

doi:10.3799/dqkx.2014.128

长江口外悬浮颗粒物中自生纤铁矿和胶黄铁矿

范德江, 陈彬, 王亮, 孙晓霞, 刘明, 杨作升

中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东青岛 266100

摘要: 以2010年11月“长江口及东海海洋综合考察”的基金委公共航次期间采集的长江口外不同站位的水体悬浮体颗粒为对象, 使用扫描电镜和能谱仪相结合的方法对其进行系统观察和研究, 发现了铁氧化物和铁硫化物两种自生矿物集合体。铁氧化物集合体由纤铁矿微晶构成, 形态不规则; 铁硫化物集合体由大小均一的胶黄铁矿微晶构成, 呈莓球状。纤铁矿的形成与周围水体的物理化学条件相关, 而胶黄铁矿的形成则与有机质包裹的局部微环境有关。水体中所形成的两类自生铁矿物沉降到海底后, 会受到底质物理化学条件的制约。本研究表明陆架泥质沉积体中的一部分莓球状铁硫化物属于水体沉积成因, 当利用沉积物中黄铁矿莓球体进行环境分析时, 需要充分考虑该部分自生铁硫化物的影响。

关键词: 长江口; 悬浮体; 自生矿物; 纤铁矿; 胶黄铁矿; 沉积学; 地球化学。

中图分类号: P73

文章编号: 1000-2383(2014)10-1364-07

收稿日期: 2014-01-19

Authigenic Lepidocrocite and Greigite Particles in Aquatic Environments off the Yangtze River Estuary

Fan Dejiang, Chen Bin, Wang Liang, Sun Xiaoxia, Liu Ming, Yang Zuosheng

Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: A scanning electron micrometer with energy-dispersive X-ray analytical system is used to investigate the suspended particles collected in 2010 in aquatic environments off the Yangtze River estuary in this study. The results show that iron oxide and iron sulfide co-exist in the same environment. Iron oxide is lepidocrocite, which accumulates in porously irregular aggregates. Iron sulfide is greigite and aggregates into organized framboids. The greigite framboids are enclosed by organic films. Lepidocrocite is in agreement with the environmental conditions. Meanwhile, greigite only exists at a local patch covered with organic films. Both lepidocrocite and greigite particles settle down easily, but their preservation depends on the early diagenesis conditions. It is suggested that at least a minor part of the iron sulfide framboids commonly found in the sedimentary sequences perhaps originates from their upward aquatic environment.

Key words: the Yangtze River estuary; suspended particle matter; authigenic mineral; lepidocrocite; greigite; sedimentology; geochemistry.

0 引言

铁是典型的变价元素, 其价态与所处的氧化还原环境密切相关。在氧化环境下其以 Fe^{3+} 形式存在, 其典型矿物是铁氧化物和氢氧化物, 包括赤铁矿、针铁矿、水针铁矿、纤铁矿、水铁矿等; 而在还原环境下则以 Fe^{2+} 形式存在, 其典型矿物为铁硫化物, 如黄铁矿、白铁矿、磁黄铁矿、马基诺矿、四方硫铁矿、胶黄铁矿等。铁氧化物或者铁硫化物经常出现在古代沉积岩

以及现代松散沉积物中, 并且成为判断沉积、成岩环境氧化或还原状态的标志(初凤友等, 1994; Wilkin et al., 1996; Leng and Yang, 2003)。

现代海洋沉积物中自生铁矿物普遍存在, 其中的铁硫化物广泛发育于陆架细颗粒沉积体中, 并且多以各种形式的莓球状集合体出现, 这种铁硫化物被认为是在成岩过程中形成的, 可作为判断早期成岩环境氧化——还原状态的标型矿物(初凤友等, 1994, 1995)。但是其形成机理尚未达成共识, 存在生

物成因和无机成因的争论(Wilkin and Barnes, 1997; Ohfuji and Richard, 2005; Pósfai and Dunin-Borkowski, 2006).自生铁氧化物主要以结核状、结壳状集合体出现,常见于陆架以及大洋盆地等海域,其成因被认为主要是同生期或成岩期化学和生物成矿作用的结果(Halbach, 1986; Jung and Lee, 1999).最近的研究表明铁矿物还与特殊的地质作用相联系,比如,在海底热液活动区,出现了包括铁硫化物在内的大量的金属硫化物(叶俊等,2011);在海底天然气水合物活动区,出现了与 CH₄ 泄漏相联系的管状黄铁矿集合体(陆红峰等,2007).特别需要提及的是,霉球状黄铁矿广泛发育于现代沉积物、古代沉积岩之中,前人对它的成因进行了大量研究,认为是在还原状态下形成的(王琦和杨作升,1981;初风友等,1994; Wilkin and Arthur, 1997; Leng and Yang, 2003; Ohfuji and Richard, 2005).迄今为止,关于表生环境中铁矿物的研究主要集中在沉积岩和沉积物中的铁矿物,而对水体颗粒态的自生铁矿物的研究很少.前人对河流入海处河水沉积地球化学的研究揭示了铁元素具有从水体到沉积物的转移趋势,并证实了在该过程中形成了自生铁氧化物(Ouddane *et al.*, 1999; Fan *et al.*, 2008);对典型还原性环境水体的调查揭示了水体具有明显的氧化—还原分带性,在还原性水体中可以形成铁硫化物,但是还没有关于铁硫化物形成于氧化环境水体中的报道.沉积环境水体中自生铁矿物的研究,不仅对判断水体物理化学条件具有重要的价值,而且对了解陆架铁元素生物地球化学过程、深入认识沉积体中的自生铁矿物的成因等也具有重要的意义.

长江口外海洋环境复杂,发育有长江冲淡水、浙闽沿岸流、黄海沿岸流和台湾暖流等水团(Su, 1998);该海域水体深度较浅,水体交换良好,总体上处于氧化状态,初级生产力较高.但是在夏季会出现大面积分布的低氧区(Li *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2007; Wei *et al.*, 2007).该海域底质沉积物有粉砂质黏土、粉砂、砂等类型,矿物组合复杂(李广雪等,2005).开展该区水体悬浮体自生矿物研究,对深入认识该区的水体物理化学条件、底质沉积物中的自生矿物都具有较好的参考意义.为此,本研究以长江口外为典型观察断面,设置了6个观察站位,分层采集水体样品,对各层自生铁矿物进行了系统的观察,并试图阐明水体中自生铁矿物的类型、特征和形成机制.

1 研究区和采样站位

2010年11月“科学三号”执行国家基金委组织的“长江口及东海海洋综合考察”公共航次期间,对该区的多个断面共25个站位进行了调查(图1),其中DH3断面从长江口开始,跨越了长江河口、台湾暖流以及陆架水团等多个水团,是本次研究的典型断面.调查期间研究人员利用CTD进行了水体的温度、盐度、浊度以及叶绿素的现场测量(邵和宾等,2012);利用ROSETTE采水器分别采集了表层、中层、底层的水体样品,并通过负压抽滤法获得悬浮体颗粒样品.悬浮体颗粒样品室温风干,低温保存,待用.

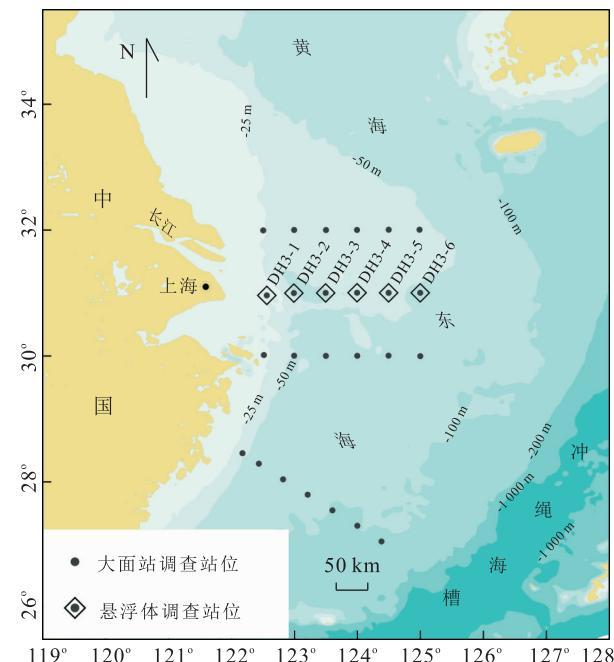


图1 研究区和调查站位

Fig.1 Locality map showing the sampling sites

2 研究方法

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3×3 mm²的小片,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)对铁颗粒进行观察,采用能谱仪以点、面相结合的方式进行颗粒物成分的分析.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。

3 结果和讨论

研究区悬浮体组分类型多样,主要颗粒类型有碎屑矿物、生物碎屑、絮团颗粒。碎屑颗粒主要是石英、长石、云母以及黏土矿物,它们构成了本区悬浮体颗粒的主体部分;生物碎屑主要是硅藻碎屑,包含海链藻、骨条藻、角毛藻、圆筛藻、布纹藻、星杆藻等不同类型硅藻,而其中的海链藻、骨条藻为最常见种类;絮团颗粒由黏土矿物和有机质聚集而成,以颗粒粗大为特色。除这些常见的颗粒外,本区最具有特色的是出现了少量的铁自生矿物,既有氧化态的铁氧化物,又有还原态的铁硫化物。

3.1 铁氧化物

悬浮体中的铁氧化物呈不规则集合体状,集合体大小在 $20 \mu\text{m}$ 左右,疏松多孔,边缘弯曲呈港湾状。集合体内部不均一,由许多呈管状、粒状的次级集合体构成。在集合体以及次级集合体的边缘可见呈针状、板状的微小晶体,其大小不足 $1 \mu\text{m}$ 。铁氧化物集合体为单独出现,其表面洁净,未见有机质附着物,与其他颗粒无直接接触(图 2a)。

能谱测定该铁氧化物集合体成分为 Fe 和 O(图 2b),该集合体形态、微小晶体的晶形、元素组成与通过长江水和东海水混合实验所形成的新生矿物相纤铁矿集合体一致(Fan *et al.*, 2008),推测该铁氧化物属于纤铁矿,其分子式为: $\gamma\text{-FeOOH}$ 。

铁氧化物集合体出现在 DH3-2、DH3-3 和 DH3-6 等站位,出现水层涵盖了表层、中层、底层等不同层位。

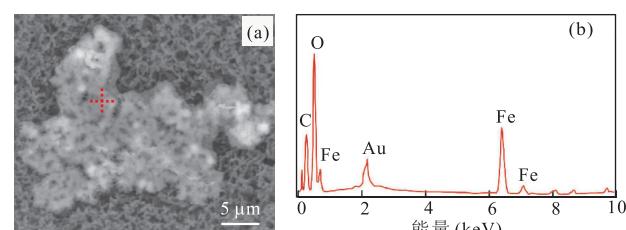


图 2 悬浮颗粒中的铁氧化物集合体 SEM 图像和能谱图

Fig.2 SEM image of oxide aggregation and its EDX pattern
a. 铁氧化物集合体 SEM 图像。集合体形态不规则、结合松散、微晶可以辨认。十字符号为能谱分析位置,下同;b. 铁氧化物能谱图。构成元素为 Fe 和 O,图中的 Au 为镀金产生的,C 为滤膜产生的

3.2 铁硫化物

该区悬浮体中的铁硫化物以莓球状集合体形式出现。莓球状大小为 $5\sim10 \mu\text{m}$,差别明显;集合体内由数个至数十个微晶组成,微晶形态规则,为球状体,大小为 $0.5\sim1.0 \mu\text{m}$,同一个莓球体内微晶大小基本一致,并呈无序一半有序方式排列,微晶之间尚留有可见的孔隙(图 3)。与铁氧化物单独存在不同,悬浮体中的莓球体表面都被一层有机质覆盖,且都与絮团共生。与莓球体共生的絮团大小为数十微米,组分复杂,主要由粘土矿物、碎屑矿物和生物碎屑构成,且该类絮团有机质含量高,有机质或直接覆盖絮团,或呈不规则团块状分布于絮团之中。莓球体与絮团的关系多样,它既可以发育在絮团的边缘,也可以发育在絮团的中心位置(图 3)。

能谱分析表明莓球状集合体主要化学组成为 Fe、S,以及少量的 Si、Al、O(图 3)。能谱图中出现的 Si、Al、O 等元素应为絮团中的硅酸盐矿物产生的干扰元素。莓球体主要元素 S/Fe 原子数比值约为 1.38,分子比值接近 Fe_3S_4 ;微晶硫化物呈现粒状或者球状,说明其所属的对称型高,但是在莓球状黄铁矿中常见的八面体等晶形并没有出现(Wilkin and Barnes, 1997; Ohfuji and Richard, 2005),笔者推断该微晶属于胶黄铁矿,其分子式为 Fe_3S_4 ,属于等轴晶系。胶黄铁矿集合体出现于调查区的 DH3-3、DH3-4、DH3-5、DH3-6 等站位,分布在底层、中层以及表层等水体层位。显示该矿物在本调查海域具有较为广泛分布。

3.3 两类自生铁矿物形成机理探讨

铁的来源是形成自生铁矿物的基础。海洋中溶解态铁含量通常很低,平均只有 $2.9\times10^{-9}\sim5.2\times10^{-9} \text{ mol/L}$,河水中的溶解铁则是海洋的一百倍以上,达 $300\times10^{-9}\sim400\times10^{-9} \text{ mol/L}$ (Dai and Martin, 1995)。长江口外海域接受源源不断来自长江以及其他小型河流的补给,铁元素供给丰沛。这是该区自生铁形成的基本前提。

在开展调查的 11 月份期间,该区海洋环境进入了冬季状态,在强劲的东亚冬季风作用之下,陆架环流得到强化,台湾暖流向北流动,浙闽沿岸流向南流动;冬季风浪强,使得该处水体垂向混合强烈(邵和宾等,2012)。在这种环境下,该处水体总体上含氧丰富,处于氧化环境,水体的 pH 值为弱碱性。

3.3.1 铁氧化物的形成 铁氧化物见于 DH3-2 站(底层)、DH3-3 站(中层)和 DH3-6 站(表层),它们位于台湾暖流、黄海沿岸流影响区。在氧化和弱碱性

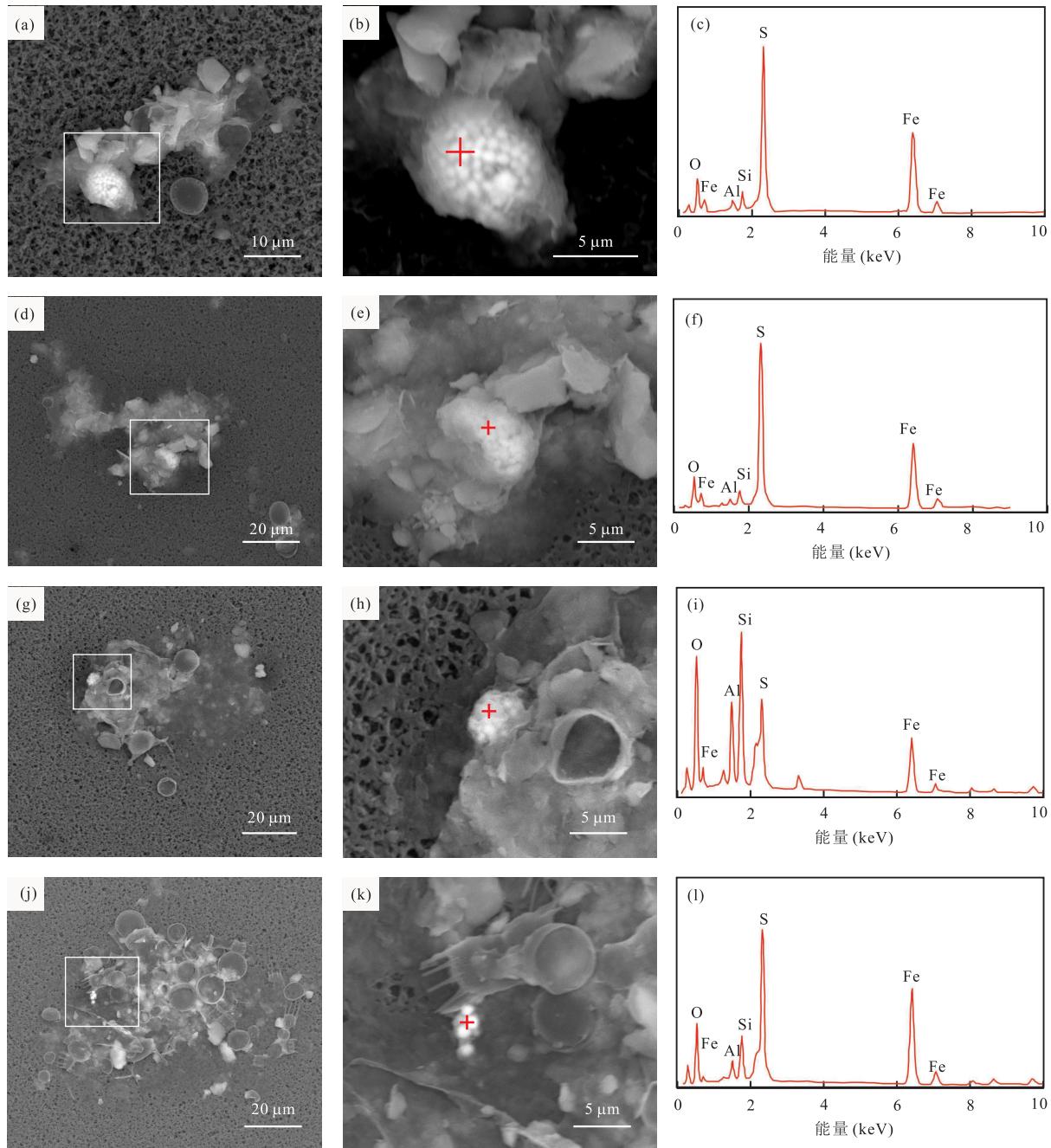
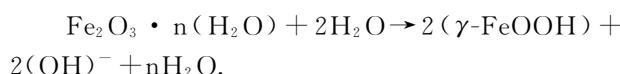
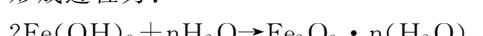


图 3 悬浮颗粒中的铁硫化物莓球状集合体及其能谱图

Fig.3 SEM images of the iron sulfide framboids ang their energy dispersive X-ray patterns

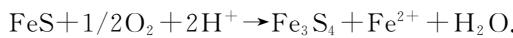
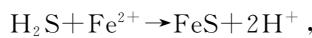
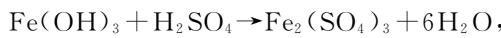
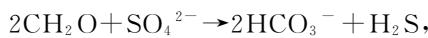
a,b,c. 发育良好的莓球状集合体及其能谱图, 硫化物微晶清晰、数量多、呈半有序排列, 能谱图中元素组成以 Fe、S 为主, 见于 DH3-4 站底层; d,e,f. 莓球状集合体及其能谱图, 硫化物微晶较多、呈无序排列, 能谱图中元素组成以 Fe、S 为主, 见于 DH3-6 站中层; g,h,i. 莓球状集合体及其能谱图, 硫化物微晶数量较多、呈无序排列, 能谱图出现了 Fe、S 等元素, 见于 DH3-5 站表层; j,k,l. 莓球状集合体及其能谱图, 硫化物微晶数量少、形态清晰、呈无序排列, 能谱图出现了 Fe、S 等元素, 见于 DH3-3 站表层

环境下, 水体中的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 絮凝沉淀, 形成水铁矿, 并结晶形成纤铁矿集合体(Lee *et al.*, 2003)。纤铁矿集合体直接裸露在水体之中, 并且存在于不同水层之中, 这与该海域水体的物理化学条件一致。纤铁矿形成过程为:



3.3.2 胶黄铁矿的形成 胶黄铁矿的形成比较复杂, 它形成于还原和酸性环境(Morse and Wang, 1997), 并且可能与生物作用密切相关(Pósfai and Dunin-Borkowski, 2006)。从表面上看, 长江口外海

域属于氧化环境,这与胶黄铁矿形成所需的物理化学环境相左.但是,本区所有的胶黄铁矿集合体表面都覆盖了一层有机质,正是该有机质的存在,才形成了适合胶黄铁矿形成的微环境,这与化石内形成的局部还原微环境的“化石封套”机理相似(Leng and Yang, 2003).由于有机质的覆盖,与水体中的氧气交换受限,加上有机质的降解,导致该微环境成为局部还原环境,并且为酸性条件,铁元素被还原成 Fe^{2+} ,或者铁硫酸盐; Fe^{2+} 与 H_2S 结合,生成亚稳定的单硫化物;随后,单硫化物被氧化,最终形成胶黄铁矿.其过程可以概括为(Wilkin and Barnes, 1997; Pósfai and Dunin-Borkowski, 2006):



形成胶黄铁矿需要有充足的铁供给,被有机质包裹的空间内铁元素一方面来自水体中溶解的铁,另一方面来自其周围絮团内硅酸盐矿物还原而释放的铁.胶黄铁矿集合体均与更大的含大量硅酸盐矿物的絮团相伴生,有利于铁元素的补充.此外,胶黄铁矿的形成还要少量 O_2 的参与,因为被有机质包裹的微环境之外即是含氧的氧化环境,虽然微环境与其外的大环境氧气交换受限,但并不隔绝与外界的气体交换,可能还会有少量的氧气进入该微环境,这种环境正好有利于胶黄铁矿的形成.Pósfai and Dunin-Borkowski(2006)研究认为微生物参与了胶黄铁矿的形成,但是长江口外胶黄铁矿集合体未发现明显的微生物成矿标志.

3.4 悬浮颗粒自生铁矿物的沉积和保存

悬浮颗粒中的自生铁氧化物与周围的水体物理化学条件相适应,它可以在水体中稳定存在;铁硫化物仅存在于具有有机质覆盖的絮团之中,与微环境中的物理化学条件相适应.它们的沉积受控于该海域的沉积动力环境,而一旦沉积,其保存则受到成岩环境的制约.

研究区水体中铁氧化物集合体大小在 $25\text{ }\mu\text{m}$ 左右,矿物组成单调,几乎全部为纤铁矿,但是集合体内部孔隙发育.根据絮团大小和密度的经验关系(Eisma, 1993),估算该集合体的密度为 1.080 g/cm^3 左右.进而可以根据 Stokes 沉降公式得到该颗粒在 20°C 的海水中的沉降速度为 0.0027 cm/s .研

究区水深多在 $20\sim50\text{ m}$ 之间,这意味着铁氧化物颗粒可以在水体驻留 $8\sim21\text{ d}$,这段时间内其可以随着水体一起运动,并沉积在动力条件弱的环境,如内陆架泥质沉积区.一旦铁氧化物沉降至海底,那么它会直接暴露在周围环境之中.由于铁氧化物只能在氧化和偏碱性的环境下才能稳定存在(Lee *et al.*, 2003),而长江口外海底多为还原和弱酸性环境(齐红艳等, 2008),因而其不利于铁氧化物的保存.

研究区水体中胶黄铁矿集合体未见单独存在,而是与陆源碎屑、有机质共同构成较大的絮团.絮团大小多在 $50\text{ }\mu\text{m}$ 左右,内部较致密.根据絮团大小和密度的经验关系估算该集合体的密度为 1.050 g/cm^3 左右,沉降速度为 0.0068 cm/s ,在水柱中的驻留时间 $3\sim8\text{ d}$.这期间内,胶黄铁矿集合体也随着水团被搬运,并且趋向沉积在水体动力条件弱的环境,如陆架泥质沉积区.因为胶黄铁矿只能在还原、酸性的环境下存在(Morse and Wang, 1997),如果海底为氧化和碱性环境,这类颗粒会变得不稳定,容易被氧化、消失;如果海底为还原和酸性环境,这类颗粒则可以稳定存在,在成岩进程中可能进一步转变成黄铁矿.中国陆架上斑块状发育的泥质沉积区属于还原和近中性物理化学环境(齐红艳等, 2008),且沉积速率较大,它们是这类莓球状集合体有利的保存区域,这与前人调查得到的中国东部陆架泥质沉积区具有较高自生黄铁矿的结果相吻合.这也表明,陆架泥质沉积区中常见的黄铁矿莓球体并非都由早期成岩过程形成的,至少有一部分继承自水体中形成的自生铁硫化物.当利用黄铁矿莓球体进行环境分析时,需要充分考虑该部分自生铁硫化物的影响.

4 结论

(1) 长江口外海域水体颗粒物中同时出现了铁氧化物和铁硫化物两类自生矿物的集合体.铁氧化物集合体由纤铁矿构成,单独出现;铁硫化物集合体呈莓球状,由大小均一的胶黄铁矿微晶构成,它被有机质覆盖,并与碎屑矿物、生物碎屑、有机质共同构成了较大的絮团.

(2) 铁氧化物形成与周围水体的物理化学条件相关,铁硫化物形成则与有机质覆盖下的局部微环境有关.

(3) 水体中形成的自生铁矿物的沉积和保存受到底质物理化学条件制约,陆架砂质沉积物有利于铁氧化物的保存,而泥质沉积物有利于铁硫化物的保存.

References

- Chen, C. C., Gong, G. C., Shiah, F. K., 2007. Hypoxia in the East China Sea: One of the Largest Coastal Low-Oxygen Areas in the World. *Marine Environmental Research*, 64(4):399—408.doi:10.1016/j.marenvres.2007.01007
- Chu, F. Y., Chen, L. R., Shen, S. X., et al., 1994. Morphological Features of Authigenic Pyrite from South Yellow Sea Sediments. *Oceanologia et Limnologica Sinica*, 25(5):461—467 (in Chinese with English abstract).
- Chu, F. Y., Chen, L. R., Shen, S. X., et al., 1995. Origin and Environmental Significance of Authigenic Pyrite from the South Yellow (Huanghe) Sea Sediments. *Oceanologia et Limnologica Sinica*, 26(3):227—233 (in Chinese with English abstract).
- Dai, M. H., Martin, J. M., 1995. First Data on Trace Metal Level and Behavior in Two Major Arctic River Estuarine Systems(Ob and Yenisey) and in the Adjacent Kara Sea, Russia. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 131(3—4):127—141.doi:10.1016/S0012-821X(95)00021-6
- Eisma, D., 1993. Suspended Matter in the Aquatic Environment. Springer-Verlag, Berlin, 131—163.
- Fan, D. J., Neuser, R. D., Sun, X. G., et al., 2008. Authigenic Iron Oxide Formation in the Estuarine Mixing Zone of the Yangtze River. *Geo-Mar. Lett.*, 28(1):7—14.doi:10.1007/s00367-007-0084-0
- Halbach, P., 1986. Process Controlling the Heavy Metal Distribution in Pacific Ferromanganese Nodules and Crusts. *Geol. Rundsch.*, 75(1):235—247.doi:10.1007/BF01770191
- Jung, H. S., Lee, C. B., 1999. Growth of Diagenetic Ferromanganese Nodules in an Oxic Deep-Sea Sedimentary Environment, Northeast Equatorial Pacific. *Marine Geology*, 157(3—4):127—144.doi:org/10.1016/s0025-3227(98)00154-6
- Lee, S. H., Lee, I., Roh, Y., 2003. Biomineralization of a Poorly Crystalline Fe(III) Oxide, Akaganeite, by an Anaerobic Fe(III)-Reducing Bacterium (Shewanella Alga) Isolated from Marine Environment. *Geosciences Journal*, 7(3):217—226.doi:10.1007/BF02910288
- Leng, Q., Yang, H., 2003. Pyrite Framboids Associated with the Mesozoic Jehol Biota in Northeastern China; Implications for Microenvironment during Early Fossilization. *Progress in Natural Science*, 13(3):206—212.doi:10.1080/1002007031233134 3410
- Li, D. J., Zhang, J., Huang, D. J., et al., 2002. Oxygen Depletion off the Changjiang (Yangtze River) Estuary. *Science in China (Series D)*, 45(12):1137—1146.doi:10.1360/02yd9110
- Li, G. X., Yang, Z. G., Liu, Y., 2005. Study on the Origins of Sediment Environments in the East China Seas. Science Press, Beijing, 1—76 (in Chinese).
- Lu, H. F., Chen, F., Liao, Z. L., et al., 2007. Authigenic Pyrite Rods from the Core HD196A in the Northeastern China Sea. *Acta Geologica Sinica*, 81(4):519—525 (in Chinese with English abstract).
- Morse, J. W., Wang, Q. W., 1997. Pyrite Formation under Conditions Approximating Those in Anoxic Sediments: II. Influence of Precursor Iron Minerals and Organic. *Marine Chemistry*, 57(3—4):187—193.doi:10.1016/S0304-4203(97)00050-9
- Ohfuji, H., Richard, D., 2005. Experimental Syntheses of Framboids—A Review. *Earth-Science Reviews*, 71(3—4):147—170.doi:10.1016/j.earscirev.2005.02.001
- Ouddane, B., Skiker, M., Fischer, J. C., et al., 1999. Distribution of Iron and Manganese in the Seine River Estuary: Approach with Experimental Laboratory Mixing. *J. Environ. Monit.*, 1(5):489—496.doi:10.1039/A903721G
- Pósfai, M., Dunin-Borkowski, R. E., 2006. Sulfides in Biosystems. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 61(1):679—714.doi:10.2138/rmg.2006.61.13
- Qi, H. Y., Fan, D. J., Xu, L., et al., 2008. The States of pH, Eh in Surface Sediments of the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Areas and Their Controlling Factors. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(5):820—827 (in Chinese with English abstract).
- Shao, H. B., Fan, D. J., Zhang, J., et al., 2012. Distribution and Influencing Factors of Suspended Matters and Chlorophyll in Autumn in Yangtze River Estuary Post-Three Gorges Dam. *Periodical of Ocean University of China*, 42(5):94—104 (in Chinese with English abstract).
- Su, J. L., 1998. Circulation Dynamics of the China Seas North of 18N Coastal Segment. In: Robinson, A. R., Brink, K. H., eds., *The Sea*, Volume 11, Chapter 16. John Wiley & Sons Inc., New York, 483—505.
- Wang, Q., Yang, Z. S., 1981. Authigenic Pyrite in the Surface Sediments of the Southern Huanghe Sea. *Oceanologia et Limnologica Sinica*, 12(1):25—32 (in Chinese with English abstract).
- Wei, H., He, Y. C., Li, Q. J., et al., 2007. Summer Hypoxia Adjacent to the Changjiang Estuary. *Journal of Marine Systems*, 67(3—4):292—303.doi:10.1016/j.jmarsys.2006.04.014
- Wilkin, R. T., Arthur, M. A., Dean, W. E., 1997. History of Water-Column Anoxia in the Black Sea Indicated by Pyrite Framboid Size Distributions. *Earth and Planetary*

- Science Letters*, 148(3—4): 517—525. doi: 10.1016/S0012-821X(97)00053-8
- Wilkin, R.T., Barnes, H.L., 1997. Formation Processes of Framboidal Pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(2): 323—339. doi: 10.1016/S0016-7037(96)00320-1
- Wilkin, R.T., Barnes, H.L., Brantley, S.L., 1996. The Size Distribution of Framboidal Pyrite in Modern Sediments: An Indicator of Redox Conditions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(20): 3897—3912. doi: 10.1016/0016-7037(96)00209-8
- Ye, J., Shi, X.F., Yang, Y.M., et al., 2011. Mineralogy of Sulfides from Ultraslow Spreading Southwest Indian Ridge 49.6°E Hydrothermal Field and Its Metallogenetic Significance. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(1): 17—29 (in Chinese with English abstract).
- 矿的形态标型研究.海洋与湖沼,25(5):461—467.
- 初凤友,陈丽蓉,申顺喜,等,1995.南黄海自生黄铁矿成因及其环境指示意义.海洋与湖沼,26(3):227—233.
- 李广雪,杨子庚,刘勇,2005.中国东部海域海底沉积环境成因研究.北京:科学出版社,1—76.
- 陆红锋,陈芳,廖志良,等,2007.南海东北部 HD196A 岩心的自生条带状黄铁矿.地质学报,81(4):519—525.
- 齐红艳,范德江,徐琳,等,2008.长江口及邻近海域表层沉积物 pH、Eh 分布及制约因素.沉积学报,26(5):820—827.
- 邵和宾,范德江,张晶,等,2012.三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.中国海洋大学学报,42(5):94—104.
- 王琦,杨作升,1981.黄海南部表层沉积物中的自生黄铁矿.海洋与湖沼,12(1):25—32.
- 叶俊,石学法,杨耀民,等,2011.西南印度洋超慢速扩张脊 49.6°E 热液区硫化物矿物学特征及其意义.矿物学报,31(1):17—29.

附中文参考文献

初凤友,陈丽蓉,申顺喜,等,1994.南黄海沉积物中自生黄铁

《地球科学——中国地质大学学报》

2014年11月 第39卷 第11期 要目预告

- 基于二维经验模态分解的地磁基准图制备边界补偿方法 赵玉新等
 低渗卤水盆地提高 CO₂ 注入性的技术方法:以江汉盆地为例 房琦等
 嘉陵江曲流型叠置河谷成因对区域地质环境的响应 江华军等
 基于嫦娥二号卫星微波辐射计亮温数据反演月壤介电常数 连懿等
 江西乐平沿沟二叠纪末有孔虫的演变及对鲕状灰岩的古环境指示意义 田力等
 黄河三角洲地下水动态变化及其与地面沉降的关系 刘勇等
 吉林南部通化地区集安群年代学研究 秦亚等
 中国大型水库蓄水对近海相对海平面空间变化的影响 王林松等