

文章编号: 1000-0550(2003)03-0495-05

长江口潮滩植物对沉积物铁的地球化学循环及磁性特征的影响^①

韩晓非¹ 张卫国² 陈满荣³ 俞立中²

1(华东师范大学地理系 上海 200062)

2(华东师范大学河口海岸国家重点实验室 上海 200062) 3(扬州大学地理系 江苏扬州 225009)

摘要 通过长江河口高潮滩芦苇带沉积物柱状样 CYLWA-1 活性铁、有机质、粒度分析及磁性测量, 探讨潮滩植物对沉积物铁的地球化学循环及磁性特征变化的影响。结果显示, 沉积物柱状样总体上以 Fe^{2+} 占优势, 且含量随深度逐渐增加。但在亚表层(10~20 cm), 由于根系的释氧作用, 存在着以 Fe^{3+} 占优势的氧化层。在 10~20 cm 这一氧化层, 指示细颗粒磁性矿物的参数(χ_{fd} , χ_{ARM})明显减小, 而反映磁性矿物类型的参数(B_{CR} , $SIRM/\chi$)显著增大, 指示了亚铁磁性矿物颗粒变粗, 不完整反铁磁性矿物明显富集, 这一现象反映了氧化层不完整反铁磁性矿物的相对富集。

关键词 铁的地球化学循环 磁性特征 潮滩 长江口

第一作者简介 韩晓非 女 1973 年出生 博士研究生 地球化学和环境磁学

中图分类号 P736.4 **文献标识码** A

铁是沉积物中普遍存在的元素, 也是氧化还原敏感性元素, 铁的还原与有机质氧化降解的耦合作用, 是沉积物早期成岩过程中最为重要的生物地球化学反应之一^[1]。不仅如此, 由于铁的氧化物和硫化物构成了沉积物中最为主要的磁性矿物, 铁的地球化学循环直接影响到磁性矿物的生成和转化, 进而影响环境磁学参数的解释。因此, 近年来, 环境磁学领域对铁的早期成岩作用也予以了足够的重视^[2], 大量研究报道了海洋和湖泊沉积物中磁性矿物的还原溶解^[3~7]、次生铁硫化物形成^[8~10]以及磁性矿物的细菌合成^[11]等现象, 及其在沉积物磁性特征上的表征。

位于海陆界面处的河口潮滩是周期性为海水浸淹的湿地生态系统, 其生物地球化学过程的研究近年来受到了广泛的重视, 其中一个重要的方面是植物对沉积物元素循环的影响^[12~16]。已有研究表明, 由于潮滩植物具有的向根系输氧特性, 在根系周围的沉积物中形成相对氧化的环境, 可以改变铁的地球化学形态, 并进而影响重金属和营养元素的地球化学循环^[12~14]。但迄今为止, 长江口潮滩植物对沉积物铁的地球化学循环影响的研究较少涉及。

本文以长江河口潮滩为研究对象, 通过理化分析和磁性测定, 试图揭示本区具有代表性的植物—芦苇(*Phragmites australis*)对沉积物铁的地球化学循环及磁性转变的影响。这项研究不仅可以加深对长江河口

湿地植物与元素地球化学行为二者之间关系的认识, 还可以深入理解环境中磁性矿物的转化机制。

1 样品和方法

1.1 研究样品

在长江河口, 潮滩植被主要由芦苇、藨草和海三棱藨草构成, 呈平行岸线的条带状分布。沉积物柱样 CYLWA-1 于 2000 年 9 月采自长江河口南岸朝阳农场高潮滩芦苇带, 地理坐标为东经 $121^{\circ}51'$, 北纬 $31^{\circ}06'$ 。柱样长 50 cm, 沉积物取出后立即进行密封处理, 带回实验室冷冻保存, 直至分析。柱样分割时发现, 整个柱样质地较为均一, 以粘土质粉砂为主, 层理发育不明显。表层 0~14 cm 沉积物呈灰黑色, 多为直径 2 cm 的粗根茎及植物碎屑; 14~20 cm 深度, 土层呈棕黄色, 多粗根茎和根系, 根系周围沉积物呈铁锈红色; 20~34 cm, 红色减少, 灰黑色物质增多, 多须根; 34~50 cm, 沉积物呈灰黑色, 多腐烂根系。

1.2 分析方法

按 2 cm 间距分样, 分别进行活性铁、有机质、粒度及磁性测定。活性铁(Reactive iron)系指能被 1M HCl 提取的铁, 包括 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} ^[17, 18]。取新鲜湿样 2~3 g, 用 50 ml 1M HCl 室温下提取 24 h, 以比色法测定 Fe^{2+} 和总铁, Fe^{3+} 的含量由两者的差值得到, 分析样品的精度在 5% 以内。其余样品按四分法, 均分

① 国家自然科学基金项目(批准号: 40131020, 40001020, 49871068), 教育部博士点基金项目(98026915), 上海市重点学科建设项目, 上海市科委青年科技启明星项目(01QC14016)资助

收稿日期: 2002-01-04 收修改稿日期: 2002-03-06

成两部分,分别予以风干和烘干($< 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)处理。风干样过60目筛后进行有机质测定,采用硫酸-重铬酸钾外加热法^[19],绝对误差不超过0.05。烘干样一部分用美国Coulter公司生产的LS 100Q激光粒度仪进行粒度分析,一部分样品压碎后用于磁性分析。

磁性测量遵循常规环境磁学方法。称取10 g左右样品,置于10 ml聚乙烯样品盒中,压实、固定后进行磁性测量。测量步骤如下:低频(0.47 kHz)和高频(4.7 kHz)磁化率(χ_{lf} , χ_{hf});非滞剩磁(ARM);样品经强度为300 mT磁场磁化后所带的剩磁(IRM);饱和等温剩磁(SIRM, 磁场强度为1 T);获SIRM的样品经强度为-20 mT、-40 mT、-100 mT反向磁场退磁后的剩磁。磁化率测量选用英国Bartington MS2磁化率仪;剩磁测量选用英国Molspin公司生产的交变退磁仪、脉冲磁化仪和旋转磁力仪。根据测量结果,计算单位质量磁化率(χ)、饱和等温剩磁(SIRM)、 χ_{ARM} (ARM的磁化率表达形式, $ARM/0.318\ 4, 0.318\ 4$ 为生成ARM的直流磁场数值)及各种比值参数,如磁化率频率系数 $\chi_{fd\%}$ 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 、 $SIRM/\chi$ 、剩磁矫顽力 B_{CR} 、 F_{300mT} ($IRM_{300mT}/SIRM \times 100$)等。具体计算方法、单位及矿物学涵义可参阅文献^[20, 21]。

2 实验结果

2.1 沉积物理化性质

沉积物粒度组成和有机质含量如图1(a)、1(b)所示。沉积物以粉砂(4~63 μm)占绝对优势,一般 $> 60\%$;其次为粘土,含量 $> 20\%$;砂($> 63\ \mu\text{m}$)的含量极少,不足3%,且垂向变化不大,表明沉积物属粘土

质粉砂。柱样0~10 cm深度,粘土含量先升后降;10~18 cm区间,粘土含量变化不大,18~24 cm区间,粘土含量较上层有所增加,自26 cm向下,粘土含量随深度呈递增趋势。粉砂含量的垂直变化表现出与粘土含量相反的趋势。有机质含量介于1%~2%之间,除34~50 cm层位有机质含量较高且垂向变化比较一致外,其余层位与粘土含量有很好的-一致性,显示了有机质在粘土中富集的特性。

2.2 沉积物活性铁的地球化学特征及其与理化性质关系

柱状样CYLWA-1活性铁的垂向分布特征和 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 相对组成见图1(c)、1(d)。活性铁的总量在7 187~13 633 $\mu\text{g/g}$ 之间,其中 Fe^{2+} 的含量在2 949~12 406 $\mu\text{g/g}$ 之间,占活性铁含量的34%~93%, Fe^{3+} 的含量在1 028~6 146 $\mu\text{g/g}$ 之间,占活性铁含量的7%~66%。随深度增加,活性铁总量及 Fe^{2+} 总体上呈递增的趋势, Fe^{3+} 则总体上呈下降趋势。根据活性铁垂向分布特征,结合沉积物的理化性质,自上而下可将柱样CYLWA-1分为三个层段:A层(0~10 cm), Fe^{2+} 略占优势,达50%以上;B层(10~20 cm), Fe^{3+} 含量较高,其中14~20 cm氧化环境最强, Fe^{3+} 含量可达60%以上;C层(20~50 cm),以 Fe^{2+} 为优势,且随深度增加而递增,最高可达90%以上。

活性铁总量与粘土和有机质的含量具有相似的变化趋势(图1),相关分析表明,活性铁总量和粘土含量、有机质含量呈显著正相关,相关系数分别为0.823、0.787,表明活性铁在细颗粒沉积物和有机质中富集。同时, Fe^{2+} 含量和粘土含量也有较好的正相关,相关

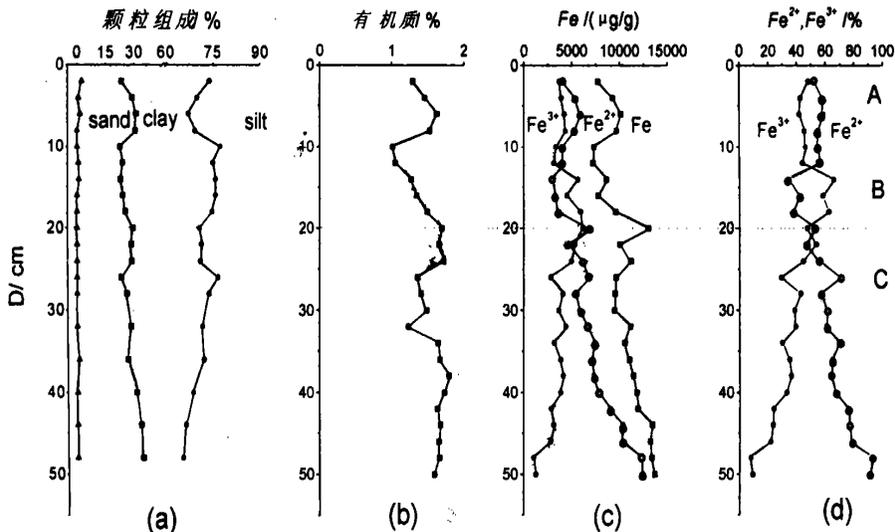


图1 沉积物CYLWA-1理化性质和铁的地球化学特征的垂向分布

Fig. 1 Vertical distribution of physical & chemical properties and iron geochemical character for Core CYLWA-1

系数为0.788, 但 Fe^{3+} 与各粒级含量的相关性均较差。

2.3 沉积物磁性参数的垂向分布特征

χ 、SIRM 一般反映了样品中亚铁磁性矿物(如磁铁矿 Fe_3O_4 、磁赤铁矿 $\gamma-Fe_2O_3$ 等)含量, 但也受到矿物组成和晶粒大小的影响。由图2可见, χ 、SIRM 具有相似的变化形式, 并存在明显的垂向波动。 χ 在 $75 \times 10^{-8} \sim 101 \times 10^{-8} m^3 kg^{-1}$ 之间变动, SIRM 在 $11880 \times 10^{-6} \sim 16698 \times 10^{-6} Am^2 kg^{-1}$ 之间变化。表层至10 cm 深度, χ 、SIRM 含量较低, 且变化幅度不大; 10~20 cm 深度, χ 、SIRM 随深度增加而增大, 并在14~20 cm 之间形成峰值; 20~32 cm 深度, χ 、SIRM 向下递减, 在32 cm 深度形成一低谷后, 在34 cm 处显著增大, 随后向下又呈递减趋势。

F_{300mT} 可反映磁性矿物类型, 沉积物样品 F_{300mT} 大都介于92%~95%以上, 显示了亚铁磁性矿物主导了样品的磁性特征。

χ_{fd} 、 χ_{ARM} 是反映细颗粒亚铁磁性矿物的参数。其中, χ_{fd} 是对超顺磁晶粒(SP)敏感的参数, 沉积物 χ_{fd} 含量在3.2%~5.2%之间, 显示了一定量的超顺磁晶粒的存在。 χ_{fd} 的峰值区与 χ 并不吻合, 说明 χ 高值区受SP晶粒的影响较小。 χ_{ARM} 对稳定单畴晶粒最为敏感^[22], 它与 χ 、SIRM 的垂向变化也存在较大差异, 但与 χ_{fd} 变化趋势较为一致。 $\chi_{ARM}/SIRM$ 是反映亚铁磁性矿物颗粒大小的参数, 随颗粒由单畴向多畴过渡而下降^[21]。样品中 $\chi_{ARM}/SIRM$ 低于 $60 \times 10^{-5} mA^{-1}$, 表明样品中亚铁磁性矿物以较粗的假单畴/多畴(PSD/MD)晶粒为主^[21]。由10 cm 向下至底部, χ_{fd} 、 χ_{ARM} 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 总体呈现上升趋势, 显示细晶粒亚铁矿物含量的增加及亚铁磁性矿物颗粒的变细, 并与活性铁、粘土及有机质的含量变化趋势较为一致。

B_{CR} 、SIRM/ χ 既反映磁性矿物的类型, 也可以反映亚铁磁性矿物晶粒的大小。不完整反铁磁性矿物相

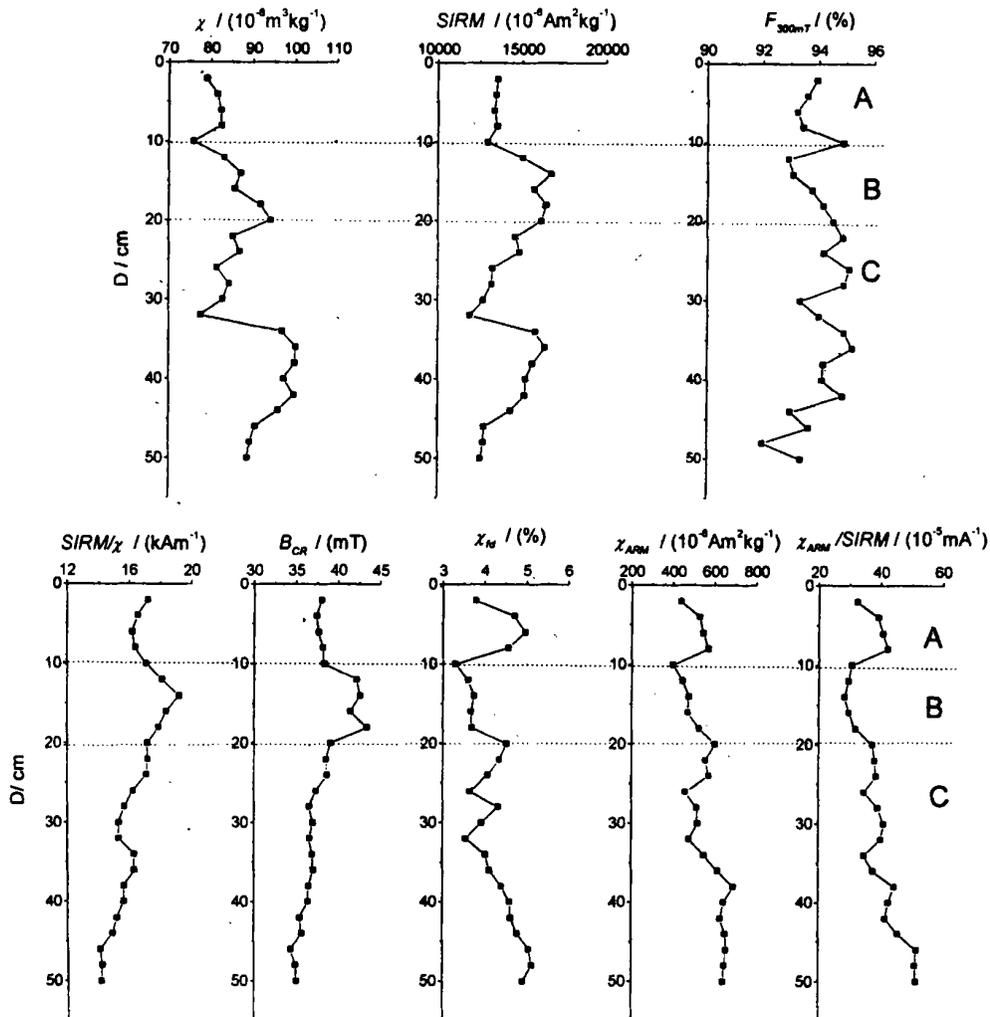


图2 柱样CYLWA-1磁性特征的垂向变化

Fig. 2 Vertical variation of magnetic properties for Core CYL WA-1

对亚铁磁性矿物、细颗粒磁铁矿相对粗颗粒磁铁矿,这两个参数具有较高的值。0~10 cm 区间, B_{CR} 、 $SIRM/\chi$ 总体变化不大。在 10~20 cm 这一相对氧化层位, B_{CR} 、 $SIRM/\chi$ 显著增大, 由于细颗粒磁性矿物的参数 (χ_{fd} 、 χ_{ARM}) 在该层明显减小, 因此它们的变化反映了不完整反铁磁性矿物相对含量的上升。20~50 cm 区间, B_{CR} 、 $SIRM/\chi$ 随深度增加呈下降趋势, 同时 $\chi_{ARM}/SIRM$ 等参数也显示了细颗粒磁铁矿含量随深度的增加, 因此这两个参数的变化也是由不完整反铁磁性矿物含量的相对下降所致。

3 讨论

3.1 潮滩芦苇分布带沉积物活性铁的地球化学循环

潮滩沉积物活性 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 的相对组成在一定程度上指示了沉积物氧化还原状况。由于潮滩是周期性的滞水环境, 沉积物通气性随着深度增加而减弱, 由上而下, 环境的还原性趋强。从图 1(d) 可见, 沉积物柱样总体以 Fe^{2+} 的含量占优势, 且随着深度的增加, Fe^{2+} 的相对含量上升, Fe^{3+} 的相对含量下降, 与潮滩沉积物环境的特征是相吻合的。值得注意的是, 表层 0~14 cm, Fe^{2+} 的含量虽然明显低于 20 cm 以下的层位, 但并非是氧化性最强的层次, 而是 14~20 cm 的亚表层 Fe^{3+} 百分含量最高。样品分析时, 即观察到 0~14 cm 这一层位呈灰黑色, 并间杂有很多散落的植物碎屑, 因此, 在这一层位通气状况优于下层的情况下, Fe^{2+} 仍占优势显然是由于微生物分解植物碎屑消耗氧气和利用 Fe^{3+} 作为电子受体的缘故。而在柱样 14~20 cm 深度, 土层呈棕黄色, 植物根茎粗壮且数量多, 从根系的颜色判断, 根系呈白色, 与其他层位的灰黑色根系不同, 显示为进行呼吸作用的活根系。在根系周围数毫米至 1 厘米范围内, 沉积物与周围颜色有明显差异, 呈铁锈红色, 指示了三价铁氧化物沉淀的存在。芦苇属禾本科植物, 其管状根茎具有从地上植物组织中传输氧到根系的功能, 这种释氧作用, 可导致根系周围沉积物处于相对氧化的环境, 并能使 Fe^{2+} 向 Fe^{3+} 转变^[15, 16]。因此该层沉积物中 Fe^{3+} 相对含量的上升与活的根系呼吸作用密切相关。在 20~50 cm 整个深度范围内, 均发现有根系或植物散落物存在, 但多呈灰黑色, 沉积物也呈青灰色, 显示了厌氧状况的存在。可见, 潮滩植物根系的分布对铁的赋存状态具有显著的影响, 在活的根系分布密集层位形成了相对其上下沉积物的氧化层。

3.2 铁循环对沉积物磁性特征的影响

上述 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 相对含量的变化反映了沉积物中铁矿物组成的变化。因此铁的价态变化有可能对沉积

物的磁性特征产生影响。潮滩沉积物中, 含 Fe^{3+} 的活性铁包括无定形氧化铁、赤铁矿、针铁矿等, 含 Fe^{2+} 的活性铁主要为菱铁矿、蓝铁矿、单硫化铁等, 磁铁矿则同时含有 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 。这些不同的矿物其磁性特征存在显著差异。对海洋及富营养化湖泊沉积物的研究发现, 随着沉积物还原程度的加深, 可以导致亚铁磁性矿物大量溶解, 其中细颗粒矿物优先溶解, 使得沉积物磁性明显的减弱, 表现为 χ 和 $SIRM$ 值的下降和亚铁磁性矿物颗粒粗化^[3-4, 6-7]。但在还原程度最强的 C 层, 自 40 cm 深度向下, 虽然 χ 、 $SIRM$ 值有一明显下降, 但指示细颗粒磁性矿物的参数 χ_{fd} 、 χ_{ARM} 并未下降, 反而保持高值, $\chi_{ARM}/SIRM$ 也并未反映出颗粒的粗化。同样 20~32 cm 及 0~10 cm 区间, χ 、 $SIRM$ 的下降也没有伴随磁性颗粒的粗化现象。事实上, 沉积物中普遍存在的无定形氧化铁的磁性远远低于磁铁矿, 在还原环境下, 要优先于磁铁矿充当电子受体^[23]。因此, 即使其发生大量的还原溶解, 也不会造成 χ 、 $SIRM$ 的明显下降。 χ 、 $SIRM$ 的波动更可能是来源变化的结果。但在沉积物最氧化的 14~20 cm 层位, χ_{fd} 、 χ_{ARM} 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 都具有较低的值, 显示了磁性矿物颗粒变粗, 同时, $SIRM/\chi$ 、 B_{CR} 等参数明显上升, 显示了不完整反铁磁性矿物相对含量的增加。在氧化环境中, 不完整反铁磁性氧化铁(主要为赤铁矿、针铁矿)为稳定矿物, 而其它磁性矿物经历低温氧化, 向不完整反铁磁性矿物转化, 并导致其相对趋于富集。该孔自 20 cm 至底部, Fe^{3+} 相对含量呈下降趋势, 与 B_{CR} 和 $SIRM/\chi$ 揭示的不完整反铁磁性矿物相对含量下降趋势也很吻合。因此, 在本文研究的沉积物中, 随还原程度的加深, 不完整反铁磁性矿物相对含量下降, 在氧化环境中则存在不完整反铁磁性矿物的相对富集。

4 结论

本项研究显示, 在长江河口芦苇生长的潮滩中, 随着深度增加, 沉积物的还原性总体上趋强, 在磁性特征上则表现为不完整反铁磁性矿物相对含量的下降。由于植物的生理活动, 导致在亚表层形成以 Fe^{3+} 占主导的相对氧化层。在该氧化层中, 显示了不完整反铁磁性矿物的相对富集, 反映在磁性参数上, χ_{fd} 、 χ_{ARM} 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 具有较低的值, 而 $SIRM/\chi$ 、 B_{CR} 等参数则明显增大。

致谢 国家自然科学基金和教育部博士点基金为本文的研究提供了基金资助。审稿人的修改意见使本文得以进一步完善。

参考文献(References)

- 1 Lovely D R. Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) reduction[J]. Microbi-

- ol Rev, 1991, 55: 259~287
- 2 Oldfield F. Environmental magnetism—a personal perspective [J]. *Quat Sci Rev*, 1991, 10: 73~85
 - 3 Karlin R, Levi S. Diagenesis of magnetic minerals in recent hemipelagic sediments [J]. *Nature*, 1983, 303: 327~330
 - 4 Karlin R, Lyle M, Heath G R. Authigenic magnetite formation in suboxic marine sediments [J]. *Nature*, 1987, 326: 490~493
 - 5 Kostka J E, Nealon K H. Dissolution and reduction of magnetite by bacteria [J]. *Environ Sci Technol*, 1995, 29: 2 535~2 540
 - 6 Haese R R, Petermann H, Dittert L, *et al.* The early diagenesis of iron in pelagic sediments: a multidisciplinary approach [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1998, 157: 233~248
 - 7 Robinson S G, John T. Rock-magnetic characterization of early, redoxomorphic diagenesis in turbiditic sediments from the Madeira Abyssal Plain [J]. *Sedimentology*, 2000, 47: 367~394
 - 8 Canfield D E, Bemmerl R A. Dissolution and pyritization of magnetite in anoxic marine sediments [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1987, 51: 645~659
 - 9 Mann S, Sparks N H, Frankel R B, *et al.* Biomineralization of ferri-magnetic greigite (Fe_3S_4) and iron pyrite (FeS_2) in a magnetotactic bacterium [J]. *Nature*, 1990, 343: 258~261
 - 10 Snowball I F, Thompson R. The occurrence of greigite in freshwater sediments from Lake Lomand [J]. *J Quat Sci*, 1988, 3: 121~125
 - 11 Snowball I F. Bacterial magnetite and the magnetic properties of sediments in a Swedish lake [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 126: 129~142
 - 12 Smock L A, Kuezler E J. Seasonal changes in the forms and species of iron and manganese in a seasonally-inundated floodplain swamp [J]. *Water Res*, 1983, 17(10): 1 287~1 294
 - 13 Carador I, Vale C, Catarino F. Accumulation of Zn, Pb, Cu, Cr and Ni in sediments between roots of the Tagus estuary salt marshes, Portugal [J]. *Estuar, Coast and Shelf Sci*, 1996, 42: 393~403
 - 14 Otte N L, Kearns C C, Doyle M O. Accumulation of arsenic and zinc in the rhizosphere of wetland plants [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1995, 55: 154~161
 - 15 Wang T G, Peverly J H. Oxidation states and fractionation of plaque iron on roots of common reed [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1996, 60: 323~329
 - 16 Wang T G, Peverly J H. Iron oxidation states on root surfaces of a wetland plant (*Phragmites australis*) [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1999, 63: 247~252
 - 17 Wallmann K, Hennies K, König I. A new procedure for determining reactive Fe (III) and Fe (II) minerals in sediments [J]. *Limnol Oceanogr*, 1993, 38(8): 1 803~1 812
 - 18 Haese R R, Wallmann K, Dahmke A, *et al.* Iron species determination to investigate early diagenetic reactivity in marine sediments [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61(1): 63~72
 - 19 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980. 132~136 [Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences ed. *Soil physical and chemical analysis* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Press, 1980. 132~136]
 - 20 Oldfield F, Yu L. The influence of particle size variations on the magnetic properties of sediments from the north-eastern Irish Sea [J]. *Sedimentology*, 1994, 41: 1 093~1 108
 - 21 Oldfield F. Toward the discrimination of fine-grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments [J]. *J Geophys Res*, 1994, 99: 9 045~9 050
 - 22 Maher B A. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites [J]. *Geophys J Royal Astron Soc*, 1988, 94: 83~96
 - 23 Brennan E W, Lindsay W L. The role of pyrite in controlling metal ion activities in highly reduced soils [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 3 609~3 618
 - 24 Xu W, Voo A D, Peacor D R, *et al.* Alteration and dissolution of fine-magnetite and its effects on magnetization of the ocean floor [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 151: 279~288
 - 25 Brown D A, Sherriff B L, Sawicki J A. Microbial transformation of magnetite to hematite [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1997, 61(16): 3 341~3 348

Influence of Plant on Geochemical Cycling of Iron and the Magnetic Properties of Intertidal Sediments in the Yangtze Estuary

HAN Xiao-fei¹ ZHANG Wei-guo² CHEN Man-rong³ YU Li-zhong²

¹ (Department of Geography, East China Normal University, Shanghai 200062)

² (State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062)

³ (Department of Geography, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu 225009)

Abstract One core (CYLWA-1) from *Phragmites australis* vegetated tidal flat, the Yangtze Estuary, is selected to investigate the effect of plant on geochemical cycling of iron and the magnetic properties of the sediments. The results show that Fe^{2+} dominates in most layers of the sediments and increases with depth, except at a depth of 14~20 cm, where Fe^{3+} dominates due to the abundant distribution of live roots. In the oxidized layer of 14~20 cm, χ_{fd} , χ_{ARM} and χ_{ARM}/SIRM decline, suggesting coarsening of ferrimagnetic minerals. On the contrary, the obvious increase in B_{CR} and SIRM/χ indicates relative increase of imperfect anti-ferromagnetic minerals. It is suggested that ferrimagnetic minerals be transformed into imperfect anti-ferromagnetic iron oxides under oxidizing environment.

Key words geochemical cycling of iron, magnetic properties, tidal flat, Yangtze Estuary