 卞云华 成鑫荣 朱晓东

(同济大学海洋地质系)

## 一、引言

研究微体化石的搬运作用, 不仅为区别埋葬群与生物群、正确再造原地的古生物组合所必需, 而且可以为古环境研究提供重要信息。早在五十年代初就认识到有孔虫死亡后, 其壳体象一般沉积颗粒一样, 被水流搬运(Illings, 1950), 因而需要辨别原地与异地埋葬的微体化石群(Canter, 1951; Jones, 1958)。有孔虫搬运作用的室内试验, 始于法国的Berthois et Le Calvez(1960), 他们首先探索了浮游有孔虫壳体与石英颗粒在水层中沉降速度的比较。后来, 西德Diester(1972)进一步作了沉降试验, 美国Berger & Piper(1972)研究了浮游有孔虫不同种的差异性沉降作用, 提出用沉降速度的分级求水流搬运作用的方法; 而Yamashiro(1975)则发现用壳体的粒度分析更能指示搬运作用的强度。西德Seibold(1978)也讨论了各种浮游有孔虫沉降速度的差异可能引起的埋葬群动力分选。墨西哥Fok-Pun等(1983)则进一步研究了水介质密度与壳形对沉降速度的影响。美国Kontrovitz等(1979)试验了15种浮游有孔虫壳的起动速度。对于底栖有孔虫搬运作用的研究, 比浮游有孔虫开始得更早。早在四十年代, 美国Phleger就注意到搬运问题, 但认为并不重要。后来, 西德的Haake(1962)与Grabert(1971)通过沉降试验分别研究了现代滨海沼泽与泻湖沉积中底栖有孔虫的侧向搬运, 英国Murray(1965等)和美国Loose(1970)探讨了搬运机理, Kontrovitz等(1978)又对12种底栖有孔虫作了起动速度的测试, 如此等等。

上述工作基本上都是在有孔虫分布区范围以内研究壳体的搬运。其实, 最好是在具有有孔虫的海区和没有有孔虫生存的陆地水域之间研究其搬运作用, 在那里应能更加清晰地看出搬运作用的结果、提出搬运作用的机理。为此, 我们近年来对于海、陆水域交界处的河口区有孔虫分布进行研究, 试图从中找出其搬运作用的某些规律及其地质意义(汪品先等, 1980; Wang & Murray, 1983; Wang, 1983a; Wang, 1983b; 汪品先, 1983; Wang et al., 1985)。

本文汇总了我们几年来工作的结果, 先从我国长江口、钱塘江口表层沉积中有孔虫壳体的分布谈起, 通过浮游样品和底质样品的对比, 不同季节样品的对比, 我国不同类

本刊编辑部收到稿件日期: 1985年12月26日。

\* 本文因篇幅较长分两期刊出, 第3期继续刊登——编者。

型河口以及我国和西欧不同类型河口的对比,来探讨河口有孔虫的搬运作用及其在指示古环境方面的意义。

本文的工作,前一阶段曾得到西德洪堡基金会的支持,后一阶段又得到中国科学院科学基金的资助,在此谨表谢意。

## 二、材料与方 法

本文的基础,是我国长江、钱塘江、西江、滦河、双台子等河口,和西德易北河口、英国Christchurch港河口等总共131个表层沉积样品的有孔虫分析。其中长江口样品最多,并曾先后三次分析:1974年分析江阴以下长江口内外及其支流(黄浦江、苏州河)表层沉积样品共13个;1980年分析崇明以下长江口内外样品40个;1982—1983年又取镇江至吴淞的长江口表层沉积样51个进行分析,合计104个。此外,还在1983年取长江口水层浮样进行有孔虫分析。同时,还分析钱塘江口与杭州湾表层沉积样8个,西江口样10个,滦河口样23个,双台子河口样3个,南流江口样2个,连同长江口在内共分析我国河口表层沉积样150个。为进行对比,分析了西德易北河口内外表层沉积样26个,水层浮游样4个,重新研究了英国Christchurch港8个河口底质样中的有孔虫。

凡我国所采样品,均用0.055毫米孔径((280目)标准铜筛冲洗;西欧样品,用0.063毫米孔径(250目)筛冲洗。经验表明,河口区有孔虫分析必须采用细筛,方能避免小个体壳的遗漏。为取得定量结果,每个样品均取干重50克进行分析,部分样品用体积法定量,冲剩烘干后经CCl<sub>4</sub>重液浮选,挑出浮出物和剩余物中的全部有孔虫。对于有孔虫过于富集的样品,采用先分样后挑样的方法。1980年以来所采长江口和易北河口的样品。均在取上甲板后即加虎红(Rose Bengal)或用虎红的酒精溶液浸泡,以进行有孔虫活个体分析。

为查明河口有孔虫的搬运作用,不仅对有孔虫群中各种的百分含量进行统计,还对优势种的壳体大小在双目实体显微镜下用测微尺进行度量,取其最大直径作为壳径,然后统计各级壳径的个体数求得大小频率分布。由于壳径统计十分费时,只在长江口与易北河口样品中采用。

下面我们先从资料最丰富的长江口和与其相似的钱塘江口讲起,然后和其它河口比较。

## 三、长江口和钱塘江口的有孔虫群

长江口与钱塘江口河床底质以粉砂为多,其中普遍含有有孔虫壳体。在入海河口的底质中,有孔虫壳体本属常见,然而长江口、钱塘江口沉积物中的有孔虫群却具有与众不同的特点:

**第一,个体细小** 长江口、钱塘江口的有孔虫壳径范围大体在75微米至525微米之间,平均值显著小于东海陆架有孔虫群的平均壳径(>220微米),也远较国内许多其它

河口的数值(如西江口为260微米)为低。它们或者是本身就小的小型种,或者是大、中型种的幼壳。若将有孔虫壳体看作沉积颗粒而计算其分选系数,则长江口、钱塘江口有孔虫群的分选系数明显高于东海陆架,其中尤以钱塘江口为高。同时,钱塘江口有孔虫的平均壳径自海区向河口减小。这种大小分选的现象,很容易使人联想到搬运作用。

**第二, 分异度低** 每个沉积样品中的有孔虫群种数,即使在河口以内通常在四十以上,远较许多其他河口为高,如珠江口在口门以内一般不足十种(李淑鸾,1935)。在钱塘江口,从钱塘江大桥下的二十余种增至杭州湾的六十余种,至东海陆架则逾百种(图1)。

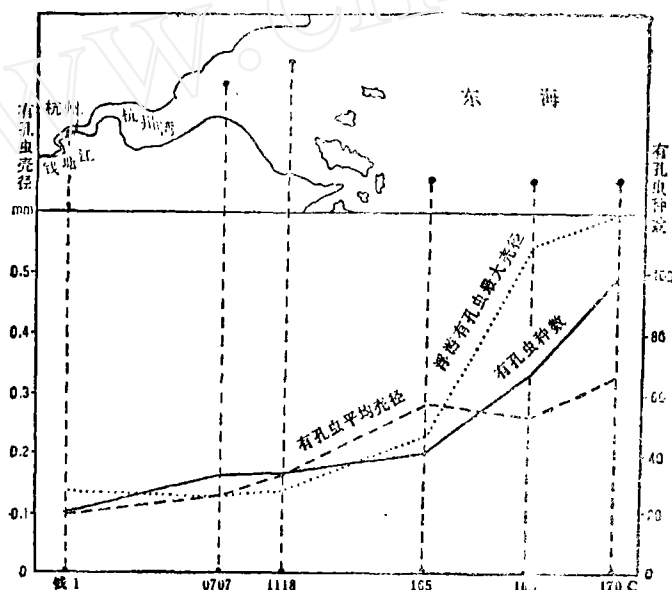


图1 东海—杭州湾—钱塘江有孔虫种数与壳径值下降趋势图(Wang, 1983b)

Fig. 1 A decreasing tendency of species number and average size of foraminifera from the East China Sea via the Hangzhou Bay to the Qiantang River, China (Wang, 1983b).

反之,有孔虫群的优势度(以两个优势种的含量百分比之和计算)在长江口和钱塘江口不过20—40%,低于一般河口(如西江口为83.4%)(图2)。分异度高、优势度低的原因,在于长江口和钱塘江口的有孔虫群不仅有毕克卷转虫(变种) *Ammonia beccarii* (Linné) var.(图版I, 图10, 11)\*凸背卷转虫 *A. convexidorsa* Zheng(图版I, 图1—4), 缝裂希望虫 *Elphidium magellanicum* Heron-Allen and Earland等广盐种,而且含有奈良小上口虫 *Epistominella naraensis* (Kuwano)(图版I, 图8, 9), 具缘小泡虫 *Bulimina marginata* d'Orbigny(图版I, 图5)等窄盐种。特别值得指出的是窄盐海相的浮游有孔虫虽然都只见细小壳体(图版I, 图12, 13),含量却高达13—25%,而胶结质壳却几乎不见,这与河口半咸水中只有广盐性底栖有孔虫才能生存的规律大相径庭,与国外许多河口以少量广盐性胶结壳有孔虫占优势的报道亦不符合。

\* 图版见本刊第六卷第三期。

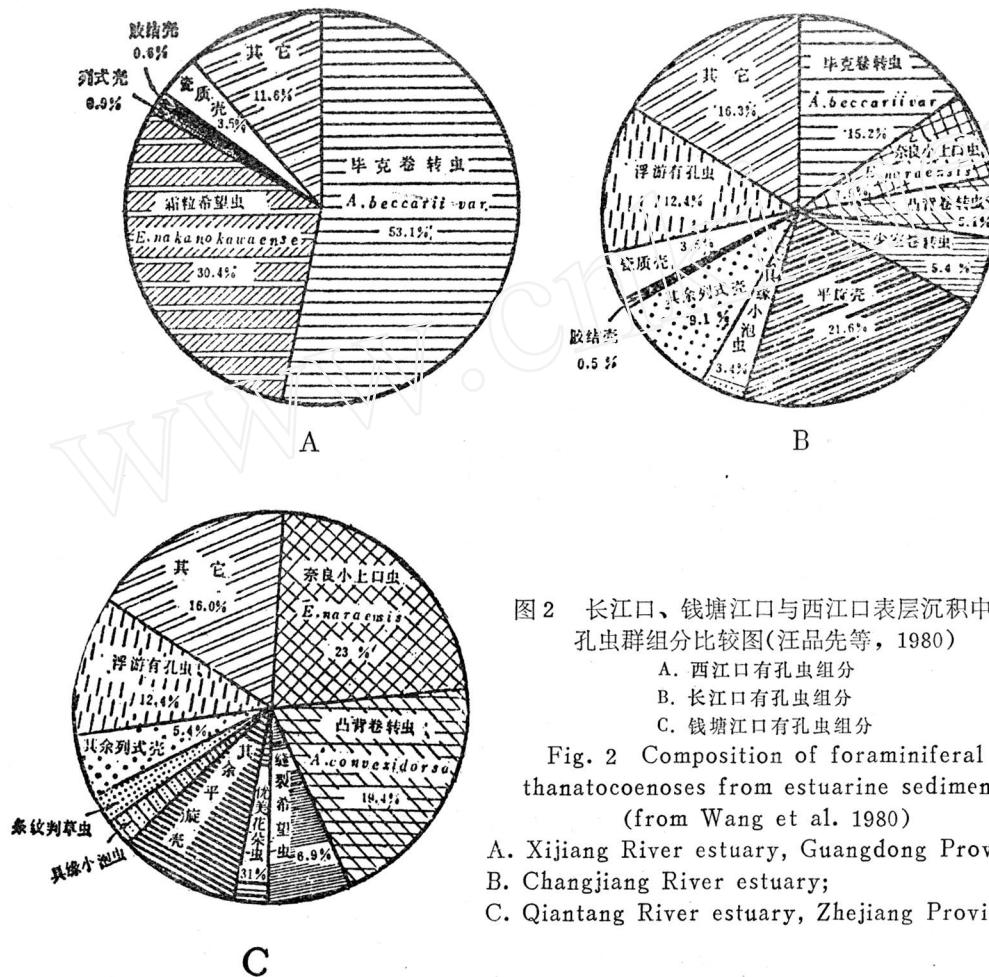


图2 长江口、钱塘江口与西江口表层沉积中有孔虫群组分比较图(汪品先等, 1980)

- A. 西江口有孔虫组分  
B. 长江口有孔虫组分  
C. 钱塘江口有孔虫组分

Fig. 2 Composition of foraminiferal thanatocoenoses from estuarine sediments (from Wang et al. 1980)

- A. Xijiang River estuary, Guangdong Province;  
B. Changjiang River estuary;  
C. Qiantang River estuary, Zhejiang Province.

**第三, 有孔虫组合盐度分带不明** 长江口、钱塘江口的粉砂沉积所含有孔虫群一律由小个体的 *E. naraensis* 与 *A. convexidorsa* 占优势, 长江口砂质沉积物中含有较多 *A. beccarii* var. 等较大壳体。除此之外, 在河口区内属种组合别无明显的变化, 这与有孔虫组合随盐度而变, 呈明显分带性的美国 James 河口 (Nichols and Norton, 1968). 我国珠江口 (李淑鸾, 1985) 等完全不同。

可见, 壳体细小, 分选良好, 广盐与窄盐种混生, 组合不按盐度分带, 这是长江口、钱塘江口沉积物中有孔虫群的鲜明特色。是什么原因造成这种特殊的有孔虫群? 是否确系搬运作用所致?

为此, 对1980年所采长江口40个表层沉积样进行虎红染色分析, 含原生质的有孔虫活个体均可被虎红染红, 而无原生质的死个体保持原色 (Walton, 1952)。结果发现, 活有孔虫几乎只分布于入海口之外, 而且在口外南部的剖面中含量比较丰富, 每100毫升中的活个体由西向东从十余枚增至数百枚; 而河口以内仅在两个站各见一枚染色个体。1982年3月与1983年8月分别对长江口以内吴淞口至镇江段的31个和20个表层样品

再度进行虎红染色, 结果仍无活有孔虫发现。由此看来, 长江口内实际上并无有孔虫生存, 底质中发现的壳体不过是搬运而来的异地埋葬群。然而, 这些壳体又从何处搬运而来?

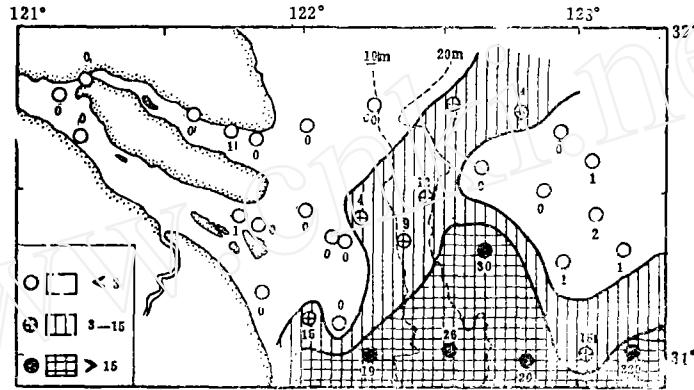


图3 长江口表层沉积中活有孔虫数量分布图

(数字示每100毫升中活有孔虫个体数, 1980年3月采样)

Fig. 3 Distribution of living-foraminiferal number in surface sediments of the Changjiang River estuary (figures denote number of living foraminifers in 100 ml sediment samples collected in March, 1980)

长江口底质中常见的四种有孔虫中 *Ammonia convexidorsa* 主要生活在苏北海岸带 (Wang, Hong & Zhan, 1985)、*Ammonia beccarii* var., *E. magellanicum* 活个体分布于长江口外(图4), 而 *Epistominella naraensis* 的活个体则见于东海内陆架外部, 即在

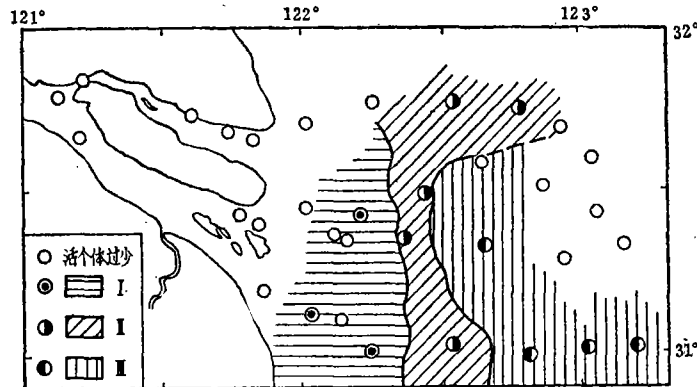


图4 长江口活有孔虫组合分布图

I—*Elphidium magellanicum*—*Ammonia beccarii* var. 组合

II—*Ammobaculites* sp. —*Arenoparella asiatica* 组合

III—*Nonionella jacksonensis*—*Hanzawaia nipponica* 组合

Fig. 4 Distribution of living-foraminiferal assemblages in surface sediments of the Changjiang River estuary.

本文研究范围以东的浅海区。(Zheng et al., 1983)。至于长江口、钱塘江口的潮间带, 据洪雪晴的研究, 活有孔虫群以小假九字虫 *Pseudononion minutum* Zheng, 孔缝筛九字虫 *Cribrononion porisuturalis* Zheng 为特征, 也含相当多的 *A. beccarii* var., 却不见长江

口埋葬群中的优势种 *E. naraensis* 和 *A. convexidorsa* 生活。这两个小个体种是应从陆架和海岸带经远道搬运进入长江口的。在这两条河口, 占有孔虫群个体数1/3左右的浮游有孔虫, 本属窄盐海相生物, 此处所见全系细小壳体, 更无疑是由海区携入。然而这些壳体又是靠何种途径搬运的呢?

沉积颗粒在水介质中的搬运, 不外乎滚动、跳跃和悬移三种形式。滚动搬运的结果常使壳体破碎以致消失, 不应是长江口有孔虫埋葬群运输主要途径; 而跳跃和悬移搬运都需在水层中进行, 如果从水层中采集浮游样, 其中确有有孔虫壳体存在, 就可以证明这种搬运途径。为此, 1983年8月从南通到崇明岛西端共采集长江水层浮游样6个, 其中5个发现含有孔虫, 并且主要为 *Elphidium magellanicum*, *Ammonia convexidorsa* *A. beccarii* var. 等种; 正与长江口表层沉积中所见一致。如果再考虑到长江口底质中的有孔虫大多保存较好, 小个体壳尤其新鲜完整, 相信悬浮搬运应是主要形式。

有孔虫壳体在水层中搬运, 必然象其它沉积颗粒一样随水动力因素而发生机械分选。比如说, 表层沉积的粒径与所含有孔虫壳的壳径之间, 应当存在相关关系。图5所示, 是长江口江阴—吴淞段表层沉积中沉积物的平均粒径与所含四个有孔虫优势种以及浮游有孔虫平均壳径的比较, 我们得出粒径曲线与壳径曲线相当一致, 证明曾经共同经历了机械分选作用。至于图5中4号站 *E. magellanicum* 壳径偏高, 是统计个体过少(不及5枚)的结果。

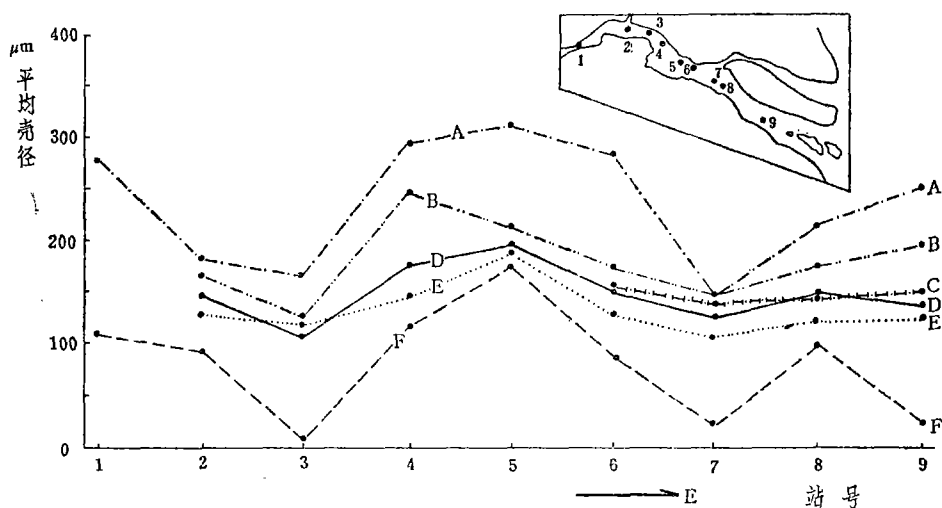


图5 长江口表层沉积的平均粒径与有孔虫常见种平均壳径关系图(1982年3月采样)

A—*Ammonia beccarii* var.; B—*Elphidium magellanicum*; C—浮游有孔虫;  
D—*Ammonia convexidorsa*; E—*Epistominella naraensis* F—沉积物平均粒径。

Fig. 5 Correlation of average grain size and average test size of common foraminiferal species in surface sediments from the Changjiang River estuary (samples collected in March, 1980)

能够将陆架有孔虫搬运进入河口的, 应当只有潮流。长江口属于中潮型河口, 平均潮差2.6米, 钱塘江口为强潮河口, 平均潮差5.5米, 潮流的强度足以携带小型有孔虫壳

体。为了证明潮流确是搬运营力，可以比较一下长江口枯水期与洪水期的有孔虫埋葬群。洪水期径流大增，使潮流搬运作用减弱，由海区携入有孔虫的能力相应下降；反之，枯水期径流减小，潮流搬运作用相对加强，携带有孔虫进入河口的能力应当增加。果然。1982年3月枯水期与1983年8月洪水期长江口内表层沉积中所含有孔虫个体数量十分悬殊，82年枯水期在江心砂以下每50克干样的平均丰度高达1300枚以上，而83年洪水期平均只有81枚(图6)；至于浮游有孔虫壳体的分布区和富集区的范围，在洪水期和枯

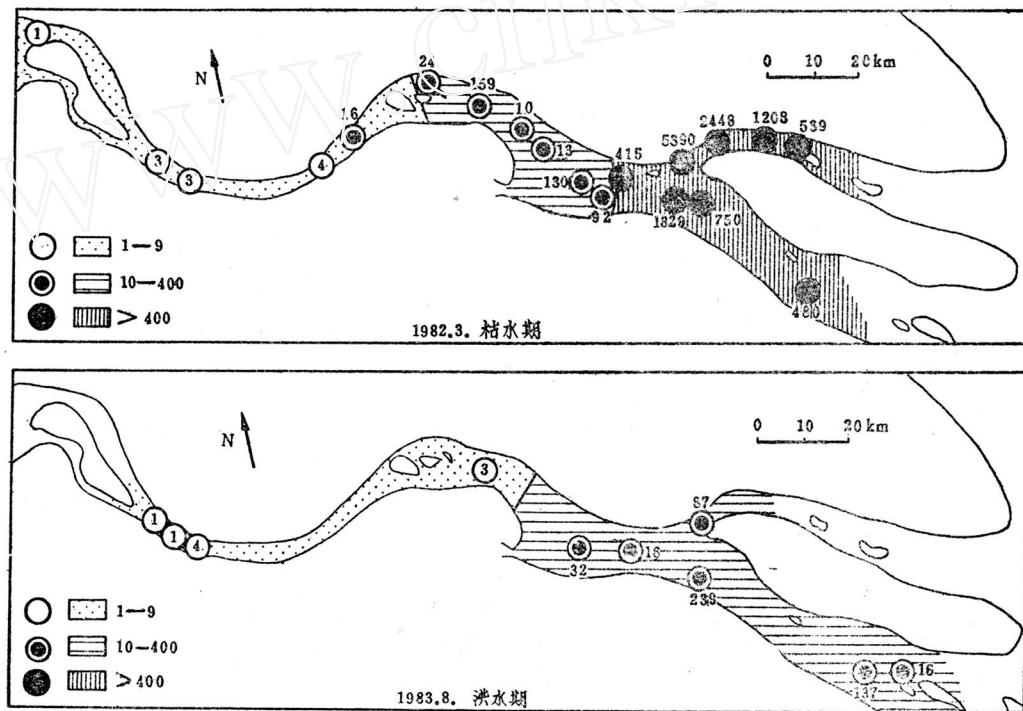


图6 长江口内洪水期与枯水期表层沉积中有孔虫丰度比较图  
(数字示每50克干样中有孔虫壳体数)

Fig. 6 Foraminiferal abundance in surface sediments in the Changjiang River estuary: a comparison between flood (upper) and dry (lower) seasons.  
(Numbers denote number of tests per 50g of dry sediment)

水期的区别更加显著(图7)。这样，枯水期与洪水期的比较，证实了潮流是搬运有孔虫进入河口的主要营力，同时也反映出长江口颗粒搬运与沉积作用十分迅速，以致随着季节的变换，表层沉积中的有孔虫含量就可以有如此强烈的差异。

以上讨论，证明长江口、钱塘江口表层沉积中的有孔虫群系由潮流作用将壳体以悬移(亦可能有跳跃)方式运入河口以内，这种沉积机理也为这些河口有孔虫埋葬群的特点提供了解释。首先，能够以悬移状况作较长距离搬运的主要是小个体壳，因而上述河口有孔虫群壳体细小，其次，机械搬运时只有按起动和沉降速度的分选，并无盐度等生态上的限制，因此广盐和窄盐种，底栖和浮游种相互混杂，而分异度数值升高；第三，既然是机械搬运与分选的产物，河口内有孔虫埋葬群必然只见大小分选，而不按盐度分

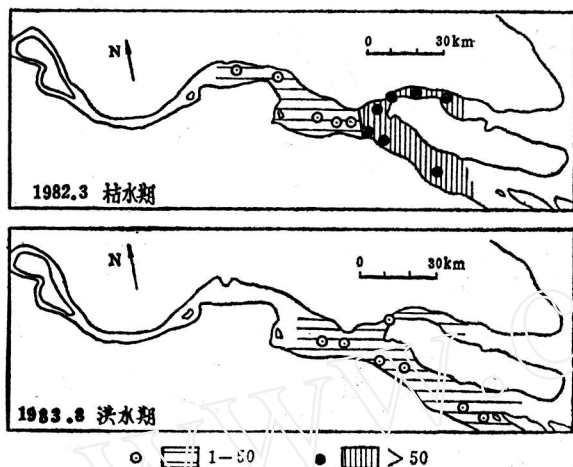


图7 长江口内洪水期与枯水期表层沉积中浮游有孔虫丰度比较图(枚/50克干样)

Fig. 7 Abundance of planktonic foraminifers in surface sediments in the Changjiang River estuary: a comparison between flood (upper) and dry (lower) seasons. (number of tests per 50g dry sediment)

带。

阐明了长江口、钱塘江口有孔虫群的来源与沉积机理以后,接着的问题是:这只是这两个河口特有的现象,还是某类河口共有的特点?这就要求对国内、外其它河口作一调查,寻找具有相似有孔虫群的实例。

#### 四、易北河口的有孔虫群

类似长江口、钱塘江口的小个体有孔虫埋葬群,我们在西德易北河(Elbe)口泥—粉砂质表层沉积中发现,那里的有孔虫平均壳径只有140—150微米,种数都可以超过30(Wang, 1983), (图8、图9)。

易北河注入北海,平均潮差2米,底质从细砂至粉砂质泥不等。经过对河口内外26个表层沉积样品的分析,见有丰富的底栖有孔虫群。我们发现,在数十种有孔虫中,常见者(含量可超过10%)不过五种,即洞穴希望虫 *Elphidium excavatum* (Terguem), (图版I, 图15), *Ammonia beccarii* (Linne)(s.l)(图版I, 图14), 德国先希望虫 *Protelphidium germanicum* (Ehrenberg) (图版I, 图17), 扁形先希望虫 *P. depressulum* (Walker & Jacob) (图版I, 图16), *Elphidium williamsoni* Haynes。然而易北河口的有孔虫群并非均由小个体壳组成,属种成分亦不均一,可以分为两种组合:

1. *E. excavatum*组合 *E. excavatum*种占全群的40%以上,有孔虫壳体小,分布在泥质沉积区;

2. *A. beccarii*—*P. germanicum*组合: 此两优势种总和在35%以上,有孔虫壳体大小正常,分布在砂质沉积区。

为了查明这两种组合的性质及其形成原因,我们仍用虎红染色法对上述26个样品进行活有孔虫分析。结果只见12种有活个体,其中 *E. excavatum*一种竟占活个体总数的80.7—98.4%,而 *A. beccarii*与 *P. germanicum*含量只在1%左右。生物群和埋葬群的严重区别,也使人想起搬运作用影响的可能性。由于上述第1组合见于泥质沉积,第2组合



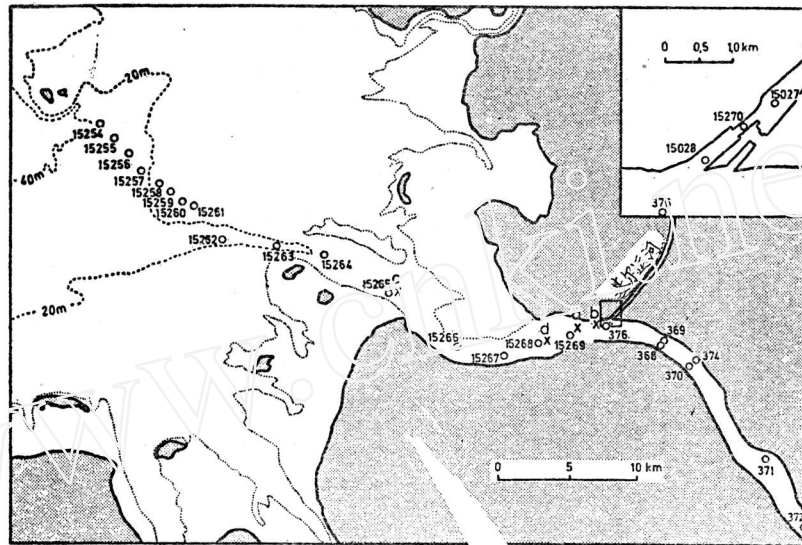


图 8 西德易北河口进行有孔虫分析的表层沉积样品站位图(Wang, 1983a)  
Fig. 8 Locations of surface sediment samples in the Elbe estuary for foraminiferal analysis. (Wang, 1983a)

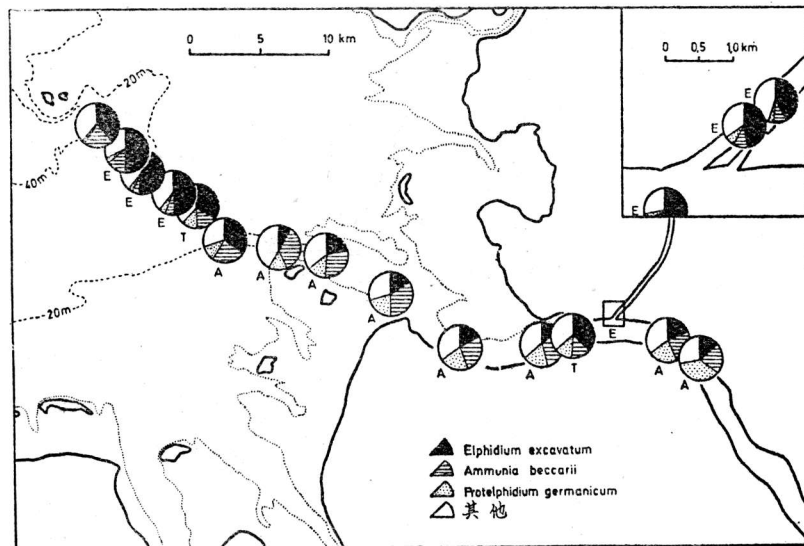


图 9 西德易北河口表层沉积中有孔虫组合分布图(Wang, 1983b)  
A *Ammonia beccarii*-*Protelphidium germanicum* 组合  
E *Elphidium excavatum* 组合  
T 过渡组合  
Fig. 9 Distribution of foraminiferal assemblages in the Elbe estuary, West Germany. (Wang, 1983b)

见于砂质沉积中，而 *E. excavatum* 壳体又明显小于 *A. beccarii* 与 *P. germanicum* (三种在每个样品中的平均壳径依次为：133—295微米，138—365微米，143—310微米，很可能两

个组合的产生是机械分选的结果，而与生物群的分区无关。为检验这种可能性，我们取河口外一个既含泥质又含砂质的样品(站位No. 15261)，用125微米孔径的铜筛作人工分选，结果在大于125微米的组分中所得有孔虫群属*A. beccarii*—*P. germanicum*组合，小于125微米组合中属*E. excavatum*组合(图10)。证明壳体大小分选正是这两个组合形成的原因。

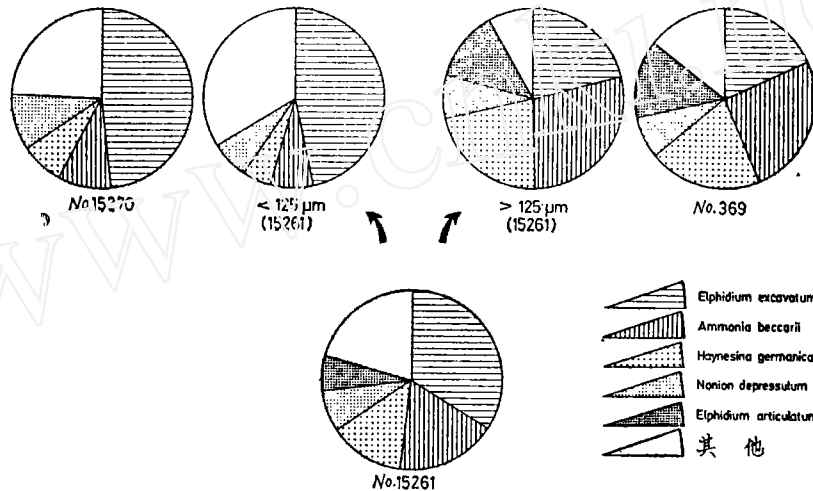


图10 用人工分选制造易北河口两个有孔虫组合  
No. 15261样经125微米筛分为两个组分，粗组分中的有孔虫群相当*A. beccarii*—*P. germanicum*组合(与样品No. 369相似)，细组分中的相当*E. magellanicum*组合(与样品No. 15270相似)(Wang, 1983b)

Fig. 10 Imitation of sorting effect on foraminiferal assemblages in the Elbe estuary by sieving. Sample No. 15261 was splitted into two fractions, the coarser one (larger than 125  $\mu\text{m}$ ) corresponds to *A. beccarii*—*P. germanicum* assemblage (similar to sample No.369), the thinner one (smaller than 125  $\mu\text{m}$ ) to *E. magellanicum* assemblage (similar to sample No. 15270). (Wang, 1983b)

如果以63 $\mu\text{m}$ 为界，将沉积物分为粗、细两种组分，然后将易北河口表面沉积剖面的粗组分含量曲线与有孔虫埋葬群中*E. excavatum*, *A. beccarii*, *P. germanicum*等种的百分含量曲线，以及有孔虫壳径曲线相比较(图11)，可以发现它们都有互相平行的趋势，说明有孔虫的属种组合、壳径大小都和沉积颗粒一样受水动力控制，同样遭受机械分选。但是图11又表明，活有孔虫的壳径，无论是所有种的平均值或者优势种*E. excavatum*的平均值，都不随沉积物粒径而起伏，只是由西向东(由海区向河口内)逐渐下降。为取得更加明确的结论，我们对逐个样品*E. excavatum*的活个体与死个体分别统计，将每个样品中不同大小壳体的百分含量进行比较(图12)。不难看出，从海区的No. 15234站到河口内的No. 15027站(图中自上而下)，活个体壳径大小平均值逐渐减小，而死个体壳径大小都有反复变化，这种反复正与沉积物粒径的变化相应。以上数据，雄辩地证明了有孔虫生物群(活个体)受生活环境控制，因而向河口内个体变小，而埋葬群(死个体)都受水动力控制，随沉积物粒径而变化。因此，易北河口的有孔虫群也和长江口、钱塘江口

一样，主要是搬运作用的产物。

为了验证易北河口的有孔虫群是否和长江口一样主要靠水层中的悬移搬运，我们从易北河口水层中取浮游样品四个进行分析，结果均见有丰富的底栖有孔虫小壳，其中还包括个别小型活个体在内。如果将同一站位水层中的有孔虫群与表层沉积中的有孔虫群作一比较，可以看出两者之间无论在各种百分含量或是平均壳径方面，都十分相似(图13，从而进一步证明沉积物中的有孔虫确系水层中搬运而来，与长江口所见相同。

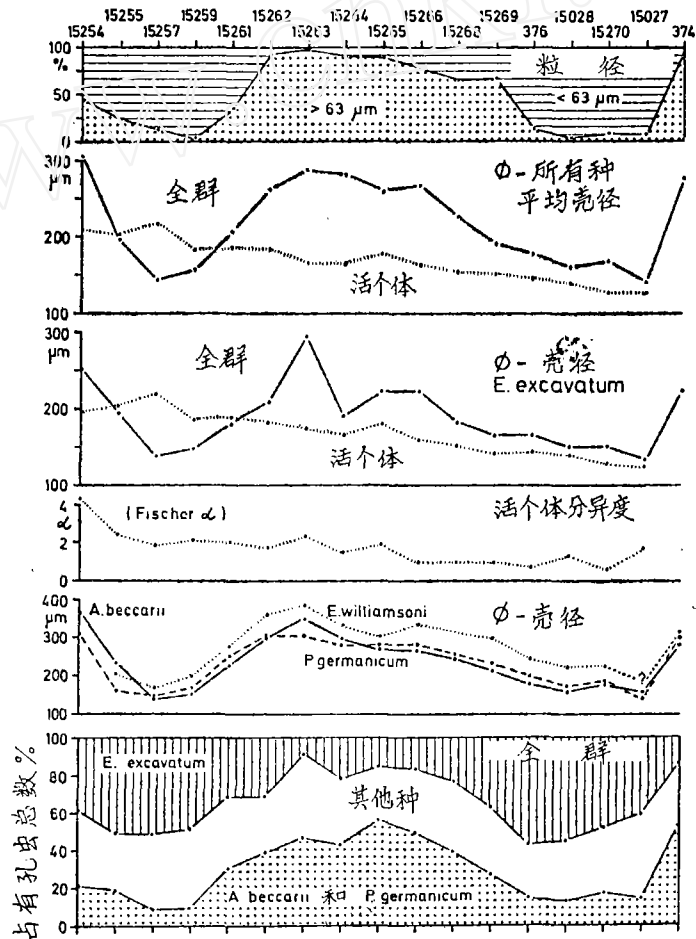


图11 易北河口表层沉积中有孔虫群属种组合

壳径大小与沉积物粒径的相互关系(站位见图8)(Wang, 1983a)

Fig. 11 Dependence of taxonomic composition of foraminiferal assemblages and test diameter on grain size. (for sampling locations see Fig. 8) (Wang, 1983a)

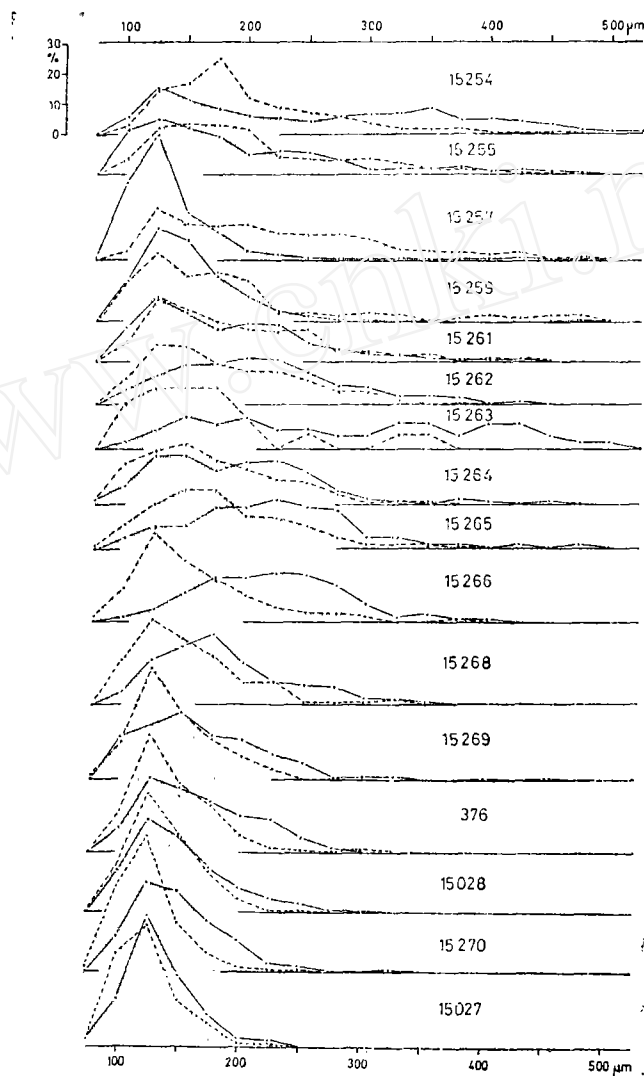


图12 易北河口表层沉积中*Elphidium excavatum*活个体与死个体壳径比较图  
(图示不同壳径个体的百分含量,虚线灰色为活个体,实线白色为死个体。  
站位见图8)(Wang, 1983a)

Fig. 12 Test-size curves of *Elphidium excavatum* in surface sediments of the Elbe estuary: comparison between living (dotted line, shaded) and dead (solid line, blank) populations (for sample locations see Fig. 8). (Wang, 1983a)

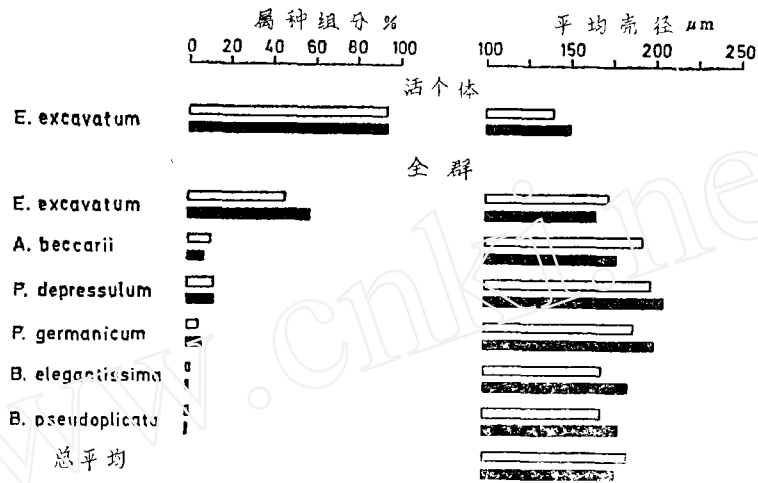


图13 易北河口浮游样品(白色)与表层沉积样品(黑色)中有孔虫群属种组分与壳径大小的比较(Wang, 1983b)

Fig. 13 Comparison of foraminiferal assemblages in plankton (blank) and muddy sediment (black) samples in the Elbe estuary.(Wang,1983b)

(未完 待续)

## 《渤海地质》专著简介

### SYNOPSIS OF GEOLOGY OF THE BOHAI SEA

渤海是我国内海，通过渤海海峡与黄海相连。在五十年代末和六十年代初，在国家科委的领导和组织下，中国科学院海洋研究所地质研究室与其它单位一起，曾对渤海的表层地质地貌状况开始了调查，取得不少资料，同时开展了人工地震和重力试验性测量，随后又进行了几次系统的地质地貌和海底工程地质的调查研究。近几年又进行了海底第四纪地层的钻探取芯工作，为研究渤海的形成取得了重要的资料。本书是根据这些调查研究取得的资料，并参考有关单位研究成果而编写的。

全书分两编。第一编是现代渤海，即全新世海侵发生后至现代的渤海。该编系统介绍了现代渤海海岸与海底地貌、现代海洋沉积作用、海底沉积物的工程地质性质和现代沉积地球化学特征等问题。这些问题的研究为港湾建设、渤海海底及沿岸油田开发和施工等提供科学依据，不但对经济建设具有重要意义，而且对发展我国海洋地质科学做出重要贡献。

渤海海岸划分为两种类型，其一为基岩型，其二为淤积型。前者主要分布于山东半岛北部沿岸区、辽东湾东西两侧海岸地区，后者主要分布于莱州湾。渤海的三角洲主要是黄河三角洲和滦河三角洲。黄河每年向河口输砂十二亿吨左右，促使三角洲及临近海岸的淤长，当河口改道后由于泥砂来源减少，则造成三角洲和临近海岸的冲刷。渤海海底地貌的形成与海底水动力状况、河流与潮流的分布特征、水深等因素有关。海底地貌