

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2013.03001

南海湖泊沉积物中的陆源粉尘记录

刘毅¹, 孙立广¹, 罗宇涵¹, 孙松², 王玉宏²

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院极地环境研究室, 合肥 230026;
 2. 中国科学院海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室, 青岛 266071)

摘要: 对采集于南海西沙东岛“牛塘”的湖泊沉积柱(DY6)进行元素、粒度、显微成像、扫描电镜及场发射能谱分析。元素分析结果表明, Ti、Al 元素在沉积柱中的含量远高于 3 个主要沉积端元(珊瑚砂、鸟粪和植物), 具有外源的特征, 在 Ti 和 Al 的高值层位中存在较多不溶于酸的粉尘颗粒, 与春季合肥地区收集到的北方风尘颗粒形貌特征相近, 粒径相对较小, 也与季风携带沉降于朝鲜半岛和南海北部海域的风尘形貌相似; X 射线能谱分析结果显示, 这些粉尘颗粒物成分以硅酸盐岩和石英为主, 很可能是东亚冬季风携带下源自亚洲大陆的沉积; 沉积物中 Ti 和 Al 的含量变化可以用于指示历史时期南海中北部海域陆源粉尘颗粒的沉降通量。

关键词: 湖泊沉积物; 陆源粉尘; 东亚冬季风; 南海

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

文章编号: 0256-1492(2013)03-0001-08

粉尘循环是全球物质循环系统的重要组成部分, 每年大约有 2 000 Mt 的粉尘进入大气层, 其中约 75% 重新沉降在陆地上, 25% 则被强劲的地表风场带入海洋^[1]。粉尘从产生并进入大气圈开始就参与了地球系统的物理、化学和生物循环过程, 在很大程度上影响着地球的水、碳和能量循环过程^[2]。

中新世黄土作为粉尘堆积产物广泛分布于亚欧大陆、非洲和北美洲^[3], 在远离大陆的深海沉积物中, 特别是在北太平洋(30°N 以北)、非洲撒哈拉以西海岸和澳大利亚东部等海域也发现有明显的风成石英颗粒^[4-5]。对黄土-古土壤序列, 特别是对中国黄土的粒度和磁化率的大量研究结果表明, 沉积物的粒度和粉尘通量在很大程度上反映了古冬季风的演化过程^[6-8], 它们与深海沉积物有孔虫中 $\delta^{18}\text{O}$ 之间较好的相关特征, 也显示了季风气候旋回对地球轨道要素变化周期的响应。粉尘堆积物中还蕴含了北半球高纬度地区冰盖冰量的信息, 东亚冬季风携带的粉尘沉降的南界自 25 MaBP 以来不断南移, 这不仅受两极冰盖发育演变的控制, 同时还受到青藏高原隆升过程的影响^[9-11]。

中国历史文献记录的剧烈降尘活动(“雨土”和“黄雾”等)的统计结果显示, 东亚地区粉尘沉降的南

界在广西桂林和湖南南部一线^[12], 然而, 经由南海进入东南亚地区的较微弱的粉尘沉降过程和其环境气候意义较少为人所重视。海南湖光岩玛珥湖沉积物中曾报道存在冬季风携带的陆源粉尘痕迹^[13], 但考虑到东亚粉尘沉积通量的区域分布特征、冬夏季风的相位关系以及降雨量对热带湖泊沉积物的物源输入等影响因素^[14-15], 其可靠性受到质疑。在不同地区寻找和甄别合适的陆源粉尘记录, 有助于全面地研究历史时期远源粉尘沉降机理, 提取可靠的古气候信息。

1 样品与方法

1.1 采样环境

西沙群岛位于南海北部陆坡的西沙台地(图 1a, 1b), 由一系列热带灰沙岛礁组成, 主要由浅水石珊瑚、贝类、钙质藻和有孔虫的残体等组成的砂砾堆积而成^[16]。

东岛(16°39'~16°41'N, 112°43'~112°45'E)位于西沙群岛东部, 面积约 1.55 km², 高程 3~6 m, 它发育于独立的礁盘上, 随着全新世晚期相对海平面下降抬升形成。东岛的东部、南部和西部海滨均被沙堤包围, 沙堤内为平坦的碟形盆地。随着岛内植物繁茂, 大量红脚鲣鸟得以栖息岛内, 大量的鸟粪与珊瑚砂混合形成富磷的鸟粪珊瑚砂土。东岛年平均气温为 26~27 °C, 年平均降水量约 1 500 mm, 干湿季节分明, 每年 6—11 月为雨季, 气候温暖潮湿; 12 月至次年 5 月为旱季, 降水稀少, 蒸发强烈^[17]。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB428902, 2009CB42160x)

作者简介: 刘毅(1980—), 男, 博士生, 主要从事海洋环境与古气候变化研究, E-mail: liuyi@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 孙立广, E-mail: slg@ustc.edu.cn

收稿日期: 2012-03-02; 改回日期: 2012-08-20。 张光威编辑

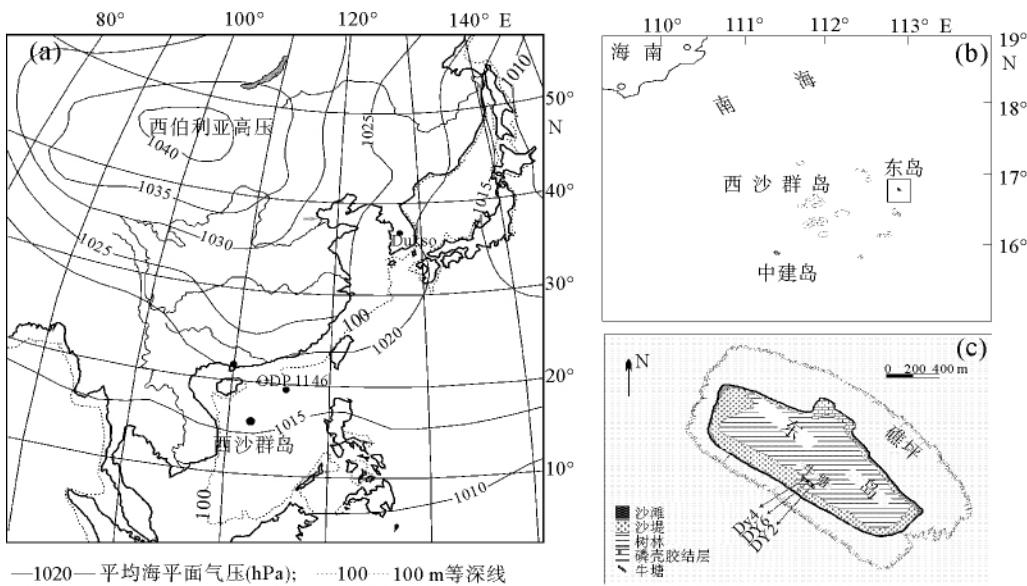


图 1 东亚地表压强分布与研究区地理和取样位置

a. 东亚 1 月地表压强分布示意; b. 西沙群岛的地理位置; c. 东岛地形以及沉积柱 DY2, DY4 和 DY6 在牛塘的位置

Fig. 1 Sea surface pressure of East Asian and the sampling sites of sediment cores

a. January Sea Surface Pressure of East Asian; b. Geographical location of Xisha islands;

c. The topographic feature of Dongdao Island and the location of sediment cores DY2, DY4 and DY6

“牛塘”是东岛也是西沙群岛目前所知惟一的天然淡水湖泊,位于岛东南部高约 6 m 的沙堤内侧低洼处(图 1c)。“牛塘”长约 100 m,最宽处约 20 m,呈新月形,其水位随干湿季节变化而上下波动,但即使在旱季也很少有干涸的情况发生。湖泊周围密集生长着海马齿苋(*Sesuvium portulacastrum*)和雀稗尾稃草(*Urochloa paspaloides*),稍远处生长有银茂柴(*Messerschmidia argentia*)、白璧霜花(*Pisonia grandis*)和抗风桐(*Scaevola sericca*)等木本植物。雨季时,周边的珊瑚砂、鸟粪土和植物碎屑是湖底沉积物的主要来源,台风过境时也可能将距湖泊较远的珊瑚砂粒带入水体。

1.2 样品及分析

沉积柱 DY6 于 2008 年 3 月西沙考察期间,采自“牛塘”湖底最深处(图 1c),沉积柱 DY6 全长 158 cm,40 cm 以下有清晰水平纹理。根据沉积物的岩性特征,将沉积剖面自上而下分为 4 个部分(图 2)。0~40 cm 以淡黄色为主,从表层而下逐渐变浅,层理不明显,沉积物中含珊瑚砂较多,间杂细小的植物种子和少量植物碎屑;40~113 cm 以棕红色为主,有较好的层理,层间颜色变化明显,沉积物为掺杂鸟粪土的珊瑚砂沉积,并有大量雀稗尾稃草颖果广泛分布;113~115 cm 在岩性上与上下层位的沉积物有明显区别,主要为磨圆和分选均较好的纯珊瑚砂

层,未见明显植物残体存在;115~158 cm 为深褐色沉积,其间夹杂较大的植物残体,颖果数量明显减少,其中 155 cm 以下开始出现较大粒径(直径 2~3 cm)珊瑚碎屑。根据野外观察,沉积柱 158 cm 以下均为大块珊瑚,表明“牛塘”是由半开放的海湾潟湖发育而来^[18](图 2)。

沉积柱带回实验室后,按 0.5 cm 间隔分样,由上至下依次编号为 DY6-1 至 DY6-316。沉积柱岩性分析显示(图 2),DY6 与 2003 年采集于同一湖泊的平行柱 DY2 和 DY4 在岩性和层序上基本一致^[18],沉积序列完整。同时,收集了“牛塘”周围生长的银毛柴、白璧霜花、抗风桐、海马齿苋、雀稗尾稃草等几种植物及新鲜鸟粪颗粒,所有样品运回实验室后冷冻保存于冰柜(−10 °C),直至分析测试。

1.3 实验方法

沉积物和植物样品采用混酸湿法消解,后进行无机元素的测定。称取约 0.25 g 样品于聚四氟乙烯烧杯中,加入混酸(HCl : HNO₃ : HClO₄ : HF = 2 : 6 : 1 : 2)11 mL 加热消解至溶液清亮,继续加热去除剩余酸液,用 4% HCl 定容于 25 mL 容量瓶中。利用等离子发射光谱仪(Optima 2100DV, PE)测定样品中的 Na、K、Ca、Mg、Mn、Fe、Ti、Al、Zn、Pb、Cu、Ni、Cd、Sr、P 等无机元素,测试结果相对偏差小于 2%。利用元素分析仪(Elementar Vario EL III,

Vario Ltd)以1 cm间隔测定沉积物总碳、总氮、总硫和总氢,相对偏差小于2%。测试工作在中国科学技术大学极地环境研究室完成。

挑选沉积柱中元素结果异常层位的未磨样品,经5%醋酸浸泡5 h,加热并滴加H₂O₂,去除绝大部分有机质和珊瑚砂,过滤后用去离子水洗净。残余物在超净室自然风干后,利用正置金相光学显微镜(DP70, Olympus)观察并拍摄形貌照片。将部分残余物置入2%盐酸中,加热煮沸3 h后用去离子水洗净,在超净室自然风干后,利用场发射扫描电镜(Sirion200, FEI)对残留物进行微区扫描成像,并利用X射线能谱对其中颗粒物的主要组成元素进行定性测定。镜下分析在中国科学技术大学理化科学实验中心完成。

2 结果与讨论

2.1 地球化学元素

无机元素分析结果显示,DY6沉积物中的常量元素主要为Ca、Mg和Na。其中Ca含量最高达34%,相应层位几乎全部由珊瑚砂和贝壳碎屑组成;Mg在植物中丰度较高,故也是沉积柱的常量元素;Na的高丰度可能与海水渗透有关。一般大陆湖泊沉积物中的常量元素,如Al、Ti、Fe和K等,在DY6沉积物中含量均较低(小于0.5%)。

DY6沉积物中总碳的含量整体都高于12%,并

在最底层达到最高值。总氮、总硫和总氢变化趋势与总碳基本一致,均在最底层出现高值,与Ca含量的变化表现出明显的反相关关系,这与沉积物中珊瑚碎屑和植物残体的相对丰度有关。

2.2 物源分析

沉积物中的元素在各种地质因素和环境条件综合作用下形成了特定的共生组合,是指示沉积物特性的地球化学指标。对平行柱DY2与DY4的分析结果表明,牛塘沉积物的3个主要沉积端元为珊瑚砂、鸟粪和植物^[19],这与DY6岩性分析的结果基本一致。

对各沉积端元的元素分析结果表明(表1),珊瑚砂主要组成元素为Ca和Sr等,其中Ca的含量接近40%,Sr的含量约为0.4%~0.7%,远高于其在“牛塘”周边植物和东岛新鲜鸟粪中的含量;鸟粪中K、Na、Ca、P、Fe和Ni等含量较高,这主要是由于海鸟多以富含这些元素的鱼类和甲壳纲动物为食,食物链的累积效应造成其特殊的元素组合特性^[20];本地植物则相对富集了Ca、Mg、K、Na、Fe和P等生物活性元素。

值得注意的是,沉积柱中Ti和Al的平均含量分别为4.25 μg/g和110.6 μg/g,均远高于3个主要沉积端元中Ti和Al的含量(表1)。考虑到“牛塘”是弱碱还原性水体,且沉积柱各层位中的植物叶片保存相对完好,表明沉积物中的有机质分解破坏较少,沉积物中出现的大量的Ti和Al不可能主要为植物残体的降解产物。

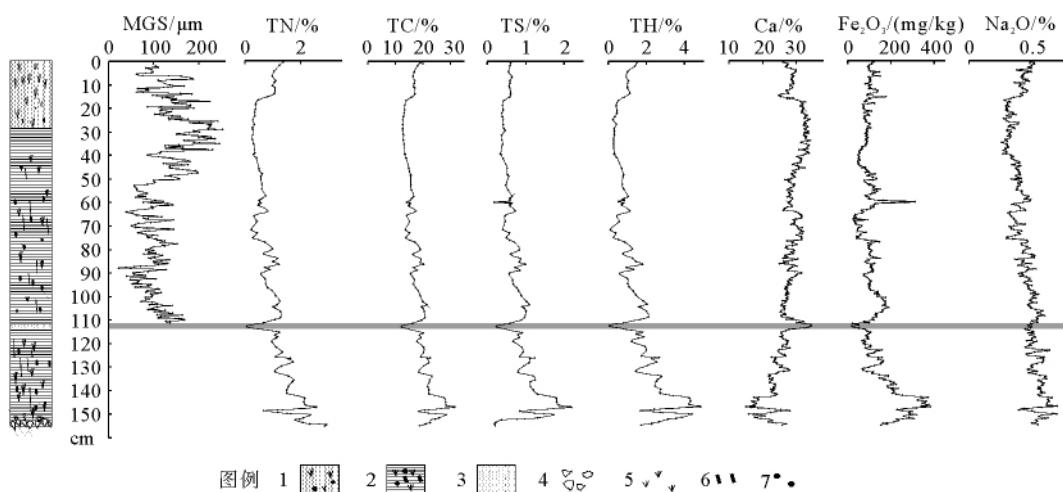


图2 南海西沙东岛DY6沉积物岩性与地球化学元素随深度的变化(灰色阴影表示珊瑚砂层)

Fig. 2 Lithology, Mean grain size(MGS), Total nitrogen (TN), Total carbon (TC), Total hydrogen(TH), Total sulfur(TS), Ca, Fe₂O₃ and Na₂O versus depth of DY6 sediment core

表 1 南海西沙东岛湖泊沉积柱与 3 个沉积端元的部分元素含量及变化范围

Table 1 Element contents of three end members and comparison with the average contents of elements from core samples

	元素 /氧化物	Al/ ($\mu\text{g/g}$)	Ti/ ($\mu\text{g/g}$)	$\text{Fe}_2\text{O}_3/$ ($\mu\text{g/g}$)	P/ %	$\text{K}_2\text{O}/$ ($\mu\text{g/g}$)	$\text{Na}_2\text{O}/$ %	Sr/ ($\mu\text{g/g}$)	Ca/ %	Mg/ ($\mu\text{g/g}$)
珊瑚砂($n=3$)	平均值	6.2	ND	ND	0.017	25.4	0.48	4 693	38.4	99
	变化范围	5.5~6.9	\	\	0.017~0.018	22.7~28.1	0.46~0.50	4 663~4 721	37.8~39.3	98~100
植物($n=6$)	平均值	10.4	0.35	34.0	0.19	455	1.54	294	1.7	5 173
	变化范围	3.9~19.5	0~0.95	20.9~62.1	0.12~0.29	282~683	0.27~2.27	197~574	0.7~2.9	3 080~10 210
鸟粪($n=3$)	平均值	3.45	ND	257	5.69	4 728	0.87	647	10.1	2 068
	变化范围	1.8~5.1	\	252~262	5.69~5.70	4 359~5 097	0.86~0.87	646~647	10.0~10.1	2 071~2 066
沉积样品 ($n=314$)	平均值	110.6	4.25	120	0.66	217	0.92	1 481	27.8	16 799
	变化范围	15~1 002	0~106.7	18~382	0.28~2.31	88~488	0.54~1.46	899~2 561	15.0~34.2	4 389~26 984

注:ND 低于检测限。

对 DY6 沉积物中 17 种无机元素进行 R 聚类的结果显示(图 3),沉积物中的元素明显聚为两大类。第 1 类包括 Ba、Sr、K、Na、Mn、Mg 和 Ca 等 7 种元素,结合表 1 中 3 个沉积端元的元素结果,这 7 种元素多为岛上植物和珊瑚砂中所富含,属于岛内来源。Cd、Cu、Zn、Fe、P、Cr、Ni、Pb、Ti 和 Al 等 10 种元素归于第 2 类,其中前 8 种元素均易被生物富集,可通过红脚鲣鸟传递到岛屿生态系统中。Ti 和 Al 虽然不属于生物富集元素,但其变化趋势与其他 8 种元素相似,表明 Ti 和 Al 代表的某种气候环境因素可能与海鸟种群数量的变化有关,指示了“牛塘”沉积物可能存在第 4 种物质输入,且与海鸟数量的变化相关联。根据 Wan 等的研究,在南海北部深海沉积柱中发现了经由冬季风携带,来源于亚洲内陆的沙尘物质^[21~23]。与南海海洋沉积物中包含大量河流

泥沙物质不同,东岛发育于独立的珊瑚礁坪,地表“土壤”均是历史时期鸟粪混合珊瑚细砂后形成的珊瑚鸟粪土,其中基本不含有 Al、Ti 和 Si 等重要成岩元素,矿物组分也与陆地常见的硅酸盐质土壤和风携粉尘有着本质的区别^[24],东岛“牛塘”沉积物 DY6 中较高含量的 Al 和 Ti 可能也与此类陆源粉尘有关。

2.3 粉尘颗粒形貌

为确定牛塘沉积物中第 4 个沉积端元,对沉积柱中 Ti 和 Al 含量较高层位(60~63 和 139~140 cm)和较低层位(18~20 和 76~76.5 cm)样品的酸不溶物进行观察。

如图 4A、B 所示,醋酸不溶物在光学显微镜下多呈现半透明白色晶体,具有较为规整的晶面结构特征,且粒径较为均一,可能是再结晶析出的盐类物质。但在 Ti(Al) 含量较高层位的样品(B)中,照片中存在更多的淡黄色、不规整形貌的颗粒,这类颗粒在 Ti(Al) 含量较低层位样品中较少发现。图 4C、D、E 为 60.5~61 cm(Al、Ti 含量较高层位)醋酸不溶物经稀盐酸(0.1 mol/L)多次滤洗后的显微照片,图中半透明晶体明显减少,残留颗粒物粒径基本在 10 μm 以内。仔细观察发现残余颗粒物表面较粗糙,形貌差异较大,整体呈现不规则的外形特征,较大颗粒的表面不均匀地分布着颜色各异的矿物结晶。图 4E 所示为具有不规则形貌的闪透颗粒,这可能是经酸洗后的石英微晶颗粒。这些颗粒物的形貌特征和表面微区矿物晶体与 2010 年春季沙尘暴天气时在安徽合肥收集到的粉尘颗粒一致(图 4F),但是粒径明显偏小。

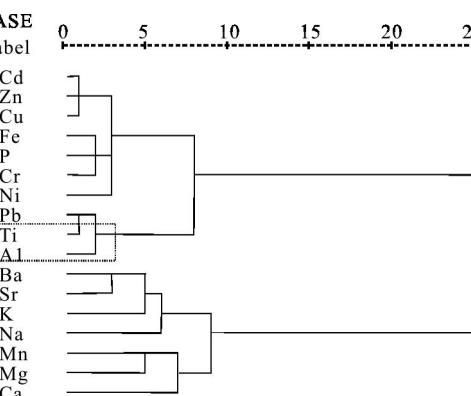


图 3 南海西沙东岛湖泊沉积柱中 17 种无机元素分层 R 聚类分析

Fig. 3 R-mode cluster analysis for the 17 inorganic elements in the DY6 sediments core

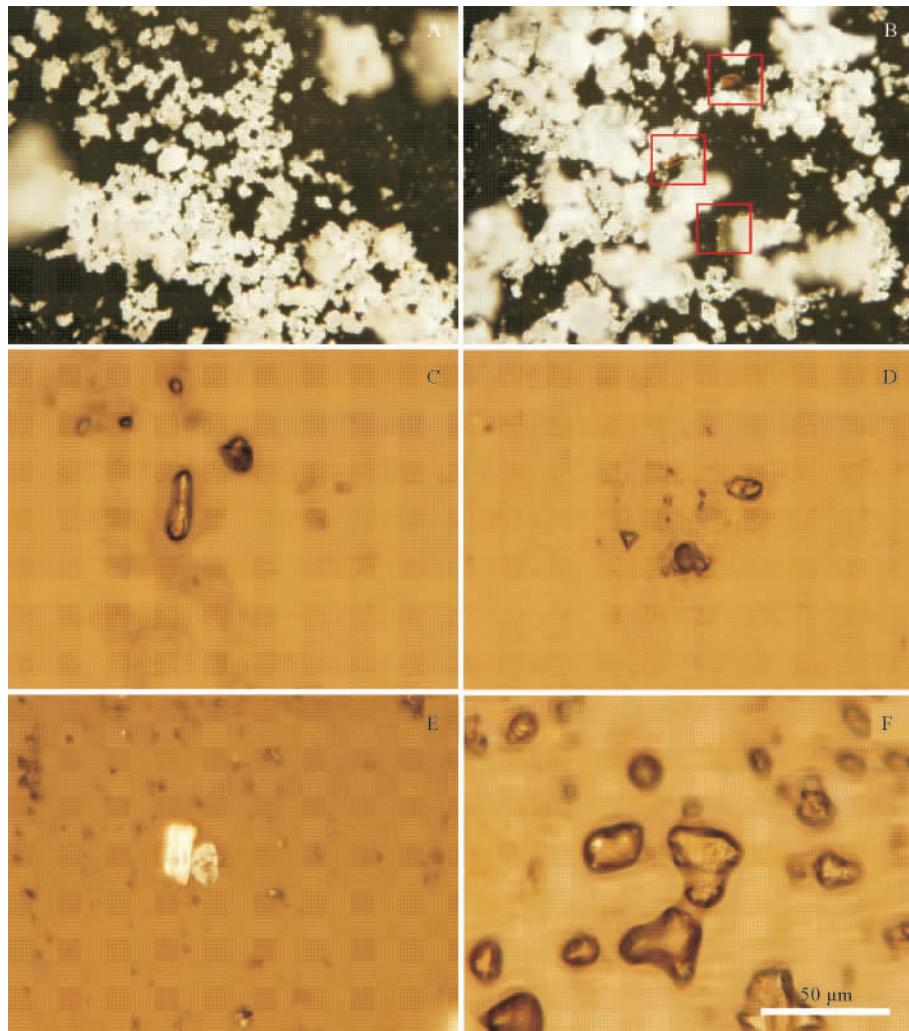


图4 南海西沙东岛湖泊沉积物中酸不溶物的光学显微照片

A为DY6-38(18.5~19 cm深度,Ti、Al含量较低);B为DY6-122(60.5~61 cm深度,Ti、Al含量较高)醋酸不溶物显微照片,

B中红色方框内为黄色不规则颗粒物;C、D和E为DY6-122用稀盐酸洗涤去除无机盐后的醋酸不溶物显微照片,

F为2010年春季收集于合肥的沙尘暴天气时的风尘颗粒照片

Fig. 4 Microscopic graphs of the particles in the remains of DY6-38(A) and DY6-122 (B), treated by acetum, and H_2O_2 , and then washed by Hydrochloric acid (C-E). The dust collected in Hefei in March, 2010 (F)

强酸处理可能在一定程度上破坏物质表面结构,为进一步观察沉积物中酸不溶颗粒物的原始形貌特征,明确颗粒物的化学组成结构,对Ti、Al含量相对较高层位样品(60~63和139~140 cm)经过醋酸和 H_2O_2 处理的残留物进行扫描电镜下观察,分析颗粒物表面结构,包括颗粒形态、磨圆度和表层特殊标志。如图5所示,A和B中酸不溶颗粒粒度均在10 μm 左右,近似为球形,有一定的磨圆度和较为明显的次生沉淀以及再溶蚀痕迹,这与韩国风成古土壤层(图4E)^[25]和南海北部海域钻孔^[23](图4F)中发现的风携石英颗粒在外观形貌上非常接近。图5C、D中颗粒有“新鲜”的贝壳状断面,次棱角较多,形貌与未受再成壤过程改造的黄土-古土壤

中颗粒相近^[26],也与日本Biwa湖湖泊沉积中黏土颗粒的形貌相似^[27]。特别是图5D中,颗粒表面有少量的碟形坑,呈次棱角状,说明这些物质进入“牛塘”沉积之前,曾经过较为猛烈的碰撞,发生了一定程度的磨损和破裂,而这都是粉尘物质在高纬度或者高寒源区经历机械碰撞,盐类裂解和冻融风化作用的证据^[28]。

颗粒物表面的X射线场发射能谱分析结果显示(图6),部分颗粒物表面主要元素组合为Si、Al、Fe、Mg、Si、Al、Ca、Na和Si、Al、K、Na等(图6A、C、D),与源自中国北部半干旱地区和西北部戈壁沙漠地区的沙尘颗粒化学成分特征基本一致^[29]。也有少量颗粒物表面仅含Si和O两种元素(图6B),

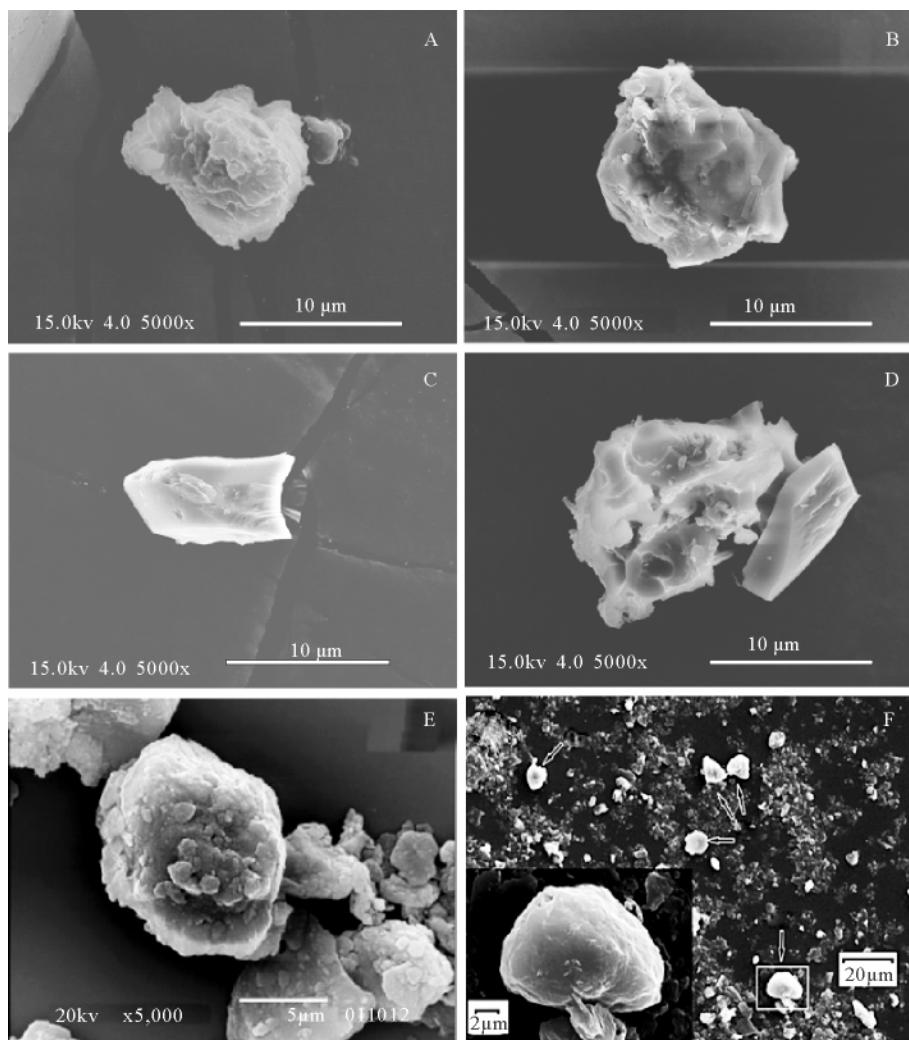


图 5 南海西沙东岛湖泊沉积物酸不溶颗粒物场发射扫描电镜照片及与其他风尘颗粒电镜照片对比

A-D. “牛塘”沉积物中酸不溶颗粒物扫描电镜照片; E. 韩国 Namyangju 市 Dukso 地区黄土-古土壤层颗粒的扫描电镜照片^[25];
F. 南海北部海区 ODP1146 站位海底沉积物中风成粉尘颗粒^[23]

Fig. 5 Field Emission-Scanning Electron Microscopic photographs of unsolvable grains in sediment core DY6 (A-D), particles of loess-paleosol layer in Dukso area, Namyangju City, Korea (E)^[25] and Eolian dust from ODP Site 1146 in the northern South China Sea (F)^[23]

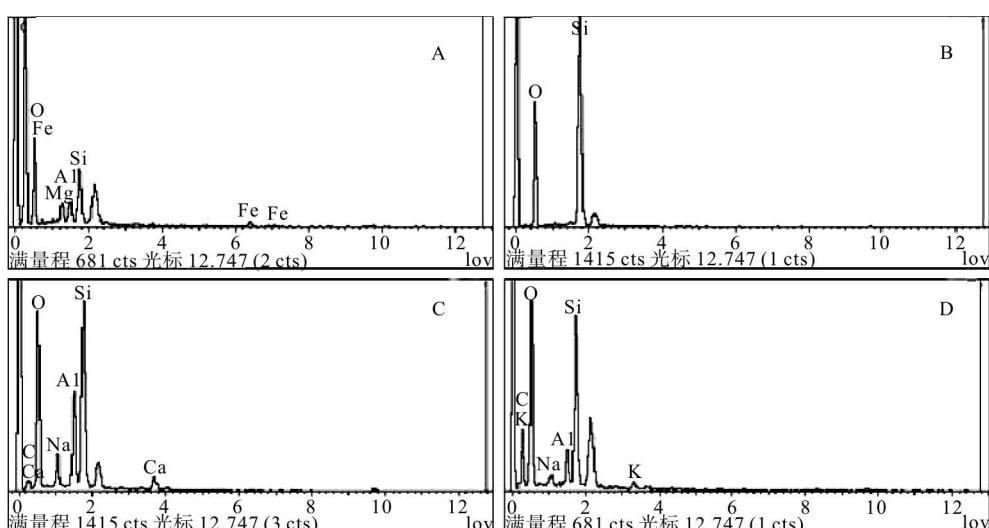


图 6 南海西沙东岛湖泊沉积物图 5 中相应酸不溶颗粒表面的 X 射线场发射能谱

Fig. 6 X-ray Field Emission Spectroscopy of the particles in Figure 5-A, B, C and D

应为石英颗粒。整体来看,粉尘颗粒物组成比较复杂,既有黏土质颗粒,也有较小的石英和硅酸盐质碎屑,因而,外部环境对其表面结构和形貌的改造程度也有一定差异。远源粉尘需要经过长距离传输,才能到达南海地区,而在此之前,粒度相对较大的石英颗粒大多会提前沉降,而小粒径的碎屑物质更容易被搬运到南海地区。一般对典型风成面貌(如撞击麻坑,较好的磨圆度等)的研究多集中于大于 $10 \mu\text{m}$ 粒径的沙尘颗粒中,粒径更小的颗粒可能由于撞击、破碎作用导致彼此形貌特征的不规则性。因此,“牛塘”沉积物中单一层位的酸不溶颗粒物形貌差异较大,但仍具有一定的风成特征,显示颗粒物可能经过了较长的风传送过程,由于赤道辐合带很大程度上阻碍了澳洲粉尘向北半球传输^[30],亚洲内陆地区是西沙海域陆源粉尘最有可能的源区。

综上所述,“牛塘”沉积柱样品中被归为外源输入且又难为生物富集的 Ti 和 Al 元素,与沉积物中酸不溶颗粒物相关,其来源可能是亚洲内陆干旱—半干旱地区的风成粉尘。此外,相对于亚洲其他临近粉尘源区,南海地区高分辨粉尘沉降研究相对较少,“牛塘”中陆源粉尘信号的发现,对于不同区域粉尘沉降所指代环境气候信号识别,东亚风场演变的区域特征都有较为重要的意义。

3 结论

南海西沙群岛东岛的“牛塘”沉积柱 DY6 保存着较为完整的未被扰动的沉积序列。元素地球化学分析结果表明, Ti 和 Al 在沉积柱中的含量明显高于其在 3 个主要岛内组成端元中的含量,为岛外物质输入来源。镜下观察和 X 射线场发射能谱结果显示,沉积物中含有具有风成粉尘形貌特征的陆源硅酸盐和石英颗粒物,牛塘沉积物中存在风携粉尘颗粒物。根据沉积物中 Ti 和 Al 元素含量变化特征指示粉尘输入量的变化,可以为重建典型季风区粉尘沉降历史和古季风风场研究提供有力的证据。

致谢:感谢吴自军博士和晏宏博士在西沙考察期间采集样品;感谢西沙水警区官兵在考察采样过程中的热情帮助;感谢梁有庆老师在样品测试工作中的指导和帮助。

参考文献(References)

- [1] Shao Y, Wyreoll K H, Chapell A, et al. Dust cycle: An emerging core theme in earth system science[J]. Aeolian Research, 2011, 2:181-204.
- [2] Mahowald N M, Engelstaedter S, Luo C, et al. Atmospheric iron deposition: Global distribution, variability, and human perturbations [J]. Annual Review of Marine Science, 2009, 1:245-278.
- [3] Gao Y, Arimoto R, Duce R A, et al. Temporal and spatial distributions of dust and its deposition to the China Sea [J]. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology, 1997, 49 (2):172-189.
- [4] Maher B A, Kohfeld K. LGM and late Holocene aeolian fluxes from ice cores, marine sediment traps marine sediments and loess deposition. 2009, <http://www.lec.lancs.ac.uk/dirt>.
- [5] Rea D K. The paleoclimatic record provided by eolian deposition in the deep sea: the geologic history of wind [J]. Reviews of Geophysics, 1994, 32(2):159-195.
- [6] An Z S. The history and variability of the east Asian paleomonsoon climate [J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19:171-187.
- [7] Liu T S, Ding Z L. Chinese loess and the paleomonsoon [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1998, 26: 111-145.
- [8] Liu T S, Guo Z T, Liu J Q, et al. Variations of eastern Asian monsoon over the last 140 000 years[J]. Bulletin De La Societe Geologique De France, 1995, 166(2):221-229.
- [9] Ding Z L, Liu T S, Rutter N W, et al. Ice-volume forcing of east Asian winter monsoon variations in the past 800 000 years [J]. Quaternary Research, 1995, 44(2):149-159.
- [10] 刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性[J]. 第四纪研究, 1998, 18(3):194-204. [LIU Tongsheng, ZHENG Mianping, GUO Zhentang. Initiation and evolution of the Asian Monsoon system timely coupled with the ice-sheet growth and the tectonic movements in Asia [J]. Quaternary Sciences, 1998, 18(3):194-204.]
- [11] An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalayan-Tibetan plateau since late Miocene times[J]. Nature, 2001, 411(6833):62-66.
- [12] 张德二,孙霞. 我国历史时期降尘记录南界的变动及其对北方干旱气候的推断 [J]. 第四纪研究, 2001, 21(6):1-8. [ZHANG Deer, SUN Xia. Variations of southern limits of dust fall records and the inferred historical climate drought in Northern China [J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(6):1-8.]
- [13] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, et al. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon [J]. Nature, 2007, 445(7123):74-77.
- [14] Zhang D, Lu L H. Anti-correlation of summer/winter monsoons? [J]. Nature, 2007, 450(7168):E7-E8.
- [15] Zhou H Y, Guan H Z, Chi B Q. Record of winter monsoon strength[J]. Nature, 2007, 450(7168):E10-E11.
- [16] 赵焕庭. 西沙群岛考察史[J]. 地理研究, 1996, 15(4):55-65. [ZHAO Huanting. History of expeditions to Xisha Islands [J]. Geographical Research, 1996, 15(4):55-65.]
- [17] 海南省海洋厅. 海南省海岛资源综合调查专业报告集[M]. 北京:海洋出版社, 1999. [Island Resources Investigation Reports of

- Hainan Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 1999.]
- [18] Liu X D, Zhao S P, Sun L G, et al. Geochemical evidence for the variation of historical seabird population on Dongdao Island of the South China Sea [J]. Journal of Paleolimnology, 2006, 36(3): 259-279.
- [19] 赵三平, 孙立广, 刘晓东, 等. Sr/Ca, Mg/Ca: 珊瑚岛鸟粪沉积的物源指示剂[J]. 第四纪研究, 2007, 27(1): 149-156. [ZHAO Sanping, SUN Liguo, LIU Xiaodong, et al. Using Sr/Ca and Mg/Ca ratios as source indicators of Ornithogenic lacustrine sediments on coral island [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(1): 149-156.]
- [20] Liu X D, Zhao S P, Sun L G, et al. P and trace metal contents in biomaterials, soils, sediments and plants in colony of red-footed booby (*Sula sula*) in the Dongdao Island of South China Sea[J]. Chemosphere, 2006, 65(4): 707-715.
- [21] Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian monsoon climate during the late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea[J]. Marine Geology, 1999, 156: 245-284.
- [22] 汪品先, 詹知湣, 赵泉鸿, 等. 南海演变与季风历史的深海证据[J]. 科学通报, 2003, 48(21): 2228-2239. [WANG Pinxian, JIAN Zhimin, ZHAO Quanhong, et al. Evolution of South China Sea and monsoon history of deep sea evidences [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(21): 2228-2239.]
- [23] Wan S M, Li, A C, Clift P D, et al. Development of the East Asian monsoon: Mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2007, 254(3-4): 561-582.
- [24] 刘东生. 黄土与干旱环境[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2009: 382-389. [LIU Tongsheng. Loess and Arid Environments[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2009: 382-389.]
- [25] Yu K M, Shin J B, Naruse T. Loess-paleosol stratigraphy of Dukso area, Namyangju City, Korea (South)[J]. Quaternary International, 2008, 176: 96-103.
- [26] Xiao J L, Porter S C, An Z S, et al. Grain size of quartz as an indicator of winter monsoon strength on the loess plateau of central China during the last 130 000 years[J]. Quaternary research, 1995, 43: 22-29.
- [27] Xiao J L, Yoshio I, Hisao K, et al. Eolian quartz flux to Lake Biwa, Central Japan, over the past 145 000 years[J]. Quaternary research, 1997, 48: 48-57.
- [28] 刘进峰, 郭正堂, 乔彦松, 等. 秦中新世黄土-古土壤序列石英颗粒形态特征、粒度分布及其对成因的指示意义[J]. 科学通报, 2005, 50(24): 2806-2810. [LIU Jinfeng, GUO Zhengtang, QIAO Yansong, et al. Quartz grains morphological characteristics, grain size distribution and implications of Qin'an loess-paleosol in Miocene[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(24): 2806-2810.]
- [29] 李卫军, 邵龙义, 余华, 等. 内陆输送过程中沙尘单颗粒类型及其非均相反应[J]. 中国环境科学, 2008, 28(3): 193-197. [LI Weijun, SHAO Longyi, YU Hua, et al. Individual dust particles of long-range transport over continent of China: Types and sulfuric heterogeneous reactions[J]. China Environmental Science, 2008, 28(3): 193-197.]
- [30] McGee D, Marcantonio F, Lynch-Stiglitz J. Deglacial changes in the Eastern Equatorial Pacific [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012, 257: 386-395.

RECORDS OF TERRIGENOUS DUST IN LACUSTRINE SEDIMENTS FROM DONGDAO ISLAND, SOUTH CHINA SEA

LIU Yi¹, SUN Liguo¹, LUO Yuhan¹, SUN Song², WANG Yuhong²

(1. Institute of Polar Environment, Department of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: A lacustrine sediment core (DY6) was collected from the "Nietang Pond" on Dongdao Island, South China Sea (SCS). Geochemical, morphological, and mineralogical analyses were performed for the sediment samples. The results of major elements showed that the concentrations of Ti and Al in the sediment samples were much higher than those in three end-members (coral sand, guano and plants). Hierarchical clustering analysis of geochemical elements indicated that Al and Ti were exogenous. Furthermore, according to the microscopic analysis, there are more acid-insoluble particles in the subsamples with high Ti (Al) contents, some of which showed similar morphological characters with the eolian dusts from Hefei, the loess-paleosol particles from Korea and the dust deposits from the north of SCS. The major elements concentrations of the acid-insoluble particles surfaces detected by X-ray energy spectrum revealed that these particles were mainly made up of silicate and quartz. Consequently, the accumulation of Ti and Al in the lacustrine sediments of Dongdao Island was quite possibly caused by the input of the terrigenous dust from the interior of Asia continent. The East Asian Winter Monsoon might be the transportation medium.

Key words: lacustrine sediment; terrigenous dust; East Asian Winter Monsoon; South China Sea