

长江口及邻近海域悬浮颗粒重晶石特征与成因探讨

逢悦 范德江 孙晓霞 刘明 杨作升

(中国海洋大学 海洋地球科学学院 海底科学与探测技术教育部重点实验室 山东青岛 266100)

摘要 海洋环境中重晶石的形成和保存是元素 Ba 生物地球化学过程的重要环节,在反演海洋古生产力领域具有重要价值。但是多年来该方面的研究主要集中在深海海域,而对河口及近海海域很少涉及。本研究使用 SEM 和 EDX 等方法对长江口及邻近海域 5 个断面 36 个站位的悬浮体中的重晶石矿物进行了系统的观察,对重晶石颗粒类型、空间分布和影响因素进行了研究。结果表明:该区重晶石颗粒包含自形晶体、长条状晶体、不规则形态晶体和集合体等 4 种类型,含少量 Sr 元素,大部分重晶石颗粒表面出现溶蚀现象;重晶石颗粒粒径主要分布在 0.5~3 μm。通过研究发现,长江口及邻近海域悬浮体中重晶石的形成主要受到微环境中生物作用的控制,该区初级生产力的发育状态和重晶石颗粒的沉降差异造成重晶石空间分布具有表层含量较多、由岸向外增加的现象。

关键词 长江口 悬浮体 重晶石 初级生产力

第一作者简介 逢悦 女 1991 年出生 硕士研究生 海洋沉积学 E-mail: yuepang_ouc@163.com

通讯作者 范德江 男 教授 E-mail: djfan@ouc.edu.cn

中图分类号 P619.25⁺1 **文献标识码** A

0 引言

重晶石是元素钡(Ba)的重要载体,它的形成、沉淀、溶解和保留过程对了解大洋环境的生物地球化学过程具有十分重要的意义^[1-2]。自从发现 Ba 的积累率与高生产力保持一致并与有机碳通量密切相关之后^[3-4],生源 Ba 作为古生产力指标就得到广泛的应用,并取得了一系列的研究成果^[5-12]。

大洋水体中普遍存在重晶石颗粒。Goldburg *et al.*^[13]在赤道太平洋的上升流地区发现了大量的重晶石颗粒,并与海洋生产力相联系;Dehairs *et al.*^[14]在大西洋和太平洋水柱中分离出硫酸钡颗粒,粒径 1 μm 的颗粒居多,并发现其与生产力相关性较高。Bertram 和 Cowen^[15]描述了北太平洋中部水体中重晶石的形态和成分组成,测量了重晶石晶体的粒度,并指出重晶石晶体存在卵形、六边形和微晶集合体三种形态,同时发现由于溶蚀作用导致重晶石晶体表面粗糙的现象。Robin *et al.*^[16]分析过赤道北大西洋和太平洋中北部沉积物中的重晶石粒径。Sternberg *et al.*^[17]在地中海西北部的悬浮体颗粒中发现六边形重晶石晶体,在浮游植物生长旺盛的时期重晶石含量也会升高,认为重晶石形成于腐败有机生物体的微环

境。在河口区对重晶石的认识相对较少,Guay *et al.*^[18]调查了北极主要河流河口区及其邻近海域溶解钡的季节变化特征,发现溶解钡在区分河流物源中具有重要作用。Colbert *et al.*^[19]发现在西北太平洋河口地区,季节变化和河口过程对溶解钡含量具有重要影响,特别是河口过程会导致钡含量增加。然而,科学家对海洋中重晶石的存在形式尚不清楚,对重晶石的形成机理也存在生物和非生物成因两种认识,这制约了 Ba 作为古生产力指标的应用。

长江口及邻近海域属于大河控制下的陆源碎屑沉积区,但也是高生产力海区。由于众多陆源碎屑的稀释作用使得该处自生重晶石难以发现,迄今未见针对陆架海区悬浮体重晶石的研究报道。为此,本文通过对长江口及邻近海域水体中颗粒态重晶石的形貌、组分和空间分布特征的分析,结合该区的海洋环境特征,试图阐明该区颗粒态重晶石类型、形成机制和影响因素,为深入认识陆架海区生源重晶石和 Ba 的生物地球化学过程提供依据。

1 研究区概况

长江是我国的第一大河流,流域面积达 1.8×10^6 km²,年均入海的水量达 8 912 亿立方米、输沙量 4.86

亿吨,并在河口处形成了特大型三角洲。受到长江入海水沙及海洋的共同影响,长江口及邻近海域沉积环境复杂,发育有长江冲淡水、浙闽沿岸流、黄海沿岸流、台湾暖流等水团^[20-21];该海域水体深度较小,水体交换良好,营养盐丰富,初级生产力较高^[22-27]。

调查区位于长江口及邻近海域,共5个调查断面、36个站位(图1),通过国家自然科学基金委员会组织的2011年10月的长江口及东海公共航次获取样品和其他调查数据。调查船为“科学三号”,使用 Seabird 17plus 型 CTD 上配置的 Rosette 采水器采集水体样品,分别采集表层、中层(0.6H,即水深的0.6倍处)、底层(距离海底2 m)样品。采集的水体样品约5 L,取其中30~50 mL不等(根据水体的浑浊程度)稀释并抽滤到滤膜上,同时用蒸馏水洗盐三次,滤膜在室温下干燥获得悬浮体颗粒样品,封闭保存、待用。

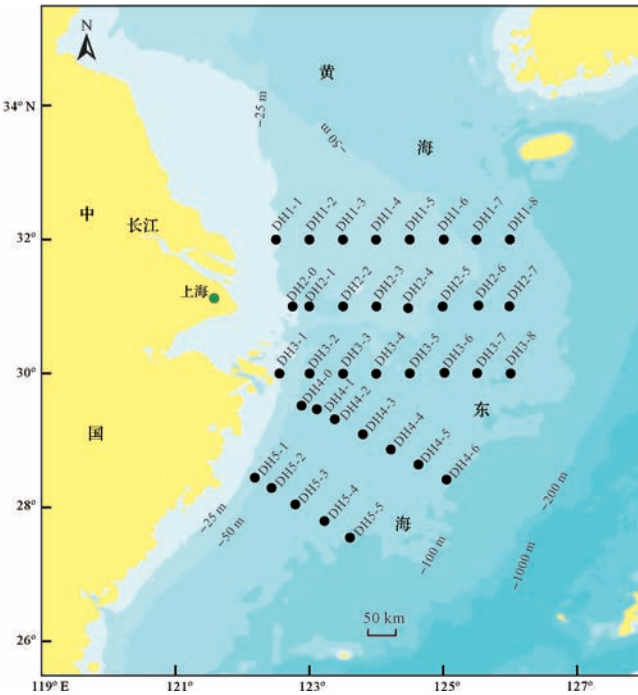


图1 研究区及调查站位图

Fig.1 Study area and sampling site

2 实验方法

通过扫描电镜(SEM)和X射线能谱分析仪(EDX)联用,对悬浮体颗粒进行形貌观察和成分分析。首先,从载有悬浮体颗粒的滤膜上剪切大约 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 的正方小片,置于铜样品盘上,喷金镀膜,供颗粒物SEM观察使用;其次,将样品放入电镜样品室,设置工作模式:高真空模式、工作距离10 mm、加速电压25 kV,并采用背散射电子成像技术(BSE)对硫酸钡

颗粒进行观察,采用能谱仪以点、面相结合的方式对颗粒物成分的分析,并拍摄图像。重晶石颗粒一般较小,所以采用二次电子成像与背散射成像技术进行对比,避免遗漏。本研究所采用的扫描电镜型号为荷兰FEI公司生产的Quanta 200型环境扫描电镜,能谱分析仪为美国EDAX公司生产的GENESIS 2000型X射线能谱分析仪。通过AutoCAD软件进行SEM图像中的重晶石粒径统计分析。

3 研究结果

3.1 重晶石颗粒石形态特征

重晶石属于斜方晶系斜方双锥晶类,有三组中等至完全解理,通常成板状、粒状、纤维状集合体^[28]。在研究区内观察到的重晶石多以单晶形式出现,也有集合体形式存在,同时发现重晶石多有溶蚀现象发生。由于受到水深及水体中有机体的生物作用和有机包膜作用的影响,重晶石形貌更加复杂多样^[29-30]。依据重晶石形态可大致将其分为四种类型:自形晶体、长条状晶体、不规则晶体和集合体颗粒。

(1) 自形—半自形重晶石颗粒

此类重晶石晶体轮廓清晰,晶棱明显,但边缘也有溶蚀现象发生,晶面光滑,部分晶粒表面出现溶蚀坑。图2A为自形重晶石晶体,形态为斜方柱,晶体棱角、边缘清晰,晶体表面光滑,仅局部边缘出现溶蚀现象;图2B为半自形重晶石,边缘溶蚀较明显,晶面较平整,可见 60° 晶面交角;图2C为斜方柱和斜方双锥构成的聚形,自形晶体,棱角和边缘清晰,但是在晶面上发育多个无规律排列的细小溶蚀坑;图2D为半自形重晶石,晶体边缘因溶蚀而凹凸,晶面溶蚀明显。

(2) 长条状重晶石颗粒

此类重晶石晶体形态以卵形和拉长卵形为主,重晶石晶体边缘出现明显的溶蚀凹坑(图3A,B),或者在中央部分出现溶蚀条带,条带可沿着长条形晶体延伸方向发育、亦可以垂直于延伸方向发育(图3C,D)。该形态的重晶石与孙晓霞等^[29]在大洋水体中见到的箭头状重晶石晶体相似。能谱分析表明具有溶蚀的重晶石含Sr量相对较高^[29-30],特别是图3B重晶石,Sr的质量百分比达3.49%,其他颗粒重晶石Sr含量平均在1%左右。

(3) 不规则形重晶石颗粒

该类型重晶石呈三角状或者不规则多边形,晶体棱角清晰,边缘弱溶蚀,局部见清晰地细小溶蚀坑(图4)。重晶石形态中未有三角形的记载,推测这类

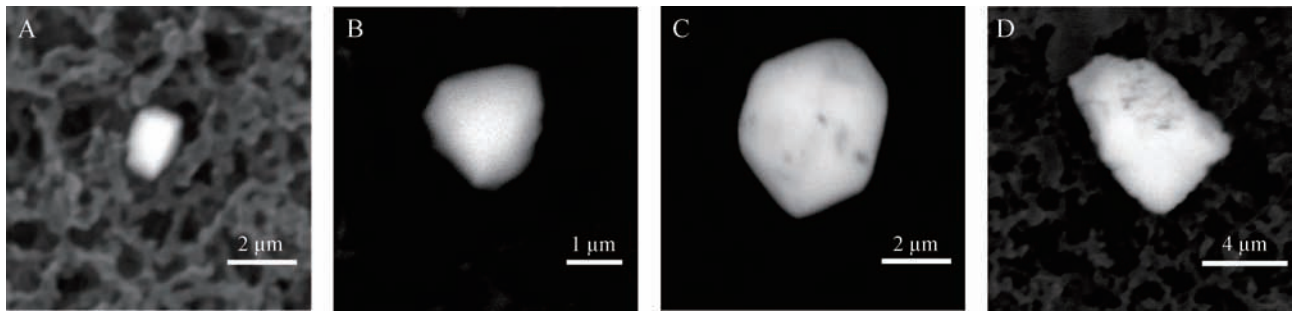


图2 自形—半自形重晶石晶体

A.斜方柱形自形晶体;B.半自形晶体;C.聚形重晶石晶体,晶面出现溶蚀坑;D.斜方柱状半自形晶体,溶蚀坑不规则的分布在晶体表面。

Fig.2 Euhedral-subhedral barite crystals

A. rhombic prism shape euohedral crystal; B. subhedral crystals; C. poly form barite crystal with corrosion pit; D. corrosion pit distributed in the subhedral crystal surface irregularly.

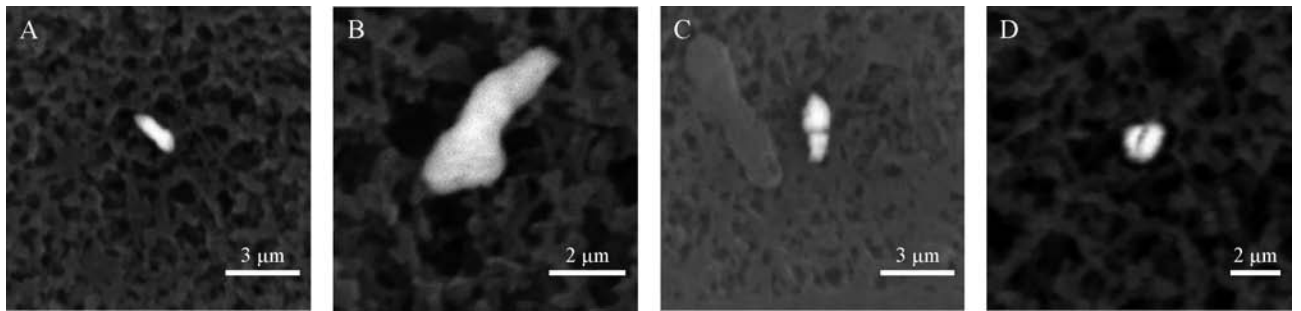


图3 长条形重晶石晶体

A, B.重晶石晶体边缘溶蚀明显;C, D.沿着重晶石晶体中间发育的溶蚀槽或沟

Fig.3 Elongated barite crystals

A, B. elongated crystals with obvious dissolution at the edges; C, D. corrosion groove or ditch developed along the middle of barite crystal

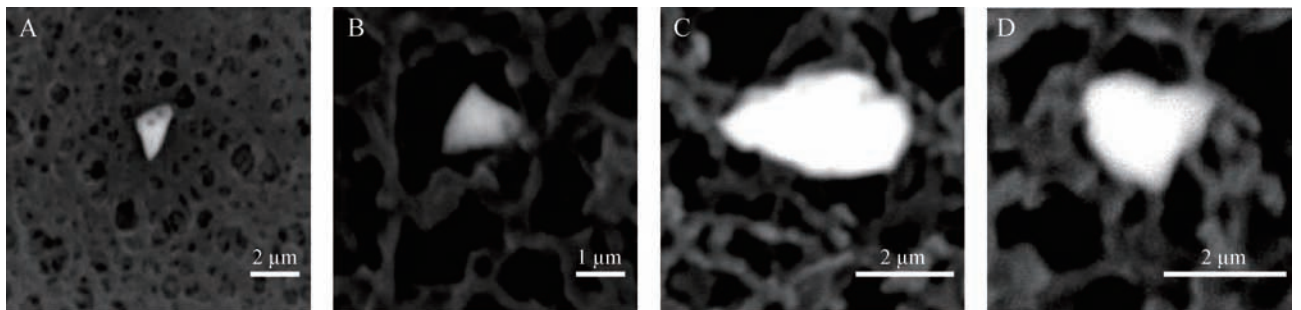


图4 不规则形重晶石晶体

A, B.三角形重晶石;C, D.不规则形晶体

Fig.4 Irregular barite crystals

A, B. Triangle crystals, corrosion appeared at edge; C, D. Irregular crystals

重晶石可能是由于其它类型重晶石发生破碎而成的。

(4) 集体重晶石颗粒

集合体形态呈球状,由众多细小的重晶石晶体和其它物质共同构成。集合体粒径较大,多在 9~10 μm 之间,其中被包裹的重晶石晶体大小多在 1 μm 以下,晶体呈板状或者长条状,个别晶体可达数 μm;除了重晶石之外,能谱指示其成分分别为有机包膜和

黏土物质(图 5A, B)。

研究区中不规则重晶石颗粒含量最多,占 68.2%,长条状重晶石占 18.2%,完全自形重晶石占 9.1%,集合体所占比重最小。

3.2 重晶石颗粒的粒度分布

在长江口及邻近海域 36 个调查站位中共发现 44 颗重晶石颗粒,粒径均在 0.5 μm 以上。重晶石颗

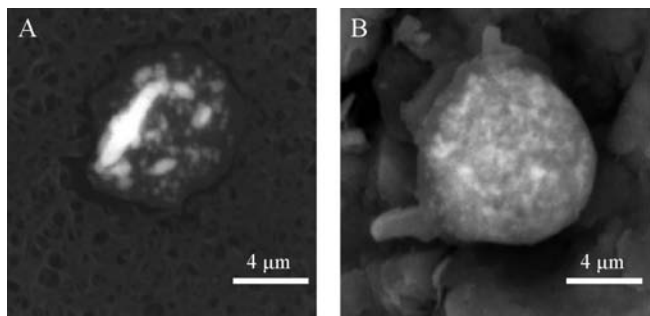


图5 集合体形态重晶石

A. 重晶石和有机质构成的集合体; B. 重晶石和黏土矿物构成的集合体

Fig.5 Aggregates of barites and other matter

A. aggregate of barite and organic matter;

B. aggregate of barite and clay minerals

粒粒径主要分布在 $0.5 \sim 3 \mu\text{m}$ 之间,其中粒径在 $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ (主要是 $1 \sim 2 \mu\text{m}$) 的颗粒占 52.3%,为优势粒级;粒径在 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ 的占 29.5%,为次优势粒级(图 6,9)。此外还发现了两枚重晶石集合体颗粒,粒径分别是 $9.26 \mu\text{m}$ 和 $9.75 \mu\text{m}$ 。

不同的颗粒类型其粒度构成略有差异,不规则重晶石颗粒粒径以 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 为主,长条状重晶石颗粒粒径主要集中在 $1.5 \sim 2 \mu\text{m}$,自形重晶石以 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 大小的颗粒为主。集合体颗粒比较特殊,粒径可达到 $9.7 \mu\text{m}$ 。(图 6)

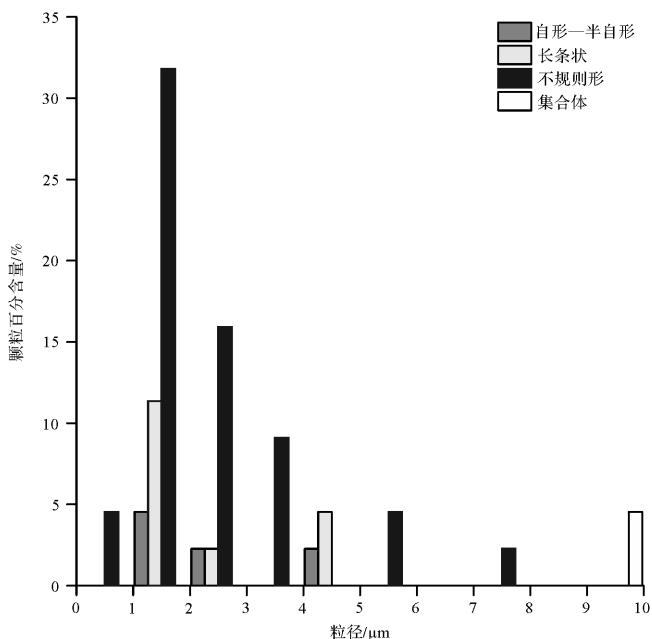


图6 不同类型重晶石颗粒粒径频率分布

Fig.6 The grain size distribution of difference types of the barites

3.3 重晶石颗粒的化学组成

理论上,重晶石(BaSO_4)化学组成为 BaO

65.7%, SO_3 34.3%,成分中有 Sr、Pb 和 Ca 类质同象替代,其中 Sr 可作完全类质同象替代 Ba,形成另一端员成分为天青石(SrSO_4)^[28,31]。

悬浮体中的重晶石成分主要为 Ba、S 和 O,其中, Ba 与 S 比值接近 1:1, O 平均含量在 70% 以上, O 含量偏高与颗粒太小致使电子束打到承载悬浮体的醋酸滤膜上激发其中的 O 有关。Sr 是影响重晶石溶蚀的主要原因^[29-30],在研究区内发现的重晶石颗粒中 90% 含有少量的 Sr,本区中重晶石含 Sr 量低于 1% 的颗粒占 32.6%,1%~2% 占 23.3%,>3% 的颗粒占 2.3%,整体上, Sr 含量偏低,平均质量百分比为 1%。除外,少数颗粒还出现了 Si、Fe、Na、Mg、Al、Ca、Zn、K 等元素,特别是集合体颗粒中这些元素含量更加突出,这些元素应是受到背景或者周边陆源颗粒的影响。

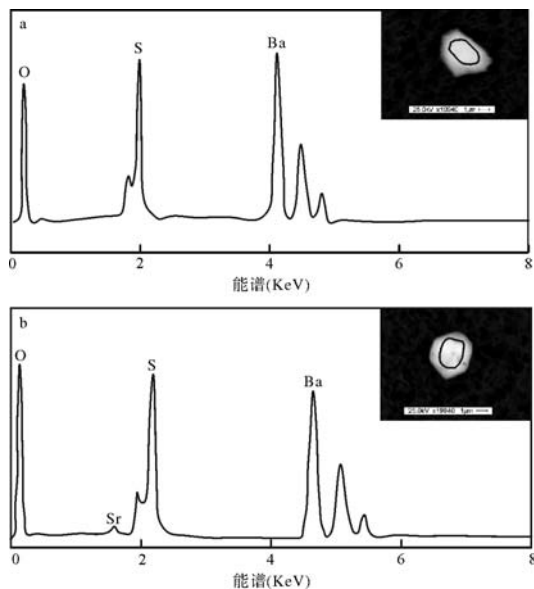


图7 重晶石成分图

a. 纯重晶石; b. 含 Sr 重晶石

Fig.7 The chemical composition of barite

A. Pure barite; B. Barite with minor Sr

3.4 重晶石颗粒的空间分布

(1) 平面分布

重晶石颗粒见于本区不同海域,并且具有近岸较少、向外增加的趋势(图 8)。以 DH4 断面为例,该断面几乎所有站点上都出现重晶石颗粒,重晶石平均含量由岸向海逐渐升高。时值 10 月份,水温呈现出沿岸低、外海高的冬季特征,推测外海区域浮游植物生长量比近岸的高,导致与生物有关的重晶石含量相对升高^[32-33]。

(2) 垂向分布

考察表层(约 0.5 m)、中层(0.6H)、底层(H)不

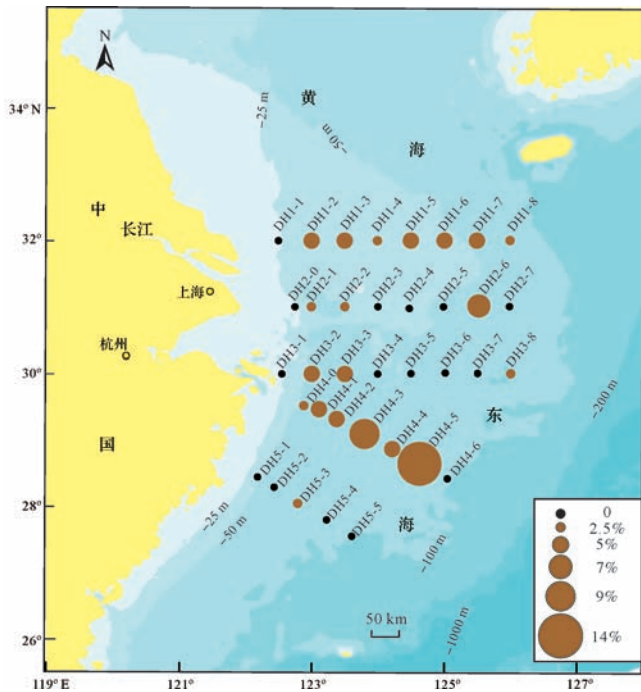


图8 重晶石含量分布图

Fig.8 Spatial distribution of barite

同深度重晶石含量变化情况,各层中皆出现重晶石,但是表层重晶石含量最高,中层、底层含量次之,且两者的含量相当(表1)。

表1 不同深度颗粒重晶石百分含量

Table 1 Content of barite in different depth

深度	表层	中层	底层
重晶石含量/%	43.9	26.83	29.27

重晶石颗粒的粒径也存在垂向上的差异,表中层颗粒重晶石粒径主要分布在0.5~2 μm,底层颗粒重晶石粒径相对较大,见图9。

4 讨论

4.1 研究区内颗粒重晶石空间分布和影响因素探讨

长江口及邻近海域受多种水团的影响,主要有长江冲淡水,台湾暖流,闽浙沿岸流和黄海沿岸流。不同水团其初级生产力亦不同,根据前人研究,在124°E以西的很大范围内表层盐度较低,该处水动力作用强烈,底部沉积物再悬浮使水体浊度升高,水体中浮游植物无法进行正常的光合作用,生长受到限制,浮游植物数量降低^[27,34],导致重晶石含量降低;邵和宾等^[35]撰写的文章(取样时间与本次取样相隔一年,月份相同)中,叶绿素分布特征显示,在123°~124°E之

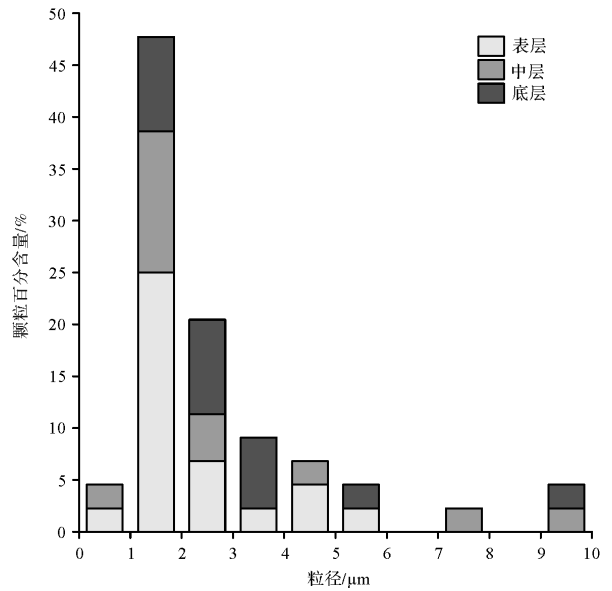


图9 不同深度颗粒重晶石粒径频率分布

Fig.9 The grain size distribution of barites in different depths

间叶绿素含量最高,123°E以东海域含量较高,近岸低,说明浮游植物的量在123°E以东地区相对较高,图8显示,重晶石含量在123°E以东地区含量相对较高,证明浮游植物量会影响重晶石含量,且成正比关系。Sternberg *et al.*^[17]曾在地中海西北部的悬浮体颗粒中发现六边形重晶石晶体,并指出重晶石含量与浮游植物量成正比,与重晶石形成于腐败有机质的微环境的假设相一致。

重晶石形成之后,首先发生重力沉降作用。在不考虑溶蚀和垂向流动的前提下,根据Stokes公式,计算不同粒径大小的颗粒重晶石,在平均深度为55 m的条件下的沉降速率:

$$V = d^2(\rho_s - \rho_f) \frac{g}{18\eta}$$

其中 d 为颗粒直径, ρ_s 为颗粒比重, ρ_f 为海水密度, g 为重力加速度, η 为海水黏度。假设重晶石颗粒为球形,比重设为 4.4 g/cm^3 , g 取 9.81 m/s^2 。结果如下:

该图显示,粒径较大的重晶石仅需要一周的时间就可以沉降到海底,研究区内重晶石粒径范围在 $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 之间,重晶石的沉降过程较长,需要 $100 \sim 400$ 天左右。重晶石较长的水体滞留时间为自身提供了溶蚀的机会。海水总体上为重晶石不饱和状态,重晶石形成后就处于溶蚀状态^[4,36],导致表面出现溶蚀微坑(图2,3,4)。晶体中的溶蚀现象分布不均匀,这与重晶石晶体的选择性溶解有关。与重晶石(BaSO_4)

相比,天青石(SrSO_4)溶解度较低,重晶石晶体在生长形成过程中,Sr会不均匀的参与其中,发生成分分区,富Sr部分首先得以溶解,而Ba含量高的部分得以保存^[29-30]。

由于重晶石晶体可以较长时间地滞留在水体中,它们在近岸流系的携带下可以发生横向搬运,使得它们可以在较广泛的范围内存在。

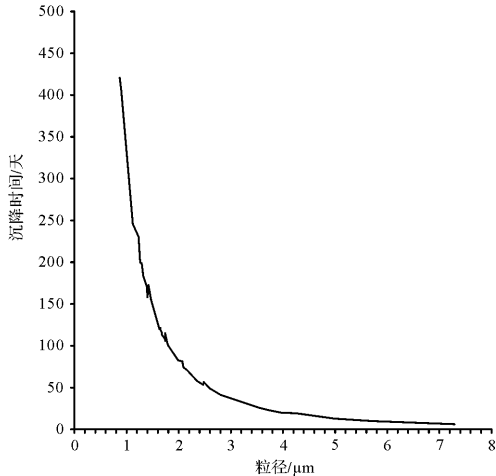


图10 重晶石理论沉降速率与粒径关系

Fig.10 The relationship between the barite particle size and the theoretical settling rate

4.2 研究区内悬浮体颗粒重晶石成因分析

长江口及邻近海域是陆源物质控制下的近海环境,陆源碎屑是该区最重要的沉积物来源。从我们所发现的重晶石颗粒分析,这些颗粒或者晶体形态完好,或者与有机质、黏土共同形成团块,重晶石颗粒虽然有破碎和溶蚀现象,但是未发现搬运过程中的磨蚀现象。分析认为,这些重晶石是自生和生物沉积作用形成的。

长期以来,研究者们对海洋中重晶石的形成机理持有不同意见,主要分为两种观点,一种观点认为重晶石是由于生物成因^[37-38]而聚集,属于生物过程。生物体将Ba富集在它们的骨骼中,伴随着生物体死亡沉降分解^[39]而释放到海水中,在氧化的微环境中发生变化,形成重晶石。如棘骨虫(Acantharians)在重晶石形成过程中起着一定的作用,Bernstein *et al.*^[36]认为棘骨虫的骨骼成分为 SrSO_4 ,含有10%(摩尔百分比)的Ba元素,有机生物体死后,棘骨虫体内的天青石发生溶解,造成了局部Ba离子的富集,导致了海水中含Sr重晶石的形成。另一观点则认为重晶石形成于硫酸钡浓度饱和的微环境中,属于非生物

过程。虽然生物碳酸盐骨骼中Ba的含量较少,但由于生物量巨大,仍可以吸收海水中大部分Ba离子,造成表层海水Ba离子缺失。随着生物体的死亡,碳酸盐骨骼逐渐分解,Ba离子在中层释放到海水中与腐败有机体中的硫酸根结合形成了重晶石^[5-6,9,11]。Bishop^[40]认为重晶石形成于腐败有机质和硅藻的微环境,这样的微环境能提供额外的Ba或硫酸根,在粪粒和海洋雪花里也会出现重晶石颗粒大量聚集的现象。

研究区表层光照充足,氧气含量高,浮游植物生长旺盛,主要为骨条藻、硅藻、角毛藻和拟菱形藻等藻类^[32],在本次电镜观察过程中也发现许多上述藻类植物,浮游植物将Ba富集在它们的骨骼中,伴随生物死亡有机体分解并向下输运,在氧化的微环境中发生变化,形成重晶石。随着水深增加氧含量减少,浮游植物量降低,同时有机生物死亡体分解受到限制,Ba释放量降低,重晶石的含量随之降低。集体颗粒中的重晶石指示了微环境下可以形成重晶石,而其中也出现了长条形重晶石,推测长条状重晶石或三角形重晶石也来源于集体有机包膜溶解之后的颗粒。

5 结论

(1) 长江口及邻近海域悬浮体中的颗粒重晶石其形态大致分为四种类型:自形一半自形晶体,占总量的9.1%;长条状晶体,占总量的18.2%;不规则形态晶体,占总量的68.2%;集体颗粒,占总量的4.5%。该区重晶石经常含少量的Sr,且大部分重晶石颗粒表面出现溶蚀现象。

(2) 重晶石粒径主要分布在0.5~3 μm 。优势粒径在0.5~2 μm 。集体颗粒粒径较大,接近10 μm 。

(3) 该区重晶石成因是在生物作用下的微环境中形成的。该区重晶石颗粒分布范围广,表层含量较多,从岸向外具有增加趋势;空间分布主要受到该区的初级生产力发育状态和重晶石颗粒沉降的影响。

参考文献(References)

- Hoppema M, Dehairs F, Navez J, et al. Distribution of barium in the Weddell Gyre: impact of circulation and biogeochemical processes[J]. *Marine Chemistry*, 2010, 122(1/2/3/4): 118-129.
- Singh S P, Singh S K, Bhushan R. Internal cycling of dissolved barium in water column of the Bay of Bengal[J]. *Marine Chemistry*, 2013, 154: 12-23.
- 陈建芳. 古海洋研究中的地球化学新指标[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(3): 402-410. [Chen Jianfang. New geochemical proxies in

- paleoceanography studies[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(3): 402-410.]
- 4 Paytan A, Griffith E M. Marine barite; recorder of variations in ocean export productivity[J]. *Deep Sea Research Part II*, 2007, 54(5/6/7): 687-705.
- 5 倪建宇,姚旭莹. 古海洋生产力的研究方法[J]. *海洋地质动态*, 2004, 20(3): 30-39. [Ni Jianyu, Yao Xuying. Method to study ancient oceanic productivity[J]. *Marine Geology Letters*, 2004, 20(3): 30-39.]
- 6 田正隆,陈绍勇,龙爱民. 以 Ba 为指标反演海洋古生产力的研究进展[J]. *热带海洋学报*, 2004, 23(3): 78-86. [Tian Zhenglong, Chen Shaoyong, Long Aimin. A review on barium as a geochemical proxy to reconstruct paleoproductivity[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, 23(3): 78-86.]
- 7 陈绍勇,田正隆,龙爱民,等. 南沙群岛海域以钡为指标的古生产力研究[J]. *海洋学报*, 2005, 27(4): 53-58. [Chen Shaoyong, Tian Zhenglong, Long Aimin, et al. Barium as a tracer to study the paleo-productivity variation of Nansha Islands sea area[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(4): 53-58.]
- 8 黄永建,王成善,汪云亮. 古海洋生产力指标研究进展[J]. *地学前缘*, 2005, 12(2): 163-170. [Huang Yongjian, Wang Chengshan, Wang Yunliang. Progress in the study of proxies of paleocean productivity[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 163-170.]
- 9 倪建宇,张美,周怀阳. 赤道东北太平洋沉积物中生物钡的分布特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(2): 49-54. [Ni Jianyu, Zhang Mei, Zhou Huaiyang. Biogenetic barium distribution in Equatorial northeastern Pacific sediments[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(2): 49-54.]
- 10 Klump J, Hebbeln D, Wefer G. The impact of sediment provenance on barium-based productivity estimates[J]. *Marine Geology*, 2000, 169(3/4): 259-271.
- 11 邹亮,韦刚健,李军. 海洋沉积物中生物成因 Ba 的海洋生产力研究[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(2): 307-315. [Zou Liang, Wei Gangjian, Li Jun. Review on ocean productivity by using biogenic Ba in marine sediments[J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(2): 307-315.]
- 12 Griffith E M, Paytan A. Barite in the ocean-occurrence, geochemistry and palaeoceanographic applications[J]. *Sedimentology*, 2012, 59(6): 1817-1835.
- 13 Goldberg E D, Arrhenius G O S. Chemistry of Pacific pelagic sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1958, 13(2/3): 153-212.
- 14 Dehairs F, Chesselet R, Jedwab J. Discrete suspended particles of barite and the barium cycle in the open ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 49(2): 528-550.
- 15 Bertram M A, Cowen J P. Morphological and compositional evidence for biotic precipitation of marine barite[J]. *Journal of Marine Research*, 1997, 55(3): 577-593.
- 16 Robin E, Rabouille C, Martinez G, et al. Direct barite determination using SEM/EDS-ACC system; implication for constraining barium carriers and barite preservation in marine sediments[J]. *Marine Chemistry*, 2003, 82(3/4): 289-306.
- 17 Sternberg E, Jeandel C, Robin E, et al. Seasonal cycle of suspended barite in the Mediterranean sea[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72(16): 4020-4034.
- 18 Guay C K, Falkner K K. A survey of dissolved barium in the estuaries of major Arctic rivers and adjacent seas[J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18(8): 859-882.
- 19 Colbert D, McManus J. Importance of seasonal variability and coastal processes on estuarine manganese and barium cycling in a Pacific Northwest estuary[J]. *Continental Shelf Research*, 2005, 25(11): 1395-1414.
- 20 刘兴泉,尹宝树,侯一筠. 长江口及其邻近海区环流和温、盐结构动力学研究 II. 环流的基本特征[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39(4): 312-320. [Liu Xingquan, Yin Baoshu, Hou Yijun. The dynamic of circulation and temperature-salinity structure in the Changjiang Mouth and its adjacent marine area II. Major characteristics of the circulation[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, 39(4): 312-320.]
- 21 陈彬,范德江,郭志刚,等. 长江口及邻近海域细颗粒沉积物中重金属的空间分布及沉积通量[J]. *海洋学报*, 2014, 36(11): 101-110. [Chen Bin, Fan Dejiang, Guo Zhigang, et al. Heavy metals distribution patterns and sedimentary fluxes in fine-grained sediments in the Changjiang Estuary and its adjacent areas[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(11): 101-110.]
- 22 Li Daoji, Zhang Jing, Huang Daji, et al. Oxygen depletion off the Changjiang (Yangtze River) Estuary[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2002, 45(12): 1137-1146.
- 23 Chen C C, Gong G C, Shiah F K. Hypoxia in the East China Sea: one of the largest coastal low oxygen areas in the world[J]. *Marine Environmental Research*, 2007, 64(4): 399-408.
- 24 Wei Hao, He Yunchang, Li Qingji, et al. Summer hypoxia adjacent to the Changjiang Estuary[J]. *Journal of Marine Systems*, 2006, 67(3/4): 292-303.
- 25 齐红艳,范德江,徐琳,等. 长江口及邻近海域表层沉积物 pH、Eh 分布及制约因素[J]. *沉积学报*, 2008, 26(5): 820-827. [Qi Hongyan, Fan Dejiang, Xu Lin, et al. The states of pH, Eh in surface sediments of the Yangtze River Estuary and its adjacent areas and their controlling factors[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(5): 820-827.]
- 26 范德江,陈彬,王亮,等. 长江口外悬浮颗粒物中自生纤铁矿和胶黄铁矿[J]. *地球科学*, 2014, 39(10): 1364-1370. [Fan Dejiang, Chen Bin, Wang Liang, et al. Authigenic lepidocrocite and greigite particles in aquatic environments off the Yangtze River Estuary[J]. *Earth Science*, 2014, 39(10): 1364-1370.]
- 27 吴玉霖,傅月娜,张永山,等. 长江口海域浮游植物分布及其与径流的关系[J]. *海洋与湖沼*, 2004, 35(3): 246-251. [Wu Yulin, Fu Yuena, Zhang Yongshan, et al. Phytoplankton distribution and its relation to the runoff in the Changjiang (Yangtze) Estuary[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35(3): 246-251.]
- 28 潘兆樵. 结晶学及矿物学[M]. 北京:地质出版社,1993. [Pan Zhaolu. *The Crystallography and Mineralogy*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.]

- 29 孙晓霞. 赤道东太平洋水体及西南印度洋热液活动区水体悬浮颗粒矿物研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2011. [Sun Xiaoxia. Study on the suspended particulate minerals in the water column in the Eastern Equatorial Pacific Ocean and hydrothermal active areas in the Southwest Indian Ocean[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.]
- 30 Sun Xiaoxia, Yang Zuosheng, Fan Dejiang, et al. Crystals of suspended marine barite in the eastern equatorial Pacific: processes of dissolution and effects on crystal morphology[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, 33(1): 194-203.
- 31 秦善,王长秋. 矿物学基础[M]. 北京:北京大学出版社,2006. [Qin Shan, Wang Changqiu. Mineralogy Basis[M]. Beijing: Peking University Press, 2006.]
- 32 刘镇盛. 长江口及其邻近海域浮游动物群落结构和多样性研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2012. [Liu Zhensheng. Community structure and biodiversity of zooplankton in the Changjiang Estuary and its adjacent waters[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.]
- 33 邵和宾. 长江口及其邻近海域秋季悬浮体组成、分布及其影响因素研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2012. [Shao Hebin. Research on composition, distribution and influencing factors of suspended matters in the Yangtze River Estuary in fall[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.]
- 34 邵和宾,范德江,麦晓磊,等. 长江口典型断面悬浮体颗粒类型与粒径构成及其影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质,2013,33(3):47-56. [Shao Hebin, Fan Dejiang, Mai Xiaolei, et al. Types and size of suspended particles in a typical cross section at the Changjiang Estuary and influence factors[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(3): 47-56.]
- 35 邵和宾,范德江,张晶,等. 三峡大坝启用后长江口及邻近海域秋季悬浮体、叶绿素分布特征及影响因素[J]. 中国海洋大学学报,2012,42(5):94-104. [Shao Hebin, Fan Dejiang, Zhang Jing, et al. Distribution and influencing factors of suspended matters and chlorophyll in autumn in Yangtze River Estuary post-Three Gorges dam[J]. Periodical of Ocean University of China, 2012, 42(5): 94-104.]
- 36 Bernstein R E, Byrne R H, Betzer P R, et al. Morphologies and transformations of celestite in seawater: the role of acantharians in strontium and barium geochemistry[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56(8): 3273-3279.
- 37 Stecher H A, Kogut M B. Rapid barium removal in the Delaware estuary[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(7/8): 1003-1012.
- 38 Zwolsman J J G, van Eck G T M. Geochemistry of major elements and trace metals in suspended matter of the Scheldt estuary, southwest Netherlands[J]. Marine Chemistry, 1999, 66(1/2): 91-111.
- 39 Del Giorgio P A, Cole J J, Cimleris A. Respiration rates in bacteria exceed phytoplankton production in unproductive aquatic systems[J]. Nature, 1997, 385(6612): 148-151.
- 40 Bishop J K B. The barite-opal-organic carbon association in oceanic particulate matter[J]. Nature, 1988, 332(6162): 341-343.

Feature and Origin of Suspended Barite in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Areas

PANG Yue FAN DeJiang SUN XiaoXia LIU Ming YANG ZuoSheng

(College of Marine Geosciences, Key Laboratory of Submarine Geosciences and Technology of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract: Formation and preservation of barite are essential to the biogeochemical processes of Ba in marine environment, which have important value in the field of paleoceanography research. However, researches were mainly concentrated on the deep sea and ocean waters for many years and rarely mentioned in estuaries and coastal waters. In this study, suspended mineral barites were observed systematic by scanning electron microscopy and energy dispersive X-ray spectrometry about five sections including 36 stations in the Yangtze River Estuary and its adjacent areas. Barite particle type, spatial distribution and influencing factors were researched. The results indicate that barite particles can be classified into euhedral crystal, elongated crystal, irregular crystal and aggregate, containing a small amount of Sr, occurring erosion phenomena on most of the barite surface. The size of barite particle is mainly in 0.5~3 μm. Barite particle is more in the surface water than the bottom water and is increasing from shore to the open sea, whose formation is related to microenvironment affected by biological processes. The primary productivity and the settling rate of barite particle are two main factors to influencing the barite distribution in that area.

Key words: Yangtze River Estuary; suspension; barite; primary productivity