海南岛白垩纪古地磁结果及其构造地质意义

付璐露,沈忠悦,贺丽,董传万,程晓敢,唐立梅,杨树锋 浙江大学地球科学系,杭州,310027

内容提要:对海南岛地区白垩系鹿母湾组和报万组碎屑岩 219 个独立定向岩芯样品(29 个采点)的岩石磁学和 古地磁学研究表明,白垩纪的碎屑岩以赤铁矿为主要载磁矿物。逐步热退磁分析表明,绝大多数样品可分离出特 征剩磁分量。综合前人的结果,获早白垩世特征剩磁方向 D=6.5°,I=42.7°,κ=73.4,a95=8.2°;晚白垩世特征剩 磁方向 D=6.7°,I=44.7°,κ=125.5,a95=5.4°。其早白垩世古纬度 24.8°(+6.2°/-5.8°),晚白垩世古纬度 26.3° (+4.6°/-4.0°);均位于现在地理位置以北约 5°~6°。与华南板块东南缘白垩纪的古地磁数据对比表明,晚白垩 世海南地块仍是华南板块的一部分。海南岛白沙断裂东西两侧早白垩世古地磁数据的差异,表明存在一个北东向 的构造走滑带,白沙断裂可能是华南沿海北东向构造带的南延部分。海南岛白垩纪古地磁结果也表明,相对印支 地块,海南岛在早白垩世时发生了 25°左右局部顺时针旋转。推测此局部旋转很可能与晚侏罗世一晚白垩世早期, 印度洋开始第一次海底扩张,印度板块向北运动有关。

关键词:海南岛;白垩纪;古地磁;构造意义

中生代是全球板块运动发生重大变革的时期。 印度板块和欧亚板块的碰撞导致了东南亚的构造变 形(Tapponnier et al.,1986;杨振宇等,2001),也使 南海经历了第一次扩张(Briais et al.,1993)。海南 岛位于华南板块的最南部,处于欧亚板块、印度板块 和菲律宾海板块的交界部位,具有复杂的地质构造 演化历史(张业明等,1998;李献华等,2000;夏斌等, 2004,2005);也是联系和理解印支半岛和华南陆块 构造演化的重要地区之一(陈新跃,2002);海南岛又 位于黑河、红河缝合带的东延部分,是了解古特提斯 东延、亚洲东部大陆增生、大陆边缘演化、南海形成 的一个窗口(杨树锋等,1989;Hsu et al.,1990; Metcalfe et al.,1993;陈海泓等,1994),其中晚中生 代的构造位置是海南地块演化的一个重要环节。

海南岛广泛发育了中生代陆相盆地,其中,晚中 生代的碎屑岩能可靠地记录当时地磁场的信息,是 古地磁研究的理想对象。因此,我们在海南岛东北 部的定安盆地、东部的琼海盆地和中部的白沙盆地 等地区选择白垩纪碎屑岩开展古地磁研究,这对了 解海南地块白垩纪运动特征、探讨海南地块与周边 板块相对古地理格局,具有重要的科学意义。

1 地质概况与采样

海南岛中生代盆地发育,其中晚中生代地层发 育完整,岩性以紫红色砂岩为主,其中东北部的定安 盆地、东部的琼海盆地和中部的白沙盆地最为完整, 且地层出露良好,产状稳定,适合古地磁研究。

海南白垩纪地层分上统报万组与下统鹿母湾组 (龙文国等,2000)。下白垩统鹿母湾组岩性主要为 砂砾岩、长石石英砂岩、粉砂岩、泥岩,厚度超过 2600 m(Li et al.,1995)。常夹安山-英安质火山岩, 含孢粉化石。与上覆报万组整合接触,底界砂砾岩 与下伏花岗岩呈侵入接触关系(张小文等,2007)。

上白垩统报万组岩性为紫红色长石砂砾岩夹粉 细砂岩、泥页岩,厚度超过 2295 m。报万组以富含 长石碎屑,不含火山碎屑为主要特征,含植物、孢粉、 轮藻、介形虫、蚁类昆虫等生物化石。报万组矿物成 分变化不大,但粒度变化大(符国祥,1995)。

我们在海南定安盆地、白沙盆地、琼海盆地等地 新开挖的新鲜岩石剖面进行古地磁样品的采集(剖 面分布见图1)。全部样品用便携式采样钻机获取, 野外用磁罗盘定向,GPS测定采样点地理坐标经度 和纬度值。其中文昌、琼海盆地和白沙盆地获得下

注:本文为国家科技攻关"973"项目(编号 2007CB411706-04-1)和国家自然科学基金项目(编号 40274014)资助成果。

收稿日期:2009-04-24;改回日期:2009-08-30;责任编辑:周健。

作者简介:付璐露,女,1985年生。硕士生,构造地质学专业。电话:0571-87935665;Email:3030645001@zju.edu.en。







⑤—Jiusuo-Lingshui fault

白垩统鹿母湾组的定向岩芯样品,定安盆地获得上 白垩统的报万组定向岩芯样品。

每条剖面采样点的分布大致按沉积旋回布设, 每个旋回布设一个采样点,采样岩性一般为中一细 粒砂岩,每个采样点采集4~8个独立定向的岩芯样 品(表1)。除文昌盆地在地表露头采集样品外,其 他均在河床滩边或采石场、公路剖面采取新鲜样品。

2 古地磁结果

2.1 岩石磁学结果

岩石磁学实验主要利用 minispin 旋转磁力仪 和 ASC IM10-30 磁化仪完成样品的等温剩磁曲线 测定。海南白垩纪碎屑岩代表性样品的等温剩磁曲 线表现出如下特征(图 2):①高饱和磁场,在 800mT 以上外加场作用下才逐渐趋于饱和;②较低的饱和 剩磁强度,小于 10 A/m;③高矫顽力,反向充磁显 示样品的矫顽力都大于 400 mT。外加场低于 80 mT时和反向充磁(<-30 mT)的拐点(图 2d),表 明可能存在低矫顽力的携磁矿物。由上述特征可以 看出,白垩系上、下统的碎屑岩中的载磁矿物主要为 赤铁矿,部分样品可能含微量的低矫顽力磁铁矿。

磁化率随温度的变化特征不仅能够揭示样品中 主要载磁矿物的居里温度,有助于判别磁性矿物的 种类,且能够较客观地反映主要磁性矿物在加热过 程中的变化特征。代表性样品的 κ-T 曲线是在南京 大学古地磁实验室的 KLY-3s 卡帕桥上获得的。样 品的 κ-T 曲线可分为两种类型:一种样品的磁化率 随温度的变化表现为不可逆(图 3a,b),表明在加热 700℃后的冷却过程中有新的较高磁化率的矿物生 成。另一是加热曲线与冷却曲线基本可逆(图 3c, d),表明在加热过程中几乎没有新磁性矿物生成;但 总体来说它们的磁化率在 550~600℃之间迅速下 降,到 680℃左右达到最小值,表明磁铁矿和赤铁矿 是样品磁化率的主要贡献者,也表明用热退磁方法 分离特征剩磁是合适的。

2.2 剩磁结果

剩磁测试是在浙江大学古地磁实验室使用 JR-6A 旋转磁力仪进行的。系统热退磁是在 ASC-TD48 热退磁仪上完成的。采用逐步热退磁,退磁间隔为: NRM,100℃,200℃,300℃,360℃,420℃,480℃, 520℃,550℃,560℃,570℃,590℃,620℃,650℃, 660℃,670℃,680℃,共17 步系统退磁测试。样品的 剩磁组分分离均利用主向量法(部分采点用重磁化弧 法拟合)(Kirschvink,1980;McFadden,1990),最后以 采样点为单元进行 Fisher(1953)统计分析。

2.2.1 早白垩世鹿母湾组

鹿母湾组样品采自文昌剖面、琼海剖面和白沙 剖面,共设18个采点。样品天然剩磁强度多数为 10⁻² A/m 数量级。如图4所示,系统热退磁揭示出 该组样品具有1~2组剩磁组分,低温组分多在200

表 1 海南岛采样剖面位置与岩性

			-		-	-		
Tahla 1	The section	locality	and	lithology	for	the	Hainan	Icland
Table 1	The section	locanty	anu	nunology	101	unc	mannan	isianu

剖面县	地 理 位 罟	GPS 坐标	剖面	岩性	抽厚时代	采占数	采样数
наша о	地社世直	610 王怀	нани	111		X	71 1 20
1	文昌县竹浪水库东万头猪场	19.7°N,110.7°E	WC	灰黄色,灰黄一浅红色粉砂岩	$K_1 l$	9	64
0	定安县居丁乡桥下	10 C°N 110 C°D	DA	含砾长石砂岩	V L	8	61
Z	定安县雷鸣镇安仁坡小桥水沟	19.0 N,110.4 E	19.6°N,110.4°E DA 紫红色	紫红色细砂岩	$\mathbf{K}_2 0$	3	29
3	琼海阳江镇文市采石场	19.1°N,110.4°E	QH	紫红色泥岩	$K_1 l$	6	36
4	白沙县白沙盆地北部	19.1°N,109.5°E	BS	紫红色细砂岩	$K_1 l$	3	22
			29	212			

(mA/m)

等温剩磁强度

(mA/m)

等温剩磁强度



图 2 海南岛白垩纪碎屑岩的等温剩磁曲线

Fig. 2 Isothermal remanent magnetization acquisition curves of Cretaceous clastic rocks from Hainan Island

 (a)-文昌剖面浅红色粉砂岩;(b)-琼海剖面紫红色泥岩;(c)-白沙剖面紫红色细砂岩;(d)-定安剖面长石砂岩
 (a)-Light red siltstone from Wenchang section; (b)-purple mudstone from Qionghai section;
 (c)-purple sandstone from Baisha section; (d)-arkose from Ding'an section

~300℃间分离,中温组分少见。于 300℃后出现逐 渐趋向于原点的特征组分。样品多在 650~680℃ 之间解阻。表明该组样品的主要载磁矿物以赤铁矿 为主,与岩石磁学结论一致。以 BS1-1 标本为例, Zijdeveld 正交投影图显示 200℃时有一个转折,560 ~680℃段保持一段稳定的直线方向: D_g =36.6°, I_g =36.5°, α_{95} =2.0°,为特征剩磁方向(图 4f)。

表 2 给出了早白垩世 18 个采点统计的平均方向 及相关参数。其中,采点 WC1、WC2、WC3、WC5、 WC6 五个采点由于倾角都明显偏小(与其他数据相 差过多<15°);且更重要的是,在野外这些采点的地 层产状较乱,在小范围内地层走向明显呈现"S"形弯 曲状态,节理十分发育,另外,这 5 个采点样品的磁组 构显示其沉积组构叠加了明显的构造组构,而其余采 点均显示 K_3 垂直、 K_1 和 K_2 水平的沉积组构。因此, 这 5 个采点未加入统计。对剩下的 13 个采点进行统 计得到,下白垩统样品的特征剩磁方向在地理坐标下 为: $D_g=3.9^\circ$, $I_g=40.0^\circ$, $\alpha_{95}=10.7^\circ$;倾斜校正后, D_s =354.0°, $I_s=35.5^\circ$, $\alpha_{95}=8.1^\circ$,特征分量采点平均方 向的集中程度有较大的提高(精度参数由 16 增加到 27.2),接近于 100%展平时(图 5a)获得的最佳精度 参数,表明通过了 McFadden(1990)褶皱检验。说明 特征分量是岩石发生倾斜之前获得的,可能为原生剩 磁。以海口(20.0°N,110.3°E)为参考点,相应的古地 磁极位置: $\lambda = 84.3$ °N, $\varphi = 17.6$ °, $\alpha_{95} = 7.1$ °;古纬度: 19.6°N。

2.2.2 晚白垩世报万组

报万组样品共设 11 个采点。该组样品天然剩 磁强度多数为 10⁻³ A/m 数量级,代表性样品热退 磁曲线见图 6,系统热退磁揭示具有 2~3 组较稳定 的组分,样品在 680℃或 690℃解阻,部分采点可分 离出特征剩磁,并通过剩磁稳定性检验。以 DA8-11 为例,Zijdeveld 正交投影图可以分辨出明显的 3 段,NRM - 200℃ 有一方向转折,方向为: $D_g =$ 335.3°, $I_g = 17.3°$, $\alpha_{95} = 6.7°$;300~420℃保持一段 稳定的直线段,方向为: $D_g = 51.1°$, $I_g = 64.9°$, $\alpha_{95} =$ 2.6°;480℃ 后为第 3 个直线段,方向为: $D_g =$ 338.2°, $I_g = 49.4°$, $\alpha_{95} = 4.1°$ (图 6b)。



图 3 海南岛白垩纪碎屑岩的磁化率随温度变化(k-T)曲线

(c)-arkose from Ding'an section; (d)-light red siltstone from Wenchang section

图 4 海南岛早白垩世代表样品倾斜校正前 Zijdeveld 正交投影图

Fig. 4 Representative Zijderveld diagrams from Early Cretaceous specimen (in-situ coordinates) from Hainan Island 实心圆和空心圆分别为水平和垂直投影

Solid/open symbols refer to projection on the horizontal/vertical plane

(a) - WC3-7; (b) - QH1-2; (c) - WC4-2; (d) - WC8-3; (e) - QH3-5; (f) - BS1-1; (g) - WC4-6; (h) - BS2-1; (h)

		地理	位置	地层产状		地理公	坐标下	层面体	ě标下		(0)
时代	米点号	纬度(°N)	经度(°E)	倾向(°)/倾角(°)	n/N	D(°)	$I(^{\circ})$	D(°)	$I(^{\circ})$	κ	$\alpha_{95}(^{-})$
	WC1 *	19.7	110.7	220/45	5/5	359.6	43.1	342.9	10.3	120.5	5.7
	WC2 *	19.7	110.7	220/45	3/3	359.2	48.1	341.3	12.7	69.3	9.7
	WC3 *	19.7	110.7	220/45	8/8	8.3	40.8	350.4	11.0	44.3	7.4
	WC5 *	19.7	110.7	200/35	6/6	348.4	28.9	338.8	7.6	164.8	4.4
	WC6 *	19.7	110.7	200/35	13/13	348.0	32.1	336.9	10.3	78.0	4.4
	WC4	19.7	110.7	220/45	4/6	41.8	17.9	25.9	17.7	43.0	10.7
	WC7	19.7	110.7	125/30	7/7	353.3	32.5	331.7	50.9	41.9	6.5
	WC8	19.7	110.7	130/25	5/6	348.7	27.3	335.1	36.5	28.9	11.6
早	WC9	19.7	110.7	185/29	6/6	342.9	47.7	338.2	41.4	32.0	10.1
白亚	QH1	19.1	110.4	265/10	8/8	342.4	41.3	343.9	31.6	108.0	4.8
土世	QH2	19.1	110.4	265/10	10/11	338.9	44.4	341.0	34.7	117.6	4.1
	QH3	19.1	110.4	265/10	6/7	351.9	44.1	352.3	34.1	111.7	5.4
	$\mathbf{Q}\mathbf{H}4$	19.1	110.4	255/11	4/4	354.2	39.0	353.1	28.2	170.9	5.4
	QH5	19.1	110.4	255/11	3/5	357.4	45.7	355.6	35.0	144.4	6.7
	QH6	19.1	110.4	255/15	7/9	346.6	44.4	346.3	29.4	27.3	10.1
	BS1	19.1	109.5	205/33	9/9	38.7	34.3	15.0	35.4	64.8	5.8
	BS2	19.1	109.5	205/33	4/4	32.2	34.5	10.1	31.6	85.0	7.5
	BS3	19.1	109.5	190/30	8/8	29.2	37.5	4.0	41.1	28.2	9.3
			平均方向		13	3.9	40.0	354.0	35.5	27.2	8.1
	DA1 *	19.6	110.4	20/28	6/7	348.3	47.1	18.4	54.8	66.6	7.0
	DA2 *	19.6	110.4	20/28	5/5	355.3	50.7	32.7	53.9	25.8	12.3
	DA3 *	19.6	110.4	20/28	3/4	346.1	43.2	16.5	52.8	49.2	11.5
	DA7 *	19.6	110.4	35/30	4/4	348.8	62.2	33.0	57.8	24.0	14.2
	DA4	19.6	110.4	338/24	4/4	358.9	47.2	17.4	34.9	42.4	10.8
晚	DA5	19.6	110.4	338/24	4/5	335.8	51.0	3.0	46.0	103	6.1
白亚	DA6	19.6	110.4	20/30	3/4	353.8	45.1	22.8	44.3	135.9	6.9
土世	DA8	19.6	110.4	35/30	5/6	351.5	47.2	22.6	43.3	78.5	7.1
	DA9	19.6	110.4	265/29	8/8	18.8	57.7	11.7	31.5	15.0	14.9
	DA10	19.6	110.4	295/10	7/7	12.9	50.5	14.9	40.0	42.1	10.0
	DA11	19.6	110.4	290/18	8/8	356.1	44.7	2.6	28.8	29.5	9.1
			平均方向		7	357.7	49.7	13.4	38.7	75.8	7.0
				51% 展平	·			6.7	44.7	125 5	5 4

表 2 海南岛白垩纪样品的采点间平均结果

Table 2 Cretaceous paleomagnetic results for each site in Hainan Island

注:*采点未加入平均方向统计;n/N-参加统计样品数/实测样品数或采点数;D-磁偏角;I-磁倾角;κ-精度参数;α95-95%置信水平下半 锥角。

图 6 海南岛晚白垩世代表样品倾斜校正前 Zijdeveld 正交投影图

Fig. 6 Representative Zijderveld diagrams from late Cretaceous specimen (in-situ coordinates) from Hainan Island

实心圆和空心圆分别为水平和垂直投影

Solid/open symbols refer to projection on the horizontal/vertical plane

(a) - DA1-1; (b) - DA8-11; (c) - DA10-1; (d) - DA9-11; (e) - DA1-2; (f) - DA11-6

表 3 琼海盆地文市采石场早白垩世鹿母湾组岩脉 与围岩的磁化方向

 Table 3 Magnetization directions for the Early Cretaceous

 Lumuwan Formation sandstone from Wenshi Quarry,

		Ziongina	Dusin		
页上日	地理	位置	层面석	~~~ (°)	
木黒丂	纬度(°N)	经度(°E)	$D(^{\circ})$	$I(^{\circ})$	α95()
QH5-1	19.1	110.4	12.1	52.5	4.2
QH5-2	19.1	110.4	38.0	48.2	5.5
QH5-3	19.1	110.4	350.7	37.5	3.2
Q H5-4	19.1	110.4	4.1	32.3	5.1
QH5-5	19.1	110.4	349.9	31.5	2.3
QH6-1	19.1	110.4	20.9	56.7	4.5
QH6-2	19.1	110.4	3.4	59.1	3.9
QH6-3	19.1	110.4	356.7	36.9	2.9
Q H6-4	19.1	110.4	349.1	37.9	8.5
QH6-5	19.1	110.4	345.9	27.6	3.8
QH6-6	19.1	110.4	314.9	21.3	2.0
QH6-7	19.1	110.4	353.7	17.3	3.4
QH6-8	19.1	110.4	358.3	29.6	1.9
QH6-9	19.1	110.4	348.1	22.6	1.5

Oionghai Basin

表 2 给出了晚白垩世 11 个采点统计的平均方向及相关参数。采点 DA1、DA2、DA3、DA7 的样品的岩性均为粗粒长石石英砂岩,且采样段地层中

出现鱼鳞状的交错层理,致使产状校正困难,暂且舍 去。剩下的7个采点于51%展平时获得最佳精度 参数值(图5b)。 κ 极大值出现51%展平状态,显著 大于0%展平及100%展平时的 κ 值。这一结果表 明晚白垩世剩磁成分极有可能是同褶皱剩磁。海南 白垩纪的盆地大多由东西向和北东向断层控制,断 层和盆地一起活动且当时燕山运动第二幕在海南活 动强烈(汪啸风等,1991)。因此,不难想象晚白垩世 剩磁成分是在同沉积倾斜下获得的。取51%展平 时方向作为晚白垩世特征剩磁方向 $D=6.7^{\circ}, I=$ 44.7°, $\kappa=125.5, \alpha_{95}=5.4^{\circ}(表 2)$ 。以海口(20.0° N,110.3°E)为参考点,相应的古磁极位置: $\lambda =$ 81.2°N, $\varphi=153.3^{\circ}E, \alpha_{95}=5.4^{\circ};$ 古纬度:26.3°N。

3 讨论

3.1 剩磁稳定性检验

3.1.1 热烘烤检验

琼海阳江镇文市采石场的鹿母湾组砂岩中有若 干条 0.1~1.2 m 宽的辉绿岩脉的穿插。对辉绿岩 脉及其邻近的粉砂岩的古地磁研究表明,距离辉绿 岩近处的粉砂岩的剩磁方向较接近于辉绿岩的剩磁 方向(表 3,图 7),远离辉绿岩脉的砂岩与其他采点 的剩磁方向基本一致,表明在辉绿岩侵入时对围岩 产生了烘烤作用。以上说明琼海盆地的鹿母湾组样 品的剩磁方向通过了热烘烤检验。

3.1.2 褶皱检验

早白垩世鹿母湾组的 13 个采样点获得地理坐 标下的平均磁化方向 $D_g = 3.9^\circ$, $I_g = 40.0^\circ$, $\alpha_{95} = 10.7^\circ$; 在层面坐标下 $D_s = 354.0^\circ$, $I_s = 35.5^\circ$, $\alpha_{95} = 8.1^\circ$ (图 8), 它们与现代地磁场方向有明显差异。 其中, $\kappa_s/\kappa_g = 27.2/16 = 1.7 > 1$, 即经倾斜校正后的 精度参数提高了, 表明鹿湾组的剩磁方向在 95%置 信度下通过了褶皱检验。

经过上述烘烤检验以及褶皱展平检验(图 5a,表 4),我们认为早白垩世鹿母湾组的特征剩磁可能为原 生剩磁。

表 4	早白垩世褶皱检验的具体统计学数据
Fahla 4	Statistic data from Farly Cretaceous fold to

%	$D_{\rm s}(^{\circ})$	$I_{\rm s}(^{\circ})$	κ	α ₉₅ (°)
0	3.9	40.0	16.01	10.7
10	2.9	39.8	17.44	10.2
20	1.9	39.5	18.94	9.8
30	0.8	39.1	20.49	9.4
40	359.8	38.7	22.02	9.0
50	358.8	38.3	23.49	8.7
60	357.8	37.8	24.81	8.5
70	356.8	37.3	25.90	8.3
80	355.8	36.7	26.68	8.2
90	354.9	36.1	27.10	8.1
100	354.0	35.5	27.15	8.1

注: D_s 、 I_s 为层面坐标下磁偏角、磁倾角; κ 一精度参数; α_{95} —95%置 信水平下半锥角。

3.2 海南地块早白垩世磁偏角东西两侧的差异

早白垩世古地磁偏角显示,东西两侧的偏角相 向分布(图 9)。白沙断裂东侧的早白垩世的磁偏角 方向都为北西向;而西侧则都为北东向。我们认为, 可能由于北东向的白沙断裂走滑运动,使得邻近的 西侧块体产生了顺时针旋转。

前人对海南岛主要强调了东西向构造带。事实 上,白沙断裂在燕山晚期活动表现为右旋压扭性质 (李孙雄等,2004)。Metcalfe等(1993)曾以白沙断 裂为界,将海南岛划分为东南和西北两大块体;也有 学者认为,海南岛地块可能是由来自印支地块的岛 东南与来自华南地块的岛北西两个地块于晚古生 代一早中生代沿白沙断裂带拼合而成的(葛小月, 2003),并以一系列走向 NE、呈平行状分布、右行走 滑性质在华夏系褶皱带体现(许德如等,2001)。中 生代以来,隶属于新华夏系的白沙构造带发生多次 强烈活动,迁就和复合了华夏系 NE 向构造展布的 格局,使得构造带沿走向表现更醒目(汪啸风等, 1991)。同时,白沙断裂对海南岛白沙盆地下白垩统 鹿母湾组地层具有明显的控制作用。因此,白沙构 造带是划分海南构造单元的一条重要构造带。

沿着海南中部的北东向构造带分布了晚中生代 盆地和岩浆岩。沿北东向构造带两侧断续分布了早 白垩世晚期的中酸性岩体,如:南流洞、什运岩体等, 形成了分布于海南的燕山三、四期花岗岩和喷发岩 带。早白垩世晚期是中国东南部重要的岩浆-构造 活动期,尤其是东南沿海地区广泛发育了一套高钾 钙碱性 I 型花岗岩(李献华等,1997),如福建的福州 岩体、丹阳岩体(Martin et al.,1994)、古农岩体(周 珣若等,1994),浙江的梁弄岩体、龙王堂岩体、山头 郑岩体(陈江峰等,1993)等。可见中国东南沿海晚 白垩世处于 NW 向拉张强烈的构造背景。海南岛 晚中生代盆地主要分布于白沙、雷鸣、阳江、加来、文 昌、昌江老阳地、三亚等,大致呈北东一南西方向展 布,形成于这一统一拉张的构造背景。

图 7 琼海盆地文市采石场早白垩世鹿母湾组砂岩的烘烤检验

Fig. 7 Baked contact test for the Early Cretaceous Lumuwan Formation sandstone from Wenshi Quarry, Qionghai Basin

(a)-QH5 采点;(b)-QH6 采点

(a)—Site QH5;(b)—site QH6

图 8 早白垩世鹿母湾组采点平均剩磁方向的赤平投影图

Fig. 8 Stereographic projection of site mean directions for the Early Cretaceous Lumuwan Formation
 (a)一地理坐标下;(b)一层面坐标下;★一采点的平均方向;N一参加统计采点数;Dg、Ig(Ds、Is)一地理坐标下(层面坐标下)特征
 剩磁偏角、倾角;κ一精度参数;α₉₅—95%置信水平下半锥角;IS、TC一地理坐标下、层面坐标下

(a)—In-situ coordinates; (b)—tilted coordinates; ★—site mean direction; N—number of sites used to calculate the mean direction;
 D_g, I_g(D_s, I_s)—declication and inclination in in-situ coordinates(tilted coordinates); κ—Fisher(1953) precision parameter;
 a₉₅—radius of the 95% confidence circle; IS, TC—in-situ coordinates, tilted coordinates

图 9 海南岛早白垩世磁偏角方向投影图 (箭头表示平均磁倾角方向)

Fig. 9 Early Cretaceous magnetic declination projection in Hainan (arrows showing mean declination)
①—白沙断裂;②—王五-文教断裂;③—昌江-琼海断裂; ④—尖峰-吊罗断裂;⑤—九所-陵水断裂; ①—Baisha fault;②—Wangwu-Wenjiao fault;
③—Changjiang-Qionghai fault;④—Jianfeng-Diaoluo fault; ⑤—Jiusuo-Lingshui fault
□据 Li 等(1995)结果;○据 Liu 等(1999)结果; ○据罗伟新等(1990)结果;☆本文结果
□from Li et al. (1995); ○from Liu et al. (1999);
○from Luo Weixin et al. (1990); ☆from this study

海南的这一北东向构造带向北延伸,可能与东 南沿海的长乐-南澳或丽水-海丰等断裂带融合,形 成了统一的东部沿海地区的重要构造线。

3.3 海南地块白垩纪的构造运动

系统退磁实验表明,海南岛白垩纪碎屑岩的主 要载磁矿物为赤铁矿,可能含有磁铁矿。早白垩世 各采点获得的稳定特征分量通过了 McFadden (1990)褶皱检验,且近于100%展平时获得了最佳 的精度参数,表明特征分量是岩石发生倾斜之前获 得的原生剩磁;晚白垩世采点分离出的稳定特征分 量在51%展平时获得最佳精度,表明存在同褶皱磁 化的现象,我们取同褶皱展平过程中精度参数值最 佳的一组数据。因此我们认为数据是比较可靠的。

我们将前人的海南早白垩世古地磁结果(罗伟新 等, 1990; Li et al., 1995; Liu et al., 1999)以及我们获 得的早白垩世古地磁数据综合(表 5)和晚白垩世古 地磁结果(表 2)相比较,在 95%置信椭圆下有重叠部 分。早白垩世古纬度 24.8°(+6.2°/-5.8°),晚白垩 世古纬度 26.3°(+4.6°/-4.0°),均位于现在地理位 置以北约5°~6°。表明早白垩世到晚白垩世间没有 明显的纬向运动(F=1.5°±7.1°)和旋转运动(R= 0.2°±7.8°)。新近纪时海南地块位于 19.8°№。这 是受印度板块与欧亚板块碰撞的影响,印支地块沿红 河断裂向东南被挤出(Tapponnier et al., 1986),海南 地块也同时受牵引而南向运动。Liu 等(1999)认为沿 着红河大断裂发生的巨大东南向滑移使得海南地块 相对华南地块向东南漂移约 2200 km,而已有的红河 断裂附近的地质资料和白垩纪古地磁研究认为在印 度板块的挤压下,白垩纪后印支地块沿着红河大断裂 向东南方向滑移了1000 km(杨振宇等,1998), 使北部

	Table 5 Mean parconagnetic results of Early Cretaceous in Haman Island												
uk .H	地理位置		N	地理실	坐标下	层面生	坐标下		ana (°)	会老立却			
	地点	纬度(°N)	经度(°E)	1 N	$D(^{\circ})$	$I(^{\circ})$	$D(^{\circ})$	$I(^{\circ})$	κ	U 95 ()	沙 万人叭		
	1	18.9	109.4	6	16.8	39.0	4.3	41.8	51.5	9.4	Li et al. ,1995		
	2	19.1	109.4	11	16.9	37.9	10.9	44.1	71.8	4.2	Liu et al. ,1999		
	3	19.2	109.5	4	29.1	30.2	19.4	47.8	560	3.9	罗伟新等,1990		
	4	19.7	110.7	13	3.9	40.0	354.0	35.5	27.2	8.1	本文		
	4	宗合平均方向	 可	4	17.1	37.1	6.5	42.7	73.4	8.2			

表 5 海南岛早白垩世古地磁结果的平均结果 Table 5 Mean paleomagnetic results of Early Cretaceous in Hainan Island

注:1一海南白沙盆地和三亚地区;2一海南白沙盆地;3一海南白沙盆地;4一海南白沙盆地、琼海盆地和文昌地区。

湾地区形成伸展构造,并引起南海的张开。夹在欧 亚板块、印度-澳大利亚板块和菲律宾板块之间的海 南岛,在印度板块和菲律宾板块的双重作用下,它的 东南向漂移量可能仅有 500~600 km。

有明显的相对纬向运动和旋转运动,表明白垩纪海南 地块是华南板块的一部分;早白垩世印支地块 (Takemoto et al.,2005)相对于海南地块发生了22°~ 26°的顺时针旋转运动和2°~5°的北向漂移;晚白垩世 掸泰地块(Sato et al.,1999)发生了28°~30°的顺时针 旋转运动和1°~6°的北向漂移,这一相对于海南地块

191

Table 6	Cretaceous	paleomagnetic	results from	Hainan a	nd peripherv	block

	地理位置		特	征剩磁方	向		古地磁极		相对于海南	地块的运动	
时代	纬度 经度	N	D	Ι	α 95	纬度	经度	α 95	顺时针旋转	南向漂移	参考文献
	(°N) (°E)		(°)	(°)	(°)	(°N)	(°E)	(°)	(°)	(°)	
海南地块											
K ₂	海口 (20 110.3)	7	6.7	44.7	5.4	81.2	153.3	5.4			本文
K_1	海口 (20 110.3)	34	6.5	42.7	8.2	82.3	160.7	8.0			本文
	Song Da 地块										
K_2	Song Da (21.7 103.9)	13	4.9	32.5	11.4	82.9	220.7	6.9	0.3±6.9	8.9±6.4	Takemoto et al. ,2005
	1			1		掸泰地块					
K_2	云龙 (25.8 99.4)	20	40.2	49.9	3.9	54.6	171.3	4.4	30.4±5.9	-6.6 ± 5.1	Sato et al. ,1999
K_2	云龙 (25.8 99.4)	29	37.2	44.7	4.0	56.7	180.1	4.0	28.9±5.5	-1.3 ± 4.9	Yang et al. , 2001
印支地块											
K_1	Khorat (16.5 103.0)	10	28.1	40.5	2.4	62.7	173.3	2.4	21.6±6.8	-5.2 ± 6.1	Yang et al. ,1993
K_1	Khorat (17.5 103.5)	4	31.7	38.3	5.7	59.9	180.6	5.2	25.5±7.8	-2.3 ± 7.0	Charusiri et al. ,2006
					菲	律宾海板	块				
K_2	Obi (-1.4 127.4)	18	357.1	-21.9	6.4	79.6	323.4	4.9	12.5±5.7	15.1±5.4	Ali et al. ,1995
K_2	Halmahera (1.2 128.3)	1	1.4	-4.0	7.7	86.5	284.7	5.5	6.3±6.1	9.8±5.7	Hall et al. ,1995
K_2	Halmahera (0.4 128.6)	4	358.6	-15.5	5.0	81.6	318.1	3.7	10.7 \pm 5.2	13.8±4.8	Hall et al. ,1995
K_2	广东 (24.1 115.5)	7	8.9	45.8	7.9	80.8	177.7	7.9	2.6±7.7	3.0±7.0	Morinaga et al. ,2004
K_2	香港 (22.3 114.2)	12	21.7	33.6	10.4	69.3	211.2	8.9	14.4±8.1	11.4±7.6	Li et al. ,2005
K ₁	香港 (22.3 114.2)	12	11.5	47.8	8.7	78.2	171.9	10.6	4.9±10.8	-0.5 ± 9.7	Chan, 1991

图 10 海南岛与周边地块的白垩纪磁偏角方向投影图(箭头表示平均磁倾角方向) Fig. 10 Cretaceous declination projection for Hainan and periphery blocks (arrows showing mean declination)

的运动很可能与晚侏罗世一晚白垩世早期印度板块 向北运动(谢建华,2006)使得印支地块的相对南向挤 出(Tapponnier et al., 1986;稽少丞等, 2008),同时印 度洋开始第一次海底扩张有关。相对于海南地块,晚 白垩世时菲律宾海板块发生了 6°~12°的顺时针旋转 运动和 10°~15°的南向位移(Ali et al., 1995; Hall et al., 1995)。现今的 GPS 观测的结果显示菲律宾海板 块仍绕位于其北缘附近的欧拉极相对欧亚在顺时针 转动(Hall et al., 1995), 方向为 306°±1°, 速率为 86.3 ±2.4 mm/a(Yu et al., 1999)。而台湾南部地区和菲 律宾地区呈现向中国大陆方向的移动,沿吕宋弧向 南,各测站的运动存在向西方向的偏转。台湾岛北端 的观测站和大陆附近的观测站一样,相对于欧亚板块 存在向东南向的运动。因此,在海南岛白垩纪碎屑岩 中观察到的6°~12°的逆时针旋转运动,很可能是受菲 律宾海板块向欧亚板块西北向俯冲有关。这与早期 的古地磁资料反映渐新世以来菲律宾海板块向北运 动,以及顺时针方向的构造旋转运动结果是一致的。 而较大的旋转量表明海南地块自白垩纪以来受印度 板块东南向的挤压作用影响较大。

世古纬度 24.8°(+6.2°/-5.8°),晚白垩世古纬度 26.3°(+4.6°/-4.0°),均位于现在地理位置以北约 5°~6°。晚白垩时海南地块仍为华南板块的一部分。 海南岛东西两侧早白垩世古地磁数据的差异,表明 存在一个北东向的构造走滑带,白沙断裂可能与东 南沿海的长乐-南澳、丽水-海丰等断裂带融合,形成 统一的东部沿海地区的重要构造线。海南白垩纪古 地磁结果也表明,相对印支地块,海南岛在白垩纪时 很可能发生了 25°左右局部顺时针旋转。此局部旋 转很可能与晚侏罗世一晚白垩世早期印度洋开始第 一次海底扩张,使得印度板块向北运动有关。而海 南岛晚白垩世相对于菲律宾海板块的 6°~12°的逆 时针旋转运动,很可能是受菲律宾海板块向欧亚板 块西北向俯冲有关。这一较大的旋转量表明海南地 块自白垩纪以来受印度板块东南向的挤压作用影响 较大。

注 释

付璐露,等.2008.海南地块白垩纪以来的古地磁结果及其构造地 质意义.中国地球物理,543.

参考文献

陈海泓,孙枢,李继亮,等.1994.华南早三叠世的古地磁与大地构造. 地质科学,29(1):1~9.

陈新跃. 2002. 海南海西、印支期构造变形及其40 Ar-39 Ar 年代学研

4 结论

对海南白垩系碎屑岩古地磁研究表明,白垩纪 期间,海南地块没有发生明显的纬向漂移。早白垩 究.广州:中国科学院研究生院广州地球化学研究所学位论文.

- 陈江峰, Forland K A, 刘义茂. 1993. 苏州复式花岗岩体的精确⁴⁰ Ar-³⁹ Ar定年. 岩石学报, 9(1): 77~85.
- 符国祥.1995.海南岛中生代红色盆地地层.地层学杂志,19(2):115 ~122.
- 葛小月.2003.海南岛中生代岩浆作用及其构造意义——年代学、地球化学及 Sr-Nd 同位素证据. 广州:中国科学院广州地球化学研究所学位论文.
- 稽少丞,王茜,孙圣思,等. 2008. 亚洲大陆逃逸构造与现今中国地震 活动. 地质学报,82(12): 1644~1667.
- 李献华,周汉文,丁式江,等.2000.海南岛洋中脊型变质基性岩:古特提斯洋壳的残片?科学通报,45(1):84~89.
- 李献华,胡瑞忠,饶冰.1997.粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化 学.地球化学,26(2):15~30.
- 李孙雄,莫位明,云平,等.2004.海南千家地区主要断裂带特征和控 岩控矿作用分析.地质力学学报,10(2):137~145.
- 龙文国,汪迎平.2000.琼西长坡-王五盆地鹿母湾组孢粉化石的发现 及其意义.华南地质与矿产,(4):28~35.
- 罗伟新,陈永.1990.海南岛白垩纪地层及第四纪玄武岩的古地磁研 究.广东地质,5(4):65~72.
- 汪啸风,马大铨,蒋大海.1991.海南岛地质(三)构造地质.北京:地质 出版社,105~119.
- 夏斌,崔学军,谢建华,等.2004.关于南海构造演化动力学机制研究 的一点思考.大地构造与成矿学,28(3):221~227.
- 夏斌,崔学军,张宴华,等.2005.南海扩张的动力因素及其数值模拟 讨论.大地构造与成矿学,29(3):328~333.
- 谢建华.2006. 南海新生代构造演化及其成因数值模拟. 广州:中国科 学院广州地球化学研究所学位论文.
- 许德如,林舸,梁新权,等.2001.海南岛前寒武纪岩石圈演化的记录: 基性岩类岩石地球化学证据.岩石学报,17(4):598~608.
- 杨树峰,虞子治,郭令智,等.1989.海南岛的地体划分、古地磁研究及 其板块构造意义.南京大学学报(地球科学),1(1~2):38~46.
- 杨振宇, Jean Besse, 孙知明, 等. 1998. 印度支那地块第三纪构造滑移 与青藏高原岩石圈构造演化. 地质学报, 72(2): 112~125.
- 杨振宇, Otofuji Y. 2001. 红河断裂两侧早第三纪古地磁研究及其地 质意义. 地质学报, 75(1): 35~44.
- 张小文,覃海灿,傅杨荣.2007.海南定安富文金矿床矿石特征.地球 科学与环境学报,29(1):26~29.
- 张业明,徐安武,付建明,等. 1998. 海南岛几个重大基础地质问题的 探讨. 地质论评,44(6): 568~575.
- 周珣若,吴克隆,严炳锉,等.1994. 漳州 I-A 型花岗岩.北京:地质出版社,1~148.
- Ali J R, Hall R. 1995. Evolution of the boundary between the Philippine Sea Plate and Australia: Palaeomagnetic evidence from eastern Indonesia. Tectonophysics, 251: 251~275.
- Briais A, Patriat P, Tapponier P. 1993. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: Implications for the Tertiaty tectonics of southeast Asia. Journal of Geophysical Research, 98(B4) : 6299~6328.
- Chan L S. 1991. Paleomagnetism of Late Jurassic-Early Cretaceous granites in Hong Kong and tectonic history of South China. J. Geophys. Res., 96: 327~335.

- Charusiri P, Imsamut S, Zhuang Z, Ampaiwan T, Xu X. 2006. Paleomagnetism of the earliest Cretaceous to early Late Cretaceous sandstones, Khorat Group, northeast Thailand: implications for tectonic plate movement of the Indochina block. Gondwana Research, 9: 310~325.
- Fisher R A. 1953. Dispersion of a sphere. Proc. Roy. Soc. London, A217: 295~305.
- Hall R, Ali J R, Anderson C D, Simon J B. 1995. Origin and motion history of the Philippine Sea Plate. Tectonophysics, 251 : 229~ 250.
- Hsu K J, Li Jiliang, Chen Haihong, Wang Qingchen, Sun Shu, Sengor A M C. 1990. Tectonics of South China: Key to understanding West Pacific geology. Tectonophysics, 183 : $9 \sim$ 39.
- Kirschvink J L. 1980. The least-squares line and plane and analysis of paleomagnetic data. Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 62: 699 \sim 718.
- Li Y, Ali J R, Chan L S, Lee C M. 2005. New and revised set of Cretaceous paleomagnetic poles from Hong Kong: implication for the development of southeast China. Journal of Asian Earth Sciences, 24: 481~493.
- Li Z, Metcalfe I, Wang X. 1995. Vertical-axis block rotation in southwestern China since the Cretaceous, new paleomagnetic results from Hainan Island. Geophys. Res. Lett., 22: 3071~ 3074.
- Liu Y, Morinaga H. 1999. Cretaceous palaeomagnetic results from Hainan Island in south China supporting the extrusion model of Southeast Asia. Tectonophysics, 301: 133~144.
- Martin H, Bonin B, Capdevila R, Jahn B M, Lameyre J, Wang Y.
 1994. The Kuiqi Peralkaline granitic complex (SE China): Petrology and geochemistry. J. Petrol., 35: 983~1015.
- McFadden P L. 1990. A new fold test for paleomagnetic studies. Geophys. J. Int., 103: 163~169.
- Metcalfe I, Sherggold I H, Li Z X. 1993. IGCP 321 Gondwana disperrison and Asian accretion: fieldwork on Hainan Island. Episodes, 16: 443~447.
- Morinaga H, Liu Y. 2004. Cretaceous paleomagnetism of the eastern South China Block: establishment of the stable body of SCB. Earth and Planetary Science Letters, 222: 971~988.
- Sato Ken, Liu Yuyan, Zhu Zhicheng, Yang Zhenyu, Otofuji Yoichiro. 1999. Paleomagnetic study of middle Cretaceous rocks from Yunlong, western Yunnan, China: evidence of southward displacement of Indochina. Earth Planet. Sci. Lett., 165: 1~ 15.
- Takemoto K, Halim N, Otofuji Y, Tri T V, De L V, Hada S. 2005. New paleomagnetic constraints on the extrusion of Indochina: Late Cretaceous results from the Song Da terrane, northern Vietnam. Earth and Planetary Science Letters, 229: 273~285.
- Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia. In: Coward M, Ries A, eds. Collosion Tectonics. Geological Society of London Special

Publication, 19: 115~157.

Yang Z, Yin J, Sun Z, Otofuji Y, Sato K. 2001. Discrepant Cretaceous paleomagnetic poles between Eastern China and Indochina: a consequence of the extrusion of Indochina. Tectonophysics, 334: 101~113.

Yu S, Kuo L. 1999. GPS observation of crustal deformation in the Taiwan-Luzon region. Geophys. Res. Lett., 26(7): 3071~ 3074.

Cretaceous Paleomagnetic Results from Hainan Island and Its Tectonic Implications

FU Lulu, SHEN Zhongyue, HE Li, DONG Chuanwan,

CHENG Xiaogan, TANG Limei, YANG Shufeng Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou, 310027

Abstract

Two hundred and nineteen oriented drill-core samples (29 sites) from clastic rocks of Cretaceous Lumuwan and Baowan formations in Hainan Island were collected for analysis of rock magnetism and paloemagnetism. The results show that hematite in the Cretaceous clastic rocks is the main magnetic carrier mineral. Stepwise thermal demagnetiszation experiments indicate that most samples could separate signature remanence component. It is suggested by previous study that the early Cretaceous yielded a direction of $D=6.5^{\circ}$, $I=42.7^{\circ}$, $\kappa=73.4$, $\alpha_{95}=8.2^{\circ}$, and the Late Cretaceous direction of $D=6.7^{\circ}$, I=44.7°, $\kappa = 125.5$, $\alpha_{95} = 5.4^{\circ}$. The paleo-latitudes of the Early Cretaceous [24.8°(+6.2°/-5.8°)], and the Late Cretaceous [26.3°(+4.6°/-4.0°)] are 5°~6° north of the present geographic position. Comparison with the Cretaceous paleomagnetic data from the southeastern margin of South China shows that Hainan Island was part of the South China Block in Late Cretaceous. Difference of Cretaceous paleomagentic data on both sides of the Baisha fault in Hannan Island suggests existence of a northeast-trending structural strike-slipping and it is very likely that the Baisha fault is the southern extension of northeastern-trending structural belt in the coast of South China. The Cretaceous paleomagentic results of Hainan island also indicates that Hainan Island rotated clockwise by about 25 relative to Indo-Chinese Block in Early Cretaceous. It is presumed that the regional rotation was probably related to movement of Indian Plate northwards in Late Jurassic-early Late Cretaceous when the Indian Ocean started the first searfloor spreading.

Key words: Hainan Island; Cretaceous; paleomagnetism; tectonic significance