

田成静, 欧阳婷萍, 朱照宇, 邱燕, 彭学超, 李明坤. 海南岛周边海域表层沉积物磁化率空间分布特征及其物源指示意义[J]. 热带地理, 2013, 33(6): 666-673.

## 海南岛周边海域表层沉积物磁化率 空间分布特征及其物源指示意义

田成静<sup>1,2</sup>, 欧阳婷萍<sup>1</sup>, 朱照宇<sup>1</sup>, 邱燕<sup>3</sup>, 彭学超<sup>3</sup>, 李明坤<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 广州海洋地质调查局, 广州 510760)

**摘要:** 海洋表层沉积物的磁学性质逐渐被证明是分析海洋沉积物物源的有效手段之一。选取海南岛周边海域 39 个站位的表层沉积物进行了磁学特征研究。结果表明: 海南岛周边海域表层沉积物的低频磁化率和频率磁化率具有明显的空间分异特征, 表现为高值区主要出现在海南岛以南海域, 而海南岛以东和以西海域则呈现从岸向海逐渐降低的趋势。磁化率的影响因素分析表明: 研究区海洋表层沉积物的磁化率主要由陆源碎屑物质贡献, 因此可以认为沉积物低频磁化率和频率磁化率的空间分布特征能指示陆源输入的变化。利用多个环境磁学参数对采样点进行 Q 型聚类, 并结合低频磁化率和频率磁化率的空间分布特征及采样点的地理位置将研究区划分为 4 个区域: 海南岛以东水深超过 100 m 的海域 ( 区 ) 沉积物主要来源于其东北面的珠江水系, 同时粤西沿岸河流携带来的物质也有一定程度的影响; 海南岛以东水深小于 100 m 和海南岛以南海域 ( 区 ) 沉积物可能主要来自于海南岛沿岸侵蚀搬运以及入海河流输入; 北部湾北部海域 ( 区 ) 沉积物受琼州海峡和北部湾沿岸河流输入物质的共同影响; 海南岛以西海域 ( 区 ) 沉积物受来自海南岛西南侧河流输入、沿岸侵蚀物和由南向北的洋流所携带的沉积物的共同影响。研究表明: 低频磁化率和频率磁化率组合可有效指示近岸表层沉积物的物源变化。

**关键词:** 海洋表层沉积物; 低频磁化率; 频率磁化率; 物质来源; 海南岛周边海域

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-5221(2013)06-0666-08

海洋沉积的物质来源分析是近代海洋沉积学研究的核心问题之一<sup>[1-3]</sup>, 其对于正确理解沉积物组成特征所记录的地质和古环境信息具有重要意义。目前, 地球科学的主要研究方法如矿物学法<sup>[4-5]</sup>和元素、同位素地球化学法<sup>[6-10]</sup>等都被广泛应用于沉积物物质来源及其组成变化研究。作为 20 世纪 70 年代中期发展起来的一门新兴交叉学科, 环境磁学可以通过对物质的磁性测量, 分析其磁性矿物的种类、含量和粒度等特征。环境磁学参数, 尤其是磁化率是海洋研究中最快速、最常用的指标, 与传统的研究方法相比, 具有适用性广、灵敏度高、简单快速、非破坏性等优点<sup>[11]</sup>。近年来, 越来越多的研究证明了环境磁学可以有效揭示海洋沉积物质的来源组成及其蕴含的环境信息<sup>[12-18]</sup>。

海南岛周边海域位于南海北部大陆边缘, 环绕

海南岛陆地分布, 是华南大陆和越南部分河流输送陆源物质进入南海的重要区域, 具有明显的陆海过渡的沉积学特征。前人利用环境磁学方法对南海地区沉积物的研究主要侧重于古环境方面<sup>[19-23]</sup>, 而运用磁学分析探讨南海沉积物物质来源的研究则相对较少<sup>[24]</sup>。而前人通过沉积学、矿物学、地球化学方法等手段对海南岛周边海域沉积物物质来源进行过探索性研究<sup>[25-27]</sup>, 但到目前为止尚未形成统一意见。本研究选取海南岛周边海域表层沉积物为研究对象, 深入分析其低频磁化率和频率磁化率的空间分布, 在此基础上利用组合分区方法对所选取的研究站位进行区划并探讨海洋表层沉积物低频磁化率和频率磁化率的物源指示意义, 以为环境磁学在南海沉积物物源研究方面的深入应用提供基本素材并奠定基础。

收稿日期: 2013-08-19; 修回日期: 2013-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272384); 中国地质调查局项目(GZH200900504); 973 计划项目(2010CB833405)

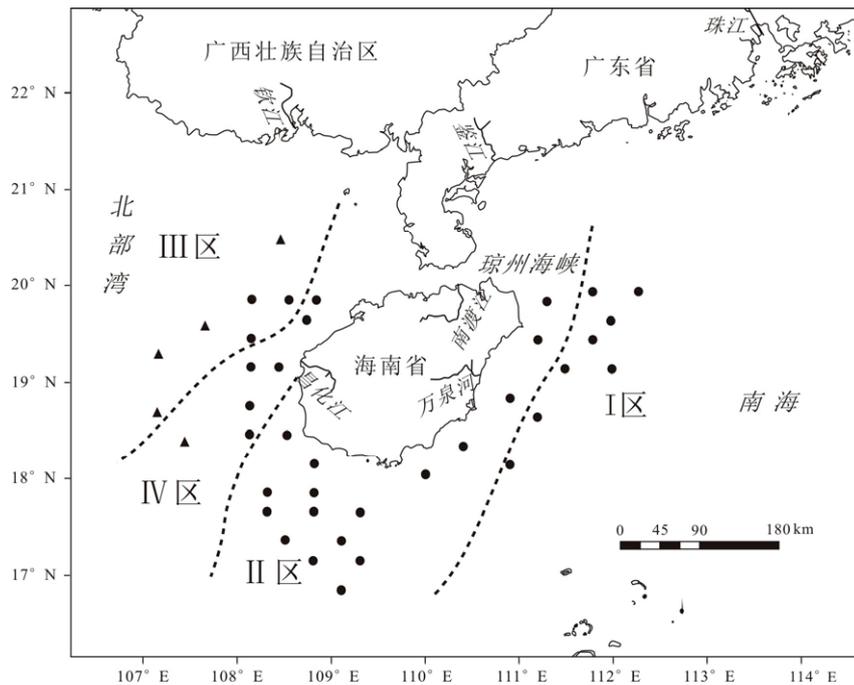
作者简介: 田成静(1989), 女, 湖北潜江人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋环境磁学, (E-mail) tiancj11@163.com.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与处理

本次研究的39个站位的表层沉积物较均匀地分布在海南岛周边海域，采样点地理位置为 $16^{\circ}53'60''$   $20^{\circ}30'00''$  N,  $107^{\circ}05'60''$   $112^{\circ}17'60''$  E, 水深范围为30~200 m (图1)。所有样品由广州海洋

地质调查局提供，以箱式样为主(34个)，仅北部湾5个样品为抓斗样(见图1)。先将边长为2 cm的无磁性立方盒压入柱状(箱式样)或块状(抓斗样)沉积物，以无磁性陶瓷刀取出并削平盖好后用无磁性胶带密封用以进行磁学分析测试。取出无磁性立方盒后剩下的散样装入密封袋用于其他指标的分析测试。



图注：●代表箱式样；▲代表抓斗样。

图1 采样点站位分布和沉积分区

Fig.1 Distribution of sampling stations and sedimentation zonations

### 1.2 分析方法

利用卡帕桥多频各向异性磁化率仪(MFK1-FA)进行低频(976 Hz)和低频(15 616 Hz)磁化率(分别用 $\chi_{lf}$ 和 $\chi_{hf}$ 表示)测试,并换算为质量磁化率;根据以下公式<sup>[28]</sup>计算频率磁化率系数 $\chi_{fd}$ (单位:%):

$$\chi_{fd} = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} \times 100 \quad (1)$$

用交变退磁仪(D-2000)在100 mT的峰值场并附加0.05 mT的直流场下获得非磁滞剩磁(ARM),然后用旋转磁力仪(JR-6A)进行测试,本文以其磁化率的形式( $\chi_{ARM}$ )表示。利用脉冲磁力仪(IM-10-30)加场至2 T,然后反向加场至300 mT使样品获得等温剩磁(IRM)后用旋转磁力仪(JR-6A)进行测试,并以2 T磁场下的IRM作为饱和等温剩磁(SIRM),定义S-比值 =  $IRM_{300mT} / SIRM$ 。所有磁学

分析在中国科学院广州地球化学研究所环境磁学实验室完成,用于分析的样品均保持原水分。

为了去除沉积物中海洋自生成因部分的影响<sup>[29]</sup>,另取约6.0 g散样用浓度为1 mol/L盐酸(HCl)进行浸泡、洗涤,然后低温烘干获得酸不溶部分样品,称重后计算出酸不溶部分质量百分比。

## 2 测试结果

研究区表层沉积物的低频磁化率和频率磁化率的变化范围分别为 $(6.56 \sim 34.2) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和2.34%~10.64%,平均值分别为 $16.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和6.34%。所研究样品的低频磁化率和频率磁化率的空间分布如图2所示。低频磁化率的高值主要出现在海南岛以南;海南岛以东和以西低频磁化率值呈现由岸向海逐渐降低的趋势(图2-a)。大部分样品的

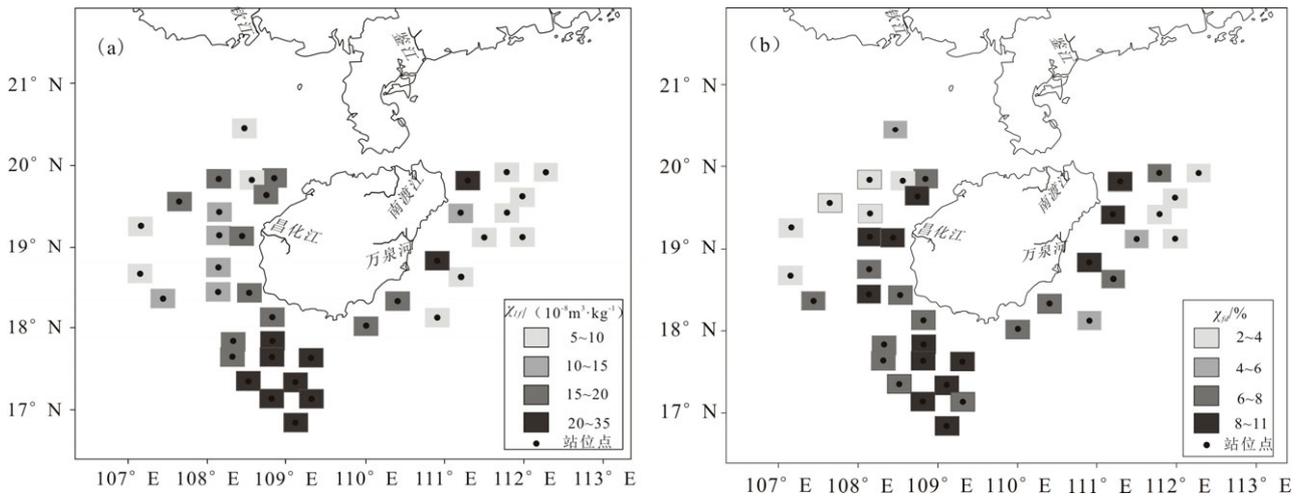


图2 研究区表层沉积物低频磁化率 (a) 和频率磁化率 (b) 空间分布

Fig.2 Spatial distribution of low frequency magnetic susceptibility (a) and frequency-dependent susceptibility (b) of the studied area

频率磁化率值超过3% ,表明研究区表层沉积物中含有相当部分超顺磁颗粒<sup>[28]</sup>。其空间分布特征与低频磁化率类似,高值区主要出现在海南岛以南和环海南岛近岸区,海南岛以东水深超过100 m和北部湾北部海域则相对较低(图2-b)。

### 3 讨论

#### 3.1 磁化率的影响因素分析

海洋沉积物中的磁性矿物的主要成因包括碎屑成因和生物成因2种<sup>[30-32]</sup>, Oldfield<sup>[33]</sup>提出用 $\chi_{ARM}/\chi$ 和 $\chi_{ARM}/\chi_{fd}$ 图解来判断沉积物中(亚)铁磁性矿物的成因。碎屑成因磁性矿物的 $\chi_{ARM}/\chi$ 和 $\chi_{ARM}/\chi_{fd}$ 值均较低,  $\chi_{ARM}/\chi$ 值介于3~30之间,  $\chi_{ARM}/\chi_{fd}$ 值介于 $(0.03\sim 0.8)\times 10^3$ 之间;而生物成因磁性矿物的 $\chi_{ARM}/\chi$ 和 $\chi_{ARM}/\chi_{fd}$ 值均较高,  $\chi_{ARM}/\chi$ 值介于35~80之间,  $\chi_{ARM}/\chi_{fd}$ 值介于 $(0.8\sim 7)\times 10^3$ 之间。研究区样品的 $\chi_{ARM}/\chi$ 值变化范围为5~30,  $\chi_{ARM}/\chi_{fd}$ 值变化范围为 $(0.01\sim 0.08)\times 10^3$ (图3),由此判断所研究样品中的磁性矿物主要为碎屑成因,沉积物磁化率反映的应该是陆源物质的信息。另外,全岩样品低频磁化率与酸不溶部分(陆源碎屑)质量百分比间显著的正相关关系(图4)进一步表明:所研究的海南岛周边海域表层沉积物的磁化率主要由陆源输入磁性矿物所贡献。

海洋环境中还原成岩作用会对陆源输入的磁性矿物产生溶解、改造等作用导致其磁性矿物组成发生变化,从而影响沉积物的磁性<sup>[34-36]</sup>。本研究所有样品为海南岛周边水深小于200 m海域的表层沉

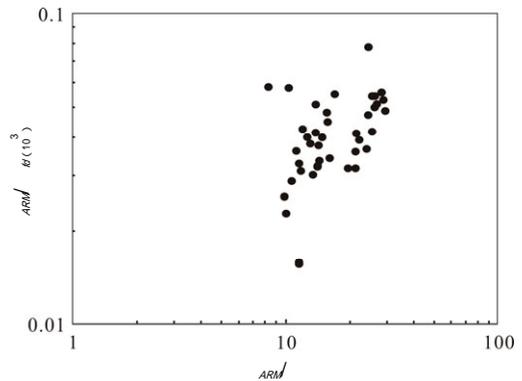


图3 磁性矿物成因判别图

Fig.3 Distinguishing plot for causes of magnetic minerals

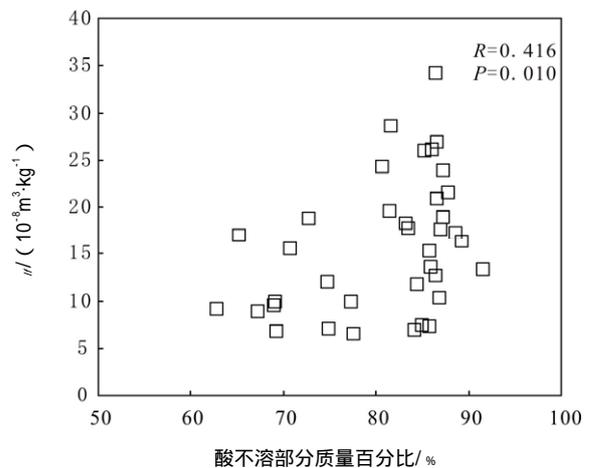


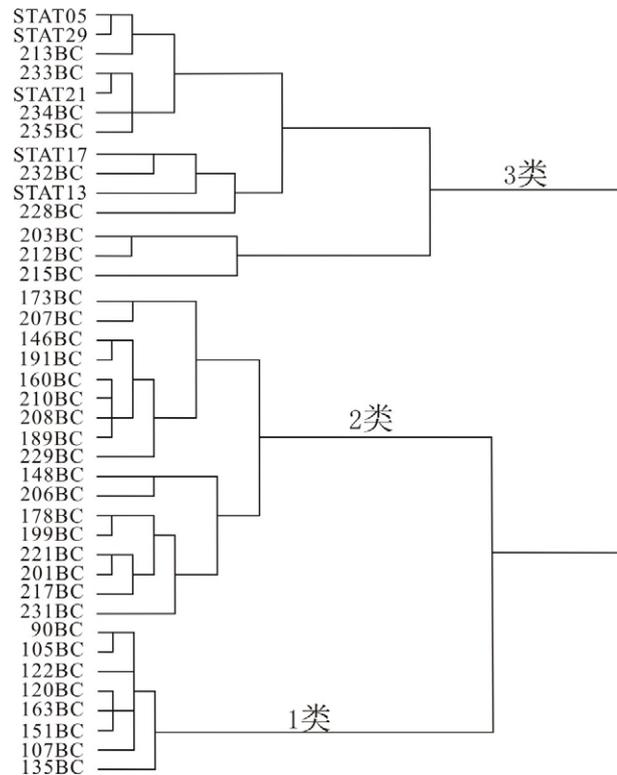
图4 磁化率与酸不溶部分质量百分比

Fig.4 Correlation between magnetic susceptibility and the mass percentage of acid insoluble part

积物，推测还原成岩作用对其影响较弱。大量研究表明： $SIRM/\chi$ 值不仅可以指示磁性颗粒大小变化，还可以用来指示沉积物中磁性矿物的种类<sup>[37-38]</sup>。Maher<sup>[39]</sup>进一步指出：磁铁矿的 $SIRM/\chi$ 值通常在10 kA/m附近，而 $SIRM/\chi$ 介于20~70 kA/m时可能指示黄铁矿的存在， $SIRM/\chi > 70$  kA/m时可能指示胶黄铁矿的存在。所研究的海南岛周边海域表层沉积物 $SIRM$ 的最大值为13.98 kA/m，平均值为10.44 kA/m，因此判断沉积物中主要磁性矿物为磁铁矿，而黄铁矿和磁黄铁矿的信号极弱，即早期还原成岩作用对本研究涉及的表层沉积物的影响非常有限，可不予考虑。

### 3.2 磁性指标组合分区及物源指示意义

低频磁化率和频率磁化率分布特征显示不同采样点其数值变化较大。选取 $\chi_{lf}$ 、 $\chi_{ARM}$ 、 $SIRM$ 和 $S$ -比值等磁性指标作为特征参数，在数理统计软件SPSS 16.0中采用离差平方和法对研究区沉积物样品进行Q型聚类分析，将具有相同特点的样品进行归类，结果如图5所示。研究区样品可分为三类。对照采样点的地理分布发现，1类位于海南岛以东水深大于



图注：BC代表箱式样；STAT代表抓斗样。

图5 聚类分析枝状图

Fig.5 Tree plot of cluster analysis

100 m的海域，包括8个采样站位；2类位于海南岛以东水深小于100 m和海南岛以南海域，包括17个采样站位；3类位于海南岛以西海域，包括14个采样站位。

在聚类分析分类的基础上，对三类样品的低频磁化率和频率磁化率作散点图作进一步分析。发现1类样品具有低的低频磁化率和频率磁化率；2类样品的低频磁化率和频率磁化率都较高；3类样品明显分为2个部分，一部分具有低的低频磁化率和频率磁化率，另一部分具有低的低频磁化率和高频率磁化率特征（图6）。最后，根据上述特征将本研究涉及站位的海域划分为4个区域（见图1）。各区表层沉积物的低频磁化率和频率磁化率的统计结果如表1所示。

区沉积物位于海南岛以东水深大于100 m的海

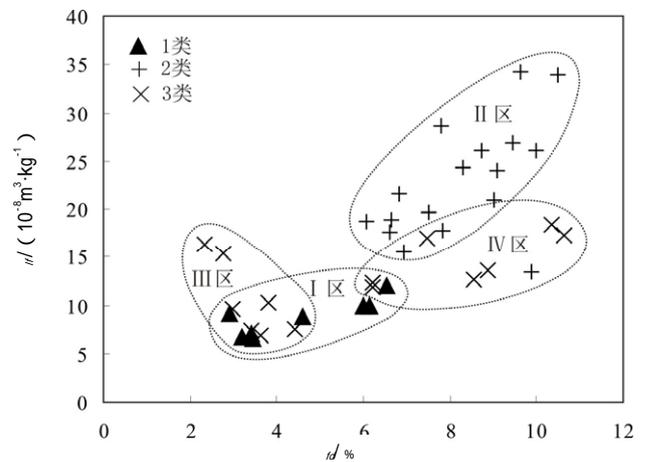


图6 低频磁化率-频率磁化率散点图

Fig.6 Scatter plot of low frequency magnetic susceptibility and frequency-dependent susceptibility

域，沉积物的低频磁化率和频率磁化率值均较低，这说明该区接受了磁化率值低的沉积物来源。根据1:1750000广东省、香港、澳门特别行政区地质图，广东省岩石类型主要以花岗岩和沉积岩为主，并含有少量的变质岩和玄武岩。珠江流域流经的地区主要为燕山期的花岗岩，寒武纪的砂页岩、灰岩，奥陶纪的砂砾岩、硅质页岩、灰岩和泥盆纪的灰岩、硅质岩等。粤西地区也均主要为燕山期的花岗岩。花岗岩主要成分为石英、碱性长石和酸性斜长石<sup>[40]</sup>，这些矿物属于逆磁性和弱顺磁性矿物，其磁化率值介于 $(-1.3\sim 0.01) \times 10^{-6}$ SI之间<sup>[41]</sup>。而岩石是由矿物组成的，岩石内部包含的磁性矿物的多少以及磁性矿物本身磁化率大小就决定了整块岩石的磁化率大

表1 各区沉积物低频磁化率与频率磁化率统计值

Tab.1 Statistical results of low frequency magnetic susceptibility and frequency-dependent susceptibility for different zones

分区	$\chi_{lf}$ ( $10^{-8} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )			$\chi_{fd}/\%$		
	变化范围	平均值	标准差	变化范围	平均值	标准差
Ⅰ区	6.56~12.01	8.97	1.9	2.9~6.55	4.54	1.49
Ⅱ区	13.38~34.22	22.84	5.96	6.08~10.49	8.28	1.37
Ⅲ区	6.90~16.29	10.45	3.87	2.34~4.43	3.34	0.70
Ⅳ区	11.82~18.36	14.72	2.71	6.21~10.64	8.33	1.8

小<sup>[42]</sup>,因此花岗岩的磁化率值低。沉积岩由于其形成过程中,母岩物质经过了风化,剥蚀和搬运,保存下来的大多数是抗风化的磁化率值小的斜长石和石英等<sup>[43]</sup>,沉积岩磁化率值也均普遍较低。不同类型的岩石经过风化剥蚀形成的沉积物的磁化率值也均有差别,磁化率值低的花岗岩和沉积岩风化形成的沉积物磁化率值也均较低<sup>[44]</sup>。结合前人进行的矿物学研究<sup>[45-46]</sup>,推测Ⅰ区沉积物可能来源于其东北面的珠江水系和北部粤西沿岸河流携带来的物质。

Ⅱ区沉积物位于海南岛以东水深小于100 m和海南岛以南海域,沉积物的低频磁化率和频率磁化率都较高,说明本区沉积物中磁性矿物含量较高同时含有相当部分的超顺磁颗粒;同时,两者之间呈明显的正相关关系,低频磁化率主要由超顺磁等细粒磁性颗粒贡献。结合该区所处的地理位置,其物质来源应该受海南岛影响。海南岛独立入海的辐射状河流有154条,每年向周边近海输入大量泥沙。根据1:1 000 000海南岛地质图,海南岛北部主要以玄武岩为主,且玄武岩的主要成分为斜长石、橄榄石、辉石以及少量铁镁质微粒矿物,其中暗色矿物橄榄石、辉石以及铁镁质微粒矿物属于强顺磁性矿物<sup>[41]</sup>,所以玄武岩磁化率值较花岗岩和沉积岩磁化率值高,其经过风化作用形成的沉积物通过河流携带入海,且磁性矿物大多属于比重大的矿物。因此,大部分泥沙沉积在海南岛周边海域导致了Ⅱ区沉积物出现高磁化率现象。另外,海南岛地处亚热带热带气候区,气候湿润温暖多雨,强烈的化学风化作用使其土壤中超顺磁颗粒含量很高。该区的高低频磁化率特征与高频磁化率特征的一致性也说明了该区物质主要来自于海南岛沿岸冲刷和入海河流。这一结论与陈丽蓉等<sup>[47]</sup>通过矿物组成得出的结果相似。

Ⅲ区沉积物位于北部湾北部海域,在低频磁化率-频率磁化率散点图上,Ⅱ区与Ⅲ区有部分重叠,推测这2个区域的沉积物一定程度上受相同物源的

影响。Ⅳ区低频磁化率与频率磁化率值呈明显的负相关关系,推测这种现象可能与搬运距离有关,随着搬运距离的增加,颗粒粒度逐渐变细,磁性矿物含量则逐渐降低。因此可以通过频率磁化率值逐渐增大而低频磁化率值逐渐减小的方向来反映沉积物运移的方向。该区沉积物主要是向西南方向运移,可能主要受到琼州海峡向西输运而来的沉积物与北部湾沿岸携带来的物质供给影响。这一推论与前人通过稀土元素(REE)<sup>[48]</sup>和粒度<sup>[49]</sup>分析得出的结论类似。琼州海峡的物质应当含有珠江口以及粤西沿岸河流(如吴川市附近的鉴江等)的陆源物质<sup>[50-51]</sup>,这也证实了Ⅱ区与Ⅲ区在一定程度上具有相同物质来源的推论。

Ⅳ区沉积物位于海南岛以西,与Ⅱ区沉积物相比较,同样具有高的频率磁化率。因此Ⅳ区沉积物同样受到海南岛西南侧河流和沿岸侵蚀携带来的沉积物所控制。所不同的是:Ⅳ区沉积物的低频磁化率值低于Ⅱ区,且频率磁化率与低频磁化率之间基本上没有明显的相关性,频率磁化率对低频磁化率的贡献较Ⅱ区而言相对较弱。根据北部湾环流资料<sup>[52-53]</sup>分析:在冬、夏两季环流的模式是大致相同的,其中有一支南海外海水从南部湾口流入湾内,并从北部湾的中东部向北推进。洋流携带的沉积物中磁性矿物含量少,但矿物粒度偏细。所以其对该区的频率磁化率值没有影响,而对磁性矿物浓度起到了稀释作用,导致了低频磁化率值较Ⅱ区有降低的现象。因此,Ⅳ区沉积物受来自海南岛西南侧河流输入、沿岸侵蚀物和由南向北的洋流所携带的沉积物的共同影响。

## 4 结论

通过对海南岛周边海域39个站位的表层沉积物进行的磁学特征研究,本文得出以下结论:

1)海南岛周边海域表层沉积物低频磁化率和频率磁化率的高值主要出现在海南岛以南,而海南岛以东和以西海域则呈现由岸向海逐渐降低的趋势。

研究区表层沉积物磁化率反映的是陆源输入物质的信息。

2) 在选取 $\chi_{lf}$ 、 $\chi_{ARM}$ 、SIRM和S-比值等特征参数进行Q型聚类分析的基础上,结合沉积物低频磁化率和频率磁化率的空间分布及采样点的地理位置将研究区划分为4个区域: I区,海南岛周以水深超过100 m的海域,沉积物主要来源于其东北面的珠江水系,同时粤西沿岸河流携带来的物质也有一定程度的影响; II区,海南岛以东水深小于100 m和海南岛以南海域,沉积物可能主要来自于沿岸冲刷和沿岸河流输入; III区,北部湾北部海域,受琼州海峡向西运输而来的沉积物与北部湾西北部沿岸入海河流输入物质的共同影响; IV区,海南岛以北海域,沉积物受来自海南岛西南侧河流输入、沿岸侵蚀物和由南向北的洋流所携带的沉积物的共同影响。

3) 对海南岛周边海域表层沉积物所进行的环境磁学研究结果表明:低频磁化率和频率磁化率可以有效指示南海海域表层沉积物的物源变化。环境磁学分析为研究近岸表层沉积物物源变化提供了一种新的途径。

#### 参考文献:

- [1] Sholkovitz E R, Elderfield H, Szymczak R, et al. Island weathering: river sources of rare earth elements to the Western Pacific Ocean [J]. *Marine Chemistry*, 1999, 68 (1/2): 39-57.
- [2] Singh P, Rajamani V. REE geochemistry of recent clastic sediments from the Kaveri floodplains, southern India: Implication to source area weathering and sedimentary processes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65 (18): 3093-3108.
- [3] Munksgaard N C, Lim K, Parry D L. Rare earth elements as provenance indicators in North Australian estuarine and coastal marine sediments [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2003, 57 (3): 399-409.
- [4] Bayhan E, Ergin M, Temel A, et al. Sedimentology and mineralogy of surficial bottom deposits from the Aegean Çanakkale Marmara transition (Eastern Mediterranean): effects of marine and terrestrial factors[J]. *Marine Geology*, 2001, 175 (1/4): 297-315.
- [5] Dinis P A, Soares A F. Stable and ultrastable heavy minerals of alluvial to nearshore marine sediments from Central Portugal: Facies related trends [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 201 (1/2): 1-20.
- [6] Nelson B, Depaolo D. Application of Sm-Nd and Rb-Sr isotope systematics to studies of provenance and basin analysis[J]. *J. Sediment. Petrol*, 1988, 58: 348-357.
- [7] McLennan S M. Rare-Earth Elements in Sedimentary-Rocks-Influence of Provenance and Sedimentary Processes[J]. *Reviews in Mineralogy*, 1989, 21 (1): 169-200.
- [8] Cullers R L. The Controls on the Major and Trace-Element Variation of Shales, Siltstones, and Sandstones of Pennsylvanian-Permian Age from Uplifted Continental Blocks in Colorado to Platform Sediment in Kansas, USA[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(22): 4955-4972.
- [9] Brems D, Ganio M, Latruwe K, et al. Isotopes on the Beach, Part 1: Strontium Isotope Ratios as a Provenance Indicator for Lime Raw Materials Used in Roman Glass-Making[J]. *Archaeometry*, 2013, 55 (2): 214-234.
- [10] Brems D, Ganio M, Latruwe K, et al. Isotopes on the Beach, Part 2: Neodymium Isotopic Analysis for the Provenancing of Roman Glass-Making[J]. *Archaeometry*, 2013, 55 (3): 449-464.
- [11] Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism* [M]. London: Allen and Unwin, 1986.
- [12] Sachs S D, Ellwood B B. Controls on magnetic grain-size variations and concentration in the Argentine Basin, South Atlantic Ocean[J]. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 1988, 35 (6): 929-942.
- [13] 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 (6): 1093-1108.
- [14] Kimbrough D L, Abbott P L, Gastil R G, et al. Provenance investigations using magnetic susceptibility[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1997, 67 (5): 879-883.
- [15] Watkins S, Maher B A. Magnetic characterisation of present-day deep-sea sediments and sources in the North Atlantic[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 214 (3/4): 379-394.
- [16] Liu J, Zhu R, Li G. Rock magnetic properties of the fine-grained sediment on the outer shelf of the East China Sea: implication for provenance[J]. *Marine Geology*, 2003, 193 (3): 195-206.
- [17] Booth C A, Walden J, Neal A, et al. Use of mineral magnetic concentration data as a particle size proxy: a case study using marine, estuarine and fluvial sediments in the Carmarthen Bay area, South Wales, UK[J]. *Science of the total environment*, 2005, 347 (1): 241-253.
- [18] Maher B A, Watkins S, Brunskill G, et al. Sediment provenance in a tropical fluvial and marine context by magnetic 'fingerprinting' of transportable sand fractions[J]. *Sedimentology*, 2009, 56(3): 841-861.
- [19] 罗祎, 苏新, 陈芳, 等. 南海北部 DSH-1C 柱状样晚更新世以来沉积物磁性特征及其环境意义[J]. *现代地质*, 2010, 24(3): 521-527.
- [20] 杨小强, 李华梅, 周永章. 南海南部 NS93-5 孔沉积物磁化率特征及其对全球气候变化的记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22 (1): 31-36.
- [21] Kissel C, Lai C, Clemens S, et al. Magnetic signature of environmental changes in the last 1.2 Myr at ODP Site 1146, South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2003, 201 (1): 119-132.
- [22] 陈忠, 陈翰, 颜文, 等. 南海北部白云凹陷 08CF7 岩心沉积物的磁化率特征及其意义[J]. *现代地质*, 2010, 24 (3): 515-520.
- [23] 张江勇, 高红芳, 彭学超, 等. 南海陆坡晚第四纪沉积物磁化率的对比及其古海洋学意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30 (4): 151-164.
- [24] Liu J, Chen Z, Chen M, et al. Magnetic susceptibility variations and provenance of surface sediments in the South China Sea[J]. *Sedimentary Geology*, 2010, 230 (1): 77-85.

- [25] 吴敏, 李胜荣, 初凤友, 等. 海南岛周边海域表层沉积物中黏土矿物组合及其气候环境意义[J]. 矿物岩石, 2007, 27(2): 101-107.
- [26] 赵建如, 初凤友, 杨克红, 等. 海南岛陆架海域表层沉积物常量元素分布趋势特征[J]. 海洋地质动态, 2009, 25(1): 1-7.
- [27] 高为利, 张富元, 章伟艳, 等. 海南岛周边海域表层沉积物粒度分布特征[J]. 海洋通报, 2009, 28(2): 71-80.
- [28] Maher B A. Characterization of Soils by Mineral Magnetic Measurements [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1986, 42(1): 76-92.
- [29] Freyrier R, Michard A, De lange G, et al. Nd isotopic compositions of Eastern Mediterranean sediments: tracers of the Nile influence during sapropel S1 formation? [J] Marine Geology, 2001, 177(1): 45-62.
- [30] Petersen N, Von Dobeneck T, Vali H. Fossil bacterial magnetite in deep-sea sediments from the South Atlantic Ocean[J]. Nature, 1986, 320: 611-615.
- [31] Chang S-B R, Kirschvink J L. Magnetofossils, the magnetization of sediments, and the evolution of magnetite biomineralization [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1989, 17: 169.
- [32] McNeill D F. Biogenic magnetite from surface Holocene carbonate sediments, Great Bahama Bank[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 1990, 95(B4): 4363-4371.
- [33] Oldfield F. Toward the discrimination of fine-grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 1994, 99(B5): 9045-9050.
- [34] Bloemendal J, King J, Hall F, et al. Rock magnetism of Late Neogene and Pleistocene deep-sea sediments: Relationship to sediment source, diagenetic processes, and sediment lithology[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 1992, 97(B4): 4361-4375.
- [35] Roberts A P, Turner G M. Diagenetic formation of ferrimagnetic iron sulphide minerals in rapidly deposited marine sediments, South Island, New Zealand[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1993, 115(1): 257-273.
- [36] Rowan C J, Roberts A P, Broadbent T. Reductive diagenesis, magnetite dissolution, greigite growth and paleomagnetic smoothing in marine sediments: A new view[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 277(1): 223-235.
- [37] Snowball I F. Magnetic Hysteresis Properties of Greigite ( $Fe_3S_4$ ) and a New Occurrence in Holocene Sediments from Swedish Lapland [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1991, 68(1): 32-40.
- [38] Roberts A P. Magnetic-Properties of Sedimentary Greigite ( $Fe_3S_4$ ) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1995, 134(3): 227-236.
- [39] Maher B A. Environmental magnetism and climate change[J]. Contemporary Physics, 2007, 48(5): 247-274.
- [40] 路凤香, 桑隆康. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [41] Hunt C P, Moskowitz B M, Banerjee S K. Magnetic properties of rocks and minerals[M]. Rock physics & phase relations: a handbook of physical constants, 1995: 189-204.
- [42] 吴汉宁. 岩石的磁性结构及其在岩石变形分析中的应用[J]. 岩石学报, 1988, 2(1): 94-98.
- [43] 郎元强, 胡大千, 刘畅, 等. 南海北部陆区岩石磁化率的矿物学研究[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 573-587.
- [44] 饶志国, 朱照宇, 吴翼, 等. 华南地区发育于不同母岩之上的表土磁化率特征及其意义[J]. 第四纪研究, 2007, 27(4): 651-652.
- [45] 陈丽蓉, 张秀荣. 北部湾沉积物中矿物组合及其分布特征[J]. 海洋学报: 中文版, 1986, 8(3): 340-346.
- [46] Dong L, Su J, Ah Wong L, et al. Seasonal variation and dynamics of the Pearl River plume[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24(16): 1761-1777.
- [47] 陈丽蓉, 徐文强, 申顺喜, 等. 南海北部大陆架和北部湾沉积物中的矿物组合及其分布特征[J]. 海洋科学, 1986, 10(3): 6-10.
- [48] 徐志伟, 汪亚平, 李炎, 等. 多元统计及物源分析支持的北部湾东部海域沉积物输运趋势[J]. 海洋学报, 2010, 32(3): 67-78.
- [49] 襄衍光, 李军, 李炎. 北部湾东部海域表层沉积物稀土元素组成及物源指示意义[J]. 地球化学, 2012, 41(2): 147-157.
- [50] 徐锡禄, 邱章, 陈惠昌. 南海水平环流的概述[D]. 北京: 中国海洋湖沼学会水文气象, 1982.
- [51] 唐志礼, 王有强. 南海北部海域黏土矿物分布特征[J]. 海洋学报: 中文版, 1992, 14(1): 64-72.
- [52] 刘凤树, 于天常. 北部湾环流的初步探讨[J]. 海洋湖沼通报, 1980(1): 9-14.
- [53] 胡建宇, 杨圣云. 北部湾海洋科学论文集[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.

## Spatial Distribution of Magnetic Susceptibility and Its Provenance Implication of Surface Sediments in the Sea Areas around the Hainan Island

TIAN Chengjing<sup>1,2</sup>, OUYANG Tingping<sup>1</sup>, ZHU Zhaoyu<sup>1</sup>, QIU Yan<sup>3</sup>, PENG Xuechao<sup>3</sup>, LI Mingkun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. Guangzhou Bureau of Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China)

**Abstract:** Study of Magnetic properties of marine surface sediments are gradually proved to be one of the effective means for source analysis of marine sediments. In this paper samples from 39 stations in the sea areas around the Hainan Island were collected to analyze the magnetic characteristics of the surface sediments. It is shown that the low frequency magnetic susceptibility and frequency-dependent susceptibility in the areas have significant spatial differential features. The high values are mainly distributed in the southern sea area of the

Hainan Island, while in the eastern and western sea areas the values are gradually decreasing from the coast to sea. The influence factors of magnetic susceptibility analysis shows that the susceptibility of the marine surface sediments in the study area is mainly contributed by terrestrial material, so the spatial distribution characteristics of low frequency magnetic susceptibility and frequency magnetic susceptibility can indicate the diversity of the input of terrestrial material. The studied area can be divided into four parts based on the Q type cluster analysis combined with the geographical location of sampling points. In the sea area to the east of Hainan Island with a water depth over 100 m (Part I) the sediments are mainly from the Pearl River system and to some extent are affected by the terrestrial material carried by the coastal rivers of west Guangdong. In the sea area to the east of Hainan with a water depth less than 100 m and the area to the south of Hainan (Part II) the sediments are mainly from the coastwise eruption and coastwise rivers of the Island; In the northern waters of the Beibu Gulf (Part III) the sediments are from Qiongzhou Strait and coastal rivers around the Gulf; In the sea area to the west of Hainan (Part ) the sediments are from the rivers and coastal erosion in southwestern Hainan and from the materials carried by the ocean currents from south to north. The study shows that the combination of low frequency magnetic susceptibility and frequency dependent susceptibility can effectively indicate the source change in the offshore surface sediment.

**Key words:** marine surface sediments; low frequency magnetic susceptibility; frequency-dependent susceptibility; provenance; waters around the Hainan Island

## 忆启蒙导师侯仁之院士的教诲

中国科学院资深院士、北京大学城市与环境学院教授侯仁之先生于 2013 年 10 月 22 日以 102 岁高龄辞世了。

笔者 1954 年考入北京大学地质地理系时,还是一个对地学一无所知的懵懂青年。侯先生时任地质地理系主任,他循循善诱、言传身教,让我逐渐懂得了如何学习地理学,如何进行科学研究。当时,全系才五、六十个学生,我们 54 级才 20 多人,师生关系非常密切。我又连续 4 年都被选为班长,因此与侯先生接触较多。侯先生虽然身兼多职,工作十分繁忙,但他几乎每周日都带我们一些同学入北京城、上香山、登长城,到昌平,游十三陵,进颐和园、圆明园,教我们如何进行野外考察、开展科学研究、撰写科考报告。使我们这些学子逐渐爱上地理学、爱上野外考察、爱上科学研究。

当时,侯先生已是名满中外的知名学者,他学贯中西,20 世纪 30 年代已是著名学者顾颉刚教授的研究生兼助教;40 年代获英国著名学府利物浦大学理学博士;50 年代初任北京大学副教务长兼地质地理系主任,又是梁思成先生主持的北京市计划委员会委员、《地理学报》编委会主任。但他对待学生毫无大科学家的架子,待人既严又宽。对学生的科学训练十分严格,一丝不苟。他常对我们说:“钟大叩则大鸣”,意即要善于向老师问一些重大问题,从中获得深刻的教益。每到一地,他既详尽介绍基本状况与相关知识,又引导我们思考问题与提出问题。对我们的幼稚与无知,他都十分包容,启发我们边观察边学习。

他是一位极具前瞻性的科学家,上世纪 50 年代初,他已超前提出许多保护生态环境的建议,并严肃批评“有一定历史意义的古代遗迹,在当前北京城市发展中,由于无知而被泯灭的事,已是屡见不鲜”。他又提出“通惠河等于一个人的躯体中输送血液的大动脉”。笔者的河涌治理“通则不淤”的理念(见《热带地理》第 29 卷第 2 期)也是侯先生教导的结果。他十分重视水对城市环境的改善和美化的重大作用。他说:“回顾历史上北京城市建设中河湖水系的开发利用,足以说明北京地理环境中水的要素,对于北京城的发展,至关重要”。他批评把一些小湖填塞和把护城河改为暗渠的做法,认为“这都不利于城市环境的改善和美化”。他严厉批评:“对于水体‘蚕食’的现象不加禁止,是极不利于首都城市的全面发展的”。(均引自《侯仁之院士文集》)。

广州近日召开花城绿城水城建设工作动员大会,要“推进水城计划”(广州日报 2013-10-25 A1 版)。希望能遵从侯先生的科学理念,禁止继续“蚕食”水体(包括江河湖沼),还广州市民一个完整的“水城”。

谨以此文,缅怀恩师,愿先生一路走好!

(李平日)