

张伙带,谈晓冬.海南岛早白垩世红层磁组构和古地磁新结果.地球物理学报,2011,54(12):3246~3257,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.023

Zhang H D, Tan X D. New AMS and paleomagnetic results of Early Cretaceous red beds from Hainan Island. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(12):3246~3257,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.023

海南岛早白垩世红层磁组构和古地磁新结果

张伙带¹,谈晓冬^{2*}

1 广州海洋地质调查局,广州 510760

2 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室,广州 510301

摘 要 海南岛白垩纪红层是迄今产出古地磁结果最多的地层,但古地磁结果难以在海南岛周边古地磁结果和地质限制条件下作出合理解释.为了更好地认识海南岛白垩纪红层古地磁方向的可靠性,我们对采自前人工作地区的 14 个采点 132 个样品开展了古地磁和磁组构的综合研究.磁化率各向异性测试显示 14 个采点样品平均各向异性度为 1.018,线理度为 1.014,面理度为 1.004.各采点磁化率椭球体最小轴显著偏离地层法线,没有反映出沉积或压实特征.野外调查发现采点区域的节理组交线(代表中间应力轴)与磁化率椭球体中间轴一致,意味着采点磁性矿物的排列方位很可能因构造应力影响发生改变.逐步热退磁显示 14 个采点分离出的特征剩磁解阻温度高于 660℃,方向区别于现代地磁场方向;褶皱检验表明在褶皱展平度为 80.4%(95%置信范围内褶皱展平度为 77%±12.2%)时精度参数达最大,对应方向为 $D=359.9^\circ$, $I=43.4^\circ$, $\kappa=70.2$, $\alpha_{95}=4.8^\circ$,与前人的古地磁方向一致.通过与华南地块参考极对比,以及综合分析海南岛围区古地磁和地质限制条件,表明该古地磁方向是不协调的.我们认为前人和本文采样红层剩磁很可能在沉积时获得,但在沉积后受到区域构造应力的影响,致使磁性矿物排列改变,从而导致古地磁方向也发生变化.因此,我们认为这些样品所记录的古地磁方向不能准确反映海南岛白垩纪古纬度.

关键词 海南岛,早白垩世,红层,磁组构,古地磁

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.12.023

中图分类号 P318

收稿日期 2011-10-26,2011-11-11 收修定稿

New AMS and paleomagnetic results of Early Cretaceous red beds from Hainan Island

ZHANG Huo-Dai¹, TAN Xiao-Dong^{2*}

1 Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China

2 Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

Abstract A number of studies have reported the paleomagnetic results of Cretaceous red beds from the Hainan Island, but these results are difficult to accommodate with existing paleomagnetic data and geological observations in the South China Block. In order to solve this discrepancy, we conducted a joint paleomagnetic and magnetic anisotropy study on 14 sites (132 samples) of the Cretaceous red beds. The results of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) show that the degree of anisotropy (the ratio of maximum and minimum axes of AMS ellipsoid,

基金项目 国家重点基础研究发展计划(2007CB411700)资助.

作者简介 张伙带,女,1985年生,广东云浮人,2011年硕士毕业于中国科学院南海海洋研究所,主要从事海洋地质与古地磁学研究.

E-mail: z183514387@126.com

* 通讯作者 谈晓冬, E-mail: xdtan@scsio.ac.cn

k_1/k_3), the degree of lineation (the ratio of maximum and intermediate axes k_1/k_2) and the degree of foliation (the ratio of intermediate and minimum axes k_2/k_3) of the samples is 1.018, 1.014 and 1.004, respectively. The directions of k_3 are not vertical to the bedding planes as it would be expected from normal depositional and compaction processes. Instead, in one site, the directions of k_2 are coincident with the intersection of joint fractures that represents the intermediate stress, suggesting that the distribution pattern of magnetic particles had likely been changed during tectonic strain. Thermal demagnetization shows the unblocking temperature of $> 660\text{ }^\circ\text{C}$. Therefore, the main magnetic particles are hematite, as the same result from previous scholars. The characteristic remanent magnetic (ChRM) direction is distinctive from present geomagnetic direction. At 80.4% unfolding (95% confidence interval is $77\% \pm 12.2\%$), it achieves the maximum value of precision parameter (k), and the mean ChRM direction is $D = 359.9^\circ, I = 43.4^\circ, \kappa = 70.2, \alpha_{95} = 4.8^\circ$. This direction is consistent with results from previous scholars, and thus our samples are representative. However, these results are inconsistent with paleomagnetic data and geological observations from nearby regions in the mainland of the South China Block (SCB). For example, if compare the magnetic paleopole ($83.8^\circ\text{N}, 108.4^\circ\text{E}, \alpha_{95} = 4.7^\circ$) of Hainan Island calculated by our data with the Cretaceous magnetic reference pole of SCB ($80.1^\circ\text{N}, 204.1^\circ\text{E}, \alpha_{95} = 2.5^\circ$), it shows that Hainan Island moved southward by about 6 latitude distance relative to SCB since Cretaceous. However, it's hard to happen because SCB was fixed near the present place and thus Hainan was not likely to locate at the place northern than today by 6 latitude. And geological survey has not found a huge fault that could detach Hainan Island from SCB for such long distance. We interpret the ChRM as being carried by detrital hematite particles but changed during deformation because of tectonic strain-induced particle rearrangement. Therefore, the Cretaceous paleomagnetic direction carried by the red beds is unlikely an accurate record of the Cretaceous paleolatitude for the Hainan Island.

Keywords Hainan Island, Early Cretaceous, Red bed, AMS, Paleomagnetism

1 引言

印度板块与欧亚板块新生代以来的碰撞和挤压强烈地改造了中亚和东亚地区的构造格局,不仅造成了青藏高原的隆升,还使得印支地块沿着红河大断裂向东南方向挤出^[1,2]. 中国最大的边缘海——南海磁异常条带所获得的洋壳扩张年龄与红河断裂带中构造脉岩和构造变质岩的年代学反映的断裂活动时间基本一致,暗示着南海的形成与印度板块和欧亚板块的碰撞可能存在关联^[3,4]. 海南岛位于欧亚板块、印支板块和南海海区的交界处,在大地构造上处于敏感而重要的位置. 用古地磁研究海南岛晚中生代以来的构造位置演化有助于了解欧亚板块与印度板块的相互作用,同时能为南海的形成与演化研究提供围区的古地磁限制条件.

莫宴情和施央申^[5]、杨树锋等^[6]、罗伟新和陈永^[7]、Li 等^[8]、Liu 和 Morinaga^[9],以及付璐露等^[10]

曾对海南岛白垩纪红层(白垩纪红层盆地的分布见图 1)进行过古地磁研究. 莫宴情在晚白垩世定安盆地取得手标本,古地磁结果反映的古纬度为 24°N . 罗伟新在早白垩世白沙盆地取的定向岩芯反映的古纬度为 29.3°N ;在定安盆地取的定向岩芯反映的古纬度为 29.2°N . Li 在白沙盆地和早白垩世三亚盆地取的定向岩芯反映的古纬度为 24°N . Liu 在白沙盆地补充取样,综合 Li 数据反映的古纬度为 25.9°N . 付璐露在定安盆地取的定向岩芯反映的古纬度为 26.3°N .

华南地块白垩纪古地磁结果反映出来的古纬度位置限制着海南岛白垩纪的纬度位置. 华南地块大量白垩纪古地磁结果表明华南地块在白垩纪期间位于现今纬度附近^[11~19]. 广东和广西三叠纪古地磁结果表明广东和广西在三叠纪以来相对华南地块已无明显相对运动^[20,21],说明广东和广西在白垩纪的时候位于现今纬度附近. 虽然广东白垩纪红层古地磁结果显示广东在白垩纪的时候位于比现今纬度低的

地区,白垩纪后发生北向运动^[22~25],但可能是由于红层倾角系统偏低的原因^[26~28].前人得出海南岛在白垩纪位于比现今纬度高 5° 或以上的结论难以与华南地块白垩纪古地磁结果相适应.

并且,古地磁结果需要获得相应地质证据的支持才更具有说服力.前人的海南岛古地磁结果表明海南岛相对华南地块向南漂移了 6° 或以上.但是,这么大规模的相对运动在地质上却找不到相应规模的断裂带.所以,本文希望能够对海南岛白垩纪红层重新进行古地磁研究,并通过磁化率各向异性 (Anisotropy of Magnetic Susceptibility, AMS) 测试来检验古地磁结果的可靠性.

2 地质背景与采样

海南岛白垩纪地层分布较广,有大小盆地 10 余个,总面积达 3250 km^2 ,沉积总厚度大于 2650 km^2 ^[29].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出露情况较好,产状较稳定.本文采样地点为白沙盆地,在白沙县牙叉镇南叉河河床、白沙一邦溪公路边和南开乡共 14 个采点钻取古地磁岩芯 132 块.采点地理位置和地质背景见图 1.各个采点的具体采样情况见表 1.野外观察到海南岛白沙盆地岩性主要为暗红色粉砂质泥岩、紫红色粉砂岩.野外调查发现,有 3 个采点发育节理,1 个采点发育劈理.汪啸风等^[29]在白沙盆地鹿母湾群中上部发现了丰富的介形类和轮藻化石,确定年代为早白垩世.

3 实验和数据处理方法

先将野外取回来的 132 块岩芯切割成 2.5 (直径) $\text{cm} \times 2.2$ (长) cm 的圆柱状古地磁标准样品,每一块岩芯能切割成 $1 \sim 3$ 个样品,然后挑选样品进行 AMS 测试和逐步热退磁实验. AMS 测试在中国科

学院广州地球化学研究所环境磁学实验室的 MFK1 V4.0 卡巴桥磁化率仪上进行;测试时设置频率 f_1 (976 Hz),外加磁场峰值为 400 A/m ,在此频率和磁场下仪器的灵敏度为 2×10^{-8} .逐步热退磁实验在中国科学院南海海洋研究所古地磁实验室屏蔽房 (残余磁场小于 300 nT) 进行,在 Schonstedt TSD-1 型退磁炉上加热退磁,逐步热退磁温度间隔设置为: NRM, 100, 150, 200, 250, 350, 450, 500, 550, 580, 600, 620, 640, 650, 660, 670, 680, 690°C .在每一个温度点保持恒温加热 40 min ,加热后在热退磁炉的冷却区域内冷却至室温.冷却后的样品放置在铂钨合金磁屏蔽筒内待剩磁测试.剩磁测试在 2 G 三轴低温超导磁力仪进行.热退磁炉内腔放置样品区域和冷却区域的磁场强度均小于 10 nT .铂钨合金磁屏

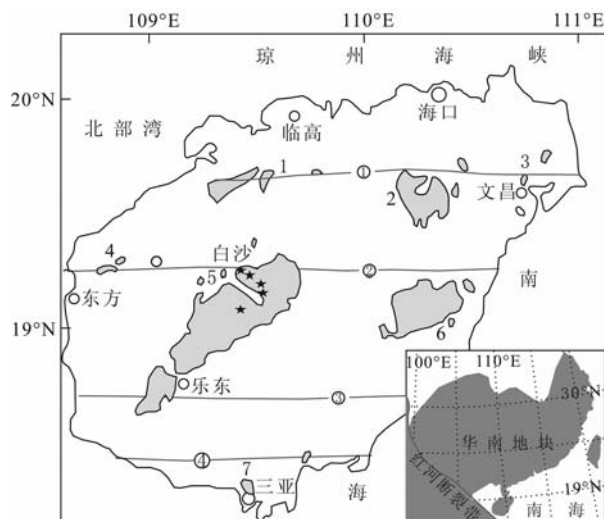


图 1 海南岛区域地质背景及采样地点

灰色区域为白垩纪盆地;1 长坡—东江盆地;2 定安盆地;3 文昌盆地;4 老羊地盆地;5 白沙盆地;6 琼海盆地;7 三亚盆地.红色线为断裂带:①王五一文教断裂;②昌江—琼海断裂;③尖峰—吊罗断裂;④九所—陵水断裂;黑色五角星为采样地点.

Fig. 1 Simplified geologic map of the Hainan Island showing the east-west trending faults, the Cretaceous sedimentary basins (gray area), and our sampling localities

表 1 海南岛早白垩世地层采样位置与采样统计

Table 1 A list of sampling localities and numbers of individual cores of the Early Cretaceous red beds from Hainan

地理位置	GPS 坐标	采点序号	岩芯序号	岩芯数量
白沙县牙叉镇南叉河河床	$19^{\circ}14' \text{ N}, 109^{\circ}27' \text{ E}$	采点 1~2	HN001~HN021	21
白沙一邦溪公路边	$19^{\circ}14' \text{ N}, 109^{\circ}26' \text{ E}$	采点 3~5	HN022~HN043	21
南开乡	$19^{\circ}05' \text{ N}, 109^{\circ}25' \text{ E}$	采点 6~11	HN044~HN107	64
白沙农场公路边	$19^{\circ}12' \text{ N}, 109^{\circ}29' \text{ E}$	采点 12~14	HN108~HN133	26
总计	—	14 个采点	—	132

注:各采点的地层产状数据见表 3.

藏筒内部磁场强度一般低于 5 nT。2 G 三轴低温超导磁力仪灵敏度比较高,可达 $10^{-12} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 。热退磁数据用 Enkin 的 PMGSC42 软件进行主成分分析^[30]和 Fisher 统计^[31]。

4 实验结果与分析

4.1 AMS 测试结果与分析

磁化率各向异性结果显示海南岛早白垩世红层样品的磁化率值较大,基本在 10^{-4} 数量级,只有极少数样品在 10^{-5} 数量级。14 个采点样品的磁组构均显示有占优势的方向,三个主轴方向分别集中。各采点样品平均的各向异性度、线理度和面理度见表 2;所有采点样品平均各向异性度为 1.018,线理度为 1.014,面理度为 1.004,且磁化率椭球体最小轴显

著偏离地层法线,见图 2。相比于正常磁组构,AMS 结果的特征是 P 显著减小, k_1 相对集中在 NE—SW 至 NEE—SWW 方向, k_2 和 k_3 多呈带状分布(图 2d 除外)。一般认为磁组构能反映岩石所经历的应力特征^[32~34],但取决于应变的规模,在弥散性应变状况下,磁组构才能较好地反映应变特征^[35]。沉积岩磁化率最小轴垂直层面反映出岩石在形成过程中受到了沉积和压实作用,常用于排除样品磁性矿物受到其他应力作用的干扰;而沉积岩磁化率最小轴不垂直地层,暗示了样品磁性矿物很可能受到其他应力作用的干扰^[36,37]。本文在野外采样时对节理、劈理进行了调查记录,在室内将节理、劈理产状投影到 AMS 等面积投影图上与 AMS 三轴方向比较,发现采点 1 的节理组交线(反映了中间应力方位)刚好与 AMS 中间轴重合,见图 3a。这反映了采点 1 样品的

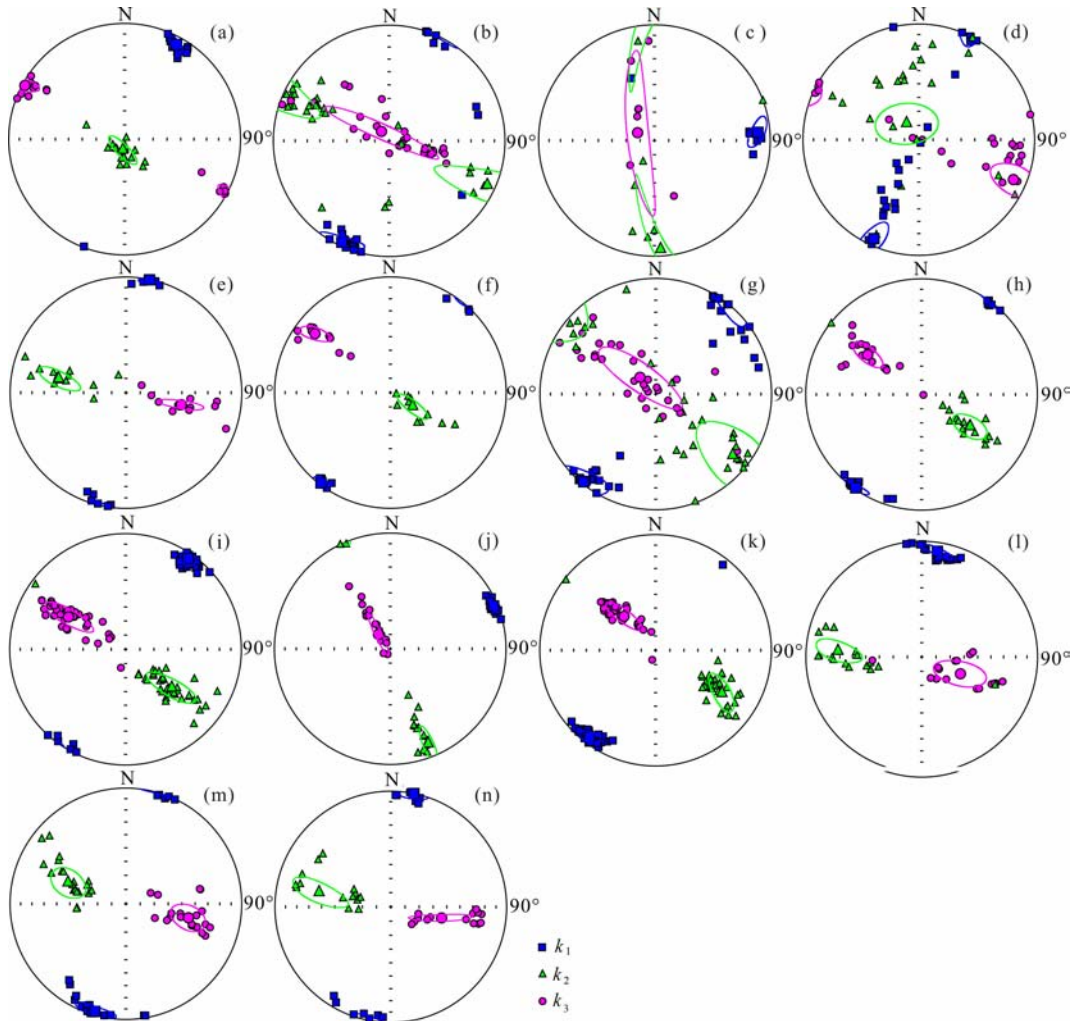


图 2 海南岛早白垩世红层各采点样品 AMS 三轴等面积投影图(地层坐标系下)
图中所有投影点均为下半球投影; k_1 为最大轴; k_2 为中间轴; k_3 为最小轴;围绕平均方向的
闭合线为 95%置信椭圆;(a)~(n) 分别代表采点 1~采点 14。

Fig. 2 Equal-area projections for the maximum (k_1 , square), intermediate (k_2 , triangle) and minimum (k_3 , circle) axis of AMS ellipsoids from each site of the Early Cretaceous red beds (all in the bedding coordinates)

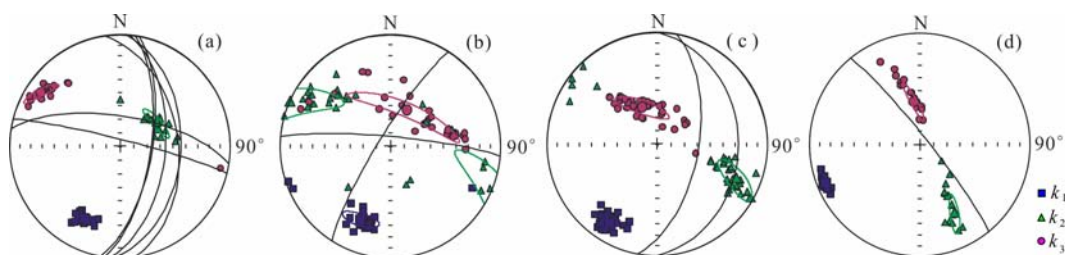


图 3 海南岛早白垩世红层节劈理与 AMS 三轴投影图比较(地理坐标系下)

(a) 采点 1; (b) 采点 2; (c) 采点 9; (d) 采点 10. (d) 图圆弧为劈理产状; 其他图圆弧为节理组产状.

Fig. 3 Equal-area projections of conjugate joints and cleavages measured at the sampling sites (Geographic coordinates)

表 2 海南岛早白垩世红层 14 个采点磁组构三轴统计

Table 2 Statistic results of the site mean AMS parameters of the Early Cretaceous red beds

采点	N	P	F	L	最大轴		中间轴		最小轴		
					M	D(°)/I(°)	M	D(°)/I(°)	M	D(°)/I(°)	α_{95} (°)
采点 1	18	1.033	1.012	1.021	1.018	206.0/28.4	0.997	57.7/57.6	0.985	304.0/14.3	13.6/2.6
采点 2	31	1.023	1.003	1.019	1.014	202.4/29.4	0.995	292.9/1.0	0.991	24.7/60.5	44.7/5.3
采点 3	7	1.017	1.003	1.014	1.010	110.8/18.0	0.997	328.3/67.8	0.993	205.0/12.7	61.0/7.6
采点 4	22	1.015	1.004	1.011	1.009	207.7/41.1	0.998	358.4/45.0	0.994	104.0/15.1	20.9/7.9
采点 5	14	1.012	1.004	1.008	1.007	196.7/27.7	0.999	296.6/18.1	0.995	55.6/56.0	17.3/2.7
采点 6	10	1.017	1.005	1.012	1.010	216.4/19.9	0.998	89.1/59.1	0.993	315.1/22.6	14.0/3.5
采点 7	30	1.016	1.005	1.011	1.009	217.9/20.3	0.998	124.9/8.2	0.993	14.1/68.0	36.0/9.2
采点 8	18	1.016	1.003	1.013	1.009	213.7/19.2	0.997	108.3/37.2	0.994	325.2/46.5	13.2/4.6
采点 9	37	1.024	1.01	1.014	1.013	211.7/18.5	0.998	113.8/22.4	0.989	337.5/60.3	21.0/4.8
采点 10	16	1.029	1.011	1.018	1.016	248.2/8.3	0.998	153.2/30.5	0.987	351.8/58.1	16.5/2.3
采点 11	34	1.022	1.011	1.011	1.011	213.2/16.2	1.000	119.7/11.7	0.989	355.4/69.8	16.3/4.3
采点 12	16	1.026	1.009	1.017	1.014	186.4/19.8	0.997	297.0/44.3	0.988	79.4/39.1	19.6/8.3
采点 13	20	1.041	1.015	1.026	1.022	190.9/25.2	0.996	324.7/55.8	0.982	90.2/21.5	14.1/7.9
采点 14	14	1.045	1.017	1.028	1.024	186.8/22.0	0.996	311.7/54.8	0.98	85.4/26.0	23.7/2.2

注: N 为样品个数; P 为各向异性度 ($P=k_1/k_3$); F 为面理度 ($F=k_2/k_3$); L 为线理度 ($L=k_1/k_2$); M 为规一化强度; D 和 I 分别为地理坐标系下偏角和倾角; α_{95} 为置信椭圆长轴/短轴; 统计方法为 Anisoft 软件上的 Jelinek statistics 方法^[38].

磁性矿物空间分布形式是区域构造应力作用的结果. 采点 1 磁化率最小轴显著偏离地层法线, 所以, 磁化率最小轴不垂直地层的 14 个采点没有显示沉积或者压实组构特征, 很可能都受到了区域构造应力的干扰.

4.2 逐步热退磁结果与分析

前人的研究工作表明海南岛早白垩世红层主要携磁矿物为赤铁矿^[5~10]. 本文海南岛早白垩世 132 个样品天然剩磁 (Natural Remanent Magnetism, NRM) 较大, 范围在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ A/m 内. 132 个样品均能分离出剩磁分量, 25 个样品只分离出高温剩磁分量, 如图 4c, 其余 107 个样品分离出中温剩磁分量和高温剩磁分量, 但中温剩磁分量对天然剩磁的贡献量比高温剩磁分量的贡献量要大得多, 大多

数样品强度退掉 80% 以后, 才出现指向 Z 氏图坐标原点的分量, 如图 4a. 多数样品中温剩磁分量解阻温度 $> 600^\circ\text{C}$, 如图 4b, 但不通过 Z 氏投影图的坐标原点. 高温剩磁分量解阻温度不低于 660°C , 均通过 Z 氏投影图的坐标原点, 如图 4j.

14 个采点均能分离出高温剩磁分量, 在地理和地层坐标系下的平均方向见图 5 和表 3. 地理坐标系下的方向区别于现代地磁场方向 ($D=358.6^\circ$, $I=26.1^\circ$), 见图 5. 褶皱展平分析^[39] 方法表明褶皱展平度为 80.4% 时精度参数达到最大, 见图 7a, 对应方向为 $D=359.9^\circ$, $I=43.4^\circ$, $\kappa=70.2$, $\alpha_{95}=4.8^\circ$. DC 褶皱检验方法^[40] 表明达到最大精度参数的褶皱展平度为 $82.3\% \pm 32\%$, 见图 7b. 模拟褶皱检验方法^[39] 表明在 95% 的置信范围内, 达到最大精

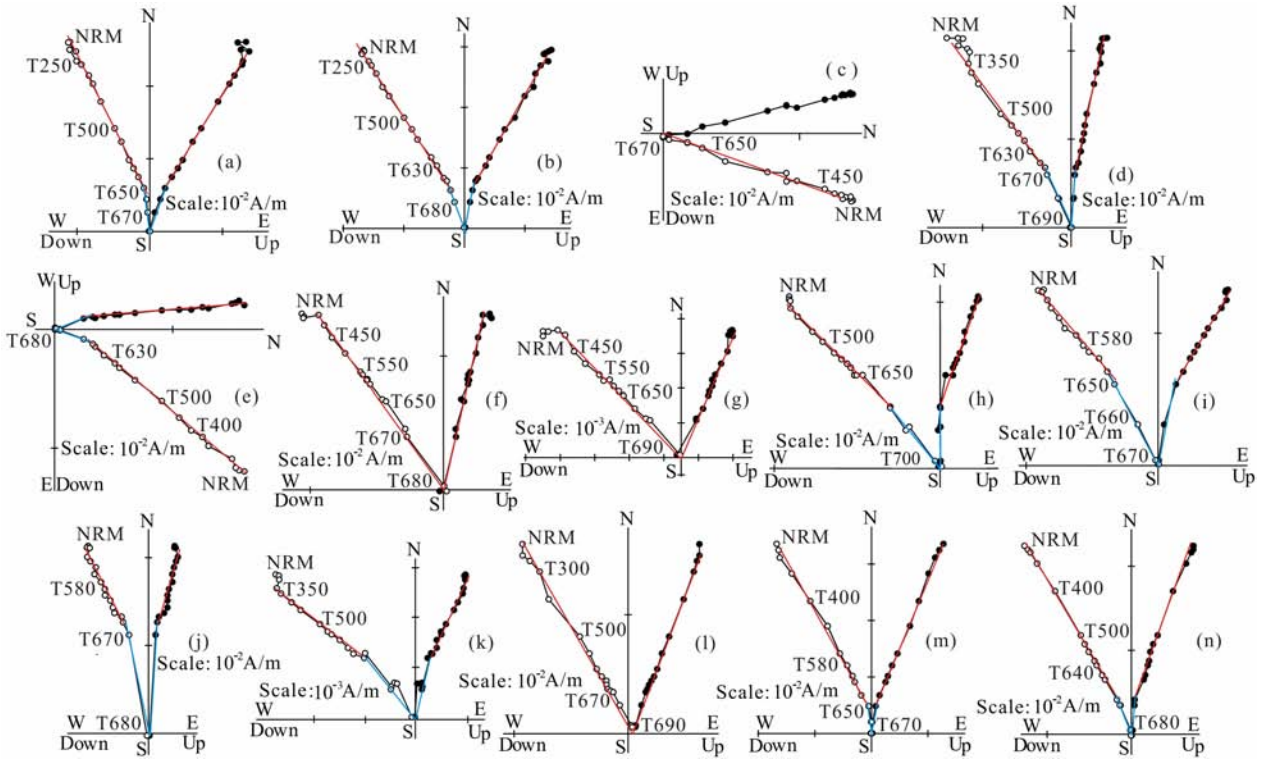


图 4 海南岛早白垩世红层 14 个采点典型样品热退磁 Z 氏投影图

(a)~(n) 分别代表采点 1~采点 14;图中实心圆和空心圆分别代表剩磁方向在水平面和铅直面上的投影(地理坐标系下);蓝色为高温特征剩磁,红色为中温剩磁;T 为热退磁温度.

Fig. 4 Zijderveld diagrams of thermal demagnetization of typical samples from each site of the red beds

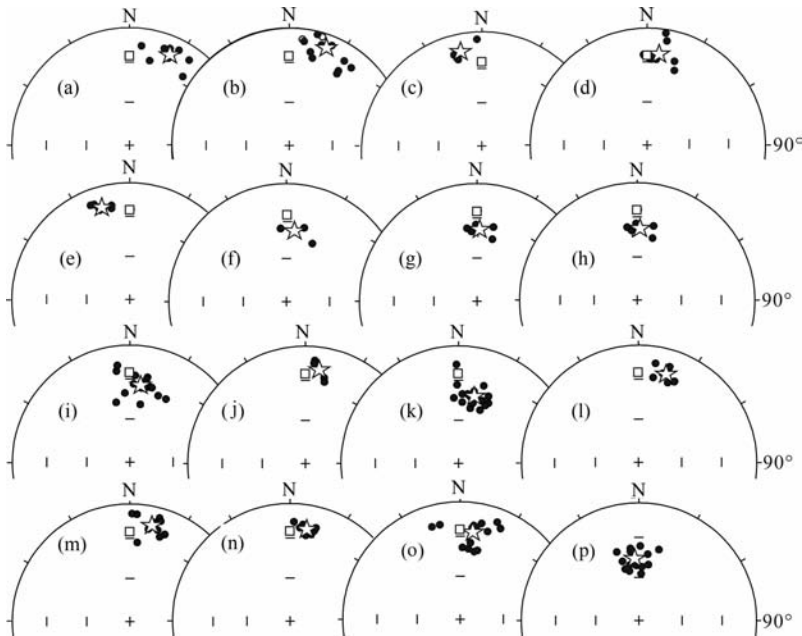


图 5 海南岛各采点高温特征剩磁分量等面积赤平投影图

投影点均为下半球投影;(a)~(n)代表采点 1~采点 14 方向在地理坐标系下的投影;(o)和(p)分别代表 14 个采点平均方向在地理坐标系下和地层坐标系下的投影;五角星为平均方向;方块为现代地磁场方向.

Fig. 5 Equal-area projections of HT component directions isolated from each site of the red beds

度参数的褶皱展平度为 $77\% \pm 12.2\%$, 见图 7c. 所以, 严格意义上说, 海南岛红层 14 个采点的高温特

征剩磁分量并没有通过褶皱检验, 而是在 80.4% 左右集中程度最大.

其中 12 个采点能分离出中温剩磁,在地理和地层坐标系下的平均方向见图 6 和表 3.地理坐标系下的方向也区别于现代地磁场方向,见图 6.褶皱检

验表明褶皱展平度为 60.7%时精度参数达到最大,对应方向为 $D=15.3^\circ$, $I=49^\circ$, $\kappa=150.4$, $\alpha_{95}=3.6^\circ$.

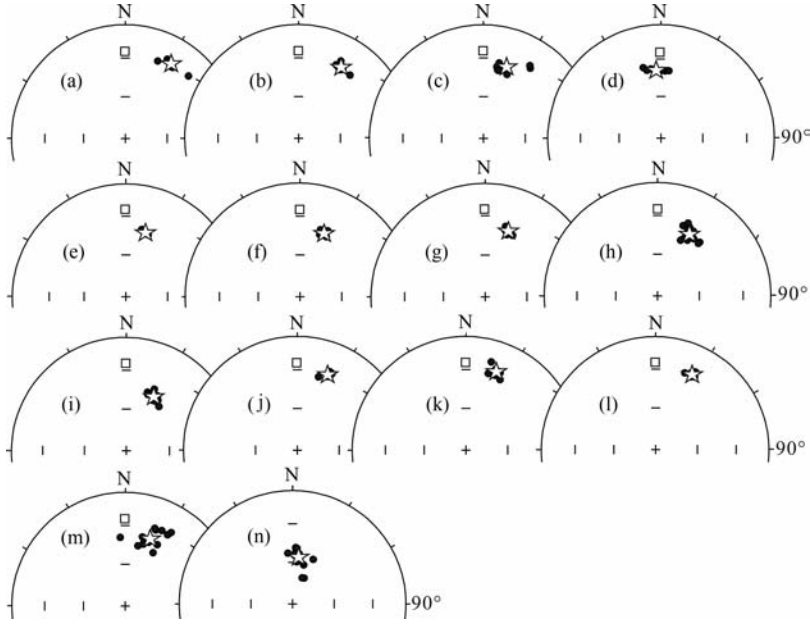


图 6 海南岛各采点中温特征剩磁分量等面积赤平投影图

投影点均为下半球投影;(a)~(l)为各个采点在地理坐标系下的投影;(m)和(n)为 12 个采点分别在地理坐标系下和地层坐标系下的投影;五角星为平均方向;方块为现代地磁场方向.

Fig. 6 Equal-area projections of IT component directions isolated from 12 sites of the red beds

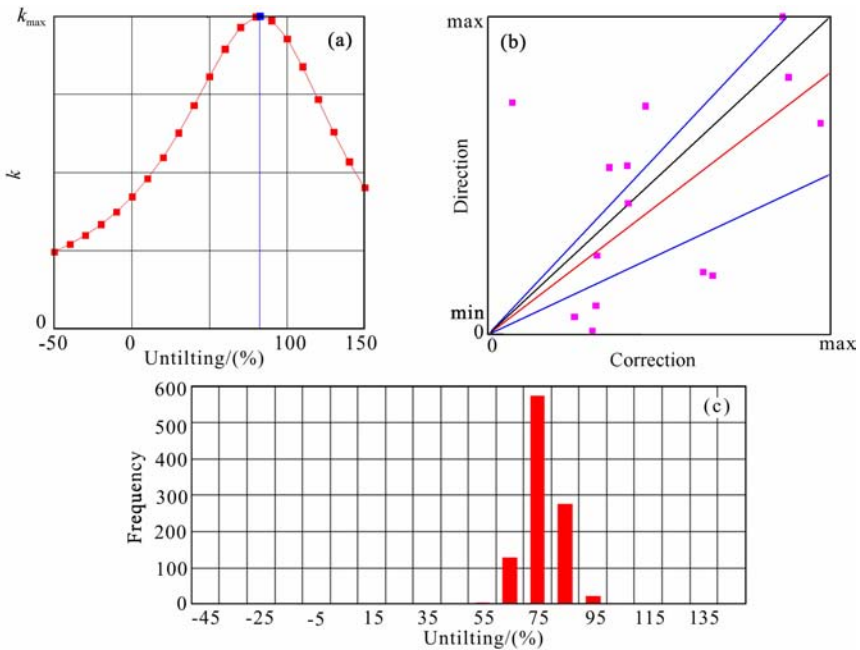


图 7 海南岛 14 个采点高温特征剩磁褶皱检验

(a)为褶皱展平分析方法^[39];(b)为统计意义上的 DC 斜率褶皱检验方法^[40];

(c)为统计意义上的模拟褶皱检验方法^[39].

Fig. 7 Fold test results of HT component isolated from 14 sites of the red beds

表 3 海南岛早白垩世红层各采点剩磁分量统计

Table 3 Statistic results of remanent components isolated from each site of the red beds

剩磁类型	采点	地层产状		n/N	地理坐标下		地层坐标下		κ	$\alpha_{95}/(^{\circ})$	
		D/($^{\circ}$)	I/($^{\circ}$)		D _g /($^{\circ}$)	I _g /($^{\circ}$)	D _s /($^{\circ}$)	I _s /($^{\circ}$)			
高温剩磁	采点 1	229	39	9/9	24	16.7	9.6	50.3	50.3	7.3	
	采点 2	222	27	12/12	20.9	12.7	15.8	37.6	26.8	8.5	
	采点 3	166	36	5/5	347.8	19	349	54.9	109.9	7.3	
	采点 4	194	35	9/9	7.4	22.8	2.7	57.5	48.9	7.4	
	采点 5	159	34	7/7	342.9	19	345.1	52.9	243.1	3.9	
	采点 6	234	19	5/5	6.6	39.6	350.7	50.6	65.6	9.5	
	采点 7	240.3	20	13/13	14	39.6	357.2	51.4	115.6	3.9	
	采点 8	240.3	20	9/9	1.7	38.9	344.4	46.8	168.2	4	
	采点 9	258	33	16/16	7.5	34.8	342	38.9	43.1	5.7	
	采点 10	191	22	5/5	8.3	20.7	7.6	42.7	103.3	7.6	
	采点 11	279	22	16/16	11.6	41	353.2	38.4	52.8	5.1	
	采点 12	222	34	8/8	8.7	38.5	0.5	53.7	66	6.9	
	采点 13	236	29	10/10	12.6	17.6	1	36.9	60.6	6.3	
	采点 14	237	33	8/8	9.9	21.5	353	40.7	212.4	3.8	
	所有采点平均			14/14	8.1	26.6	—	—	31.4	7.2	
					—	—	356.9	47	64.4	5	
中温剩磁	采点 1	229	39	8/9	32	25	16	60.9	174.4	4.2	
	采点 2	222	27	11/12	30.8	28.2	24.9	54.5	625.3	1.8	
	采点 4	194	35	9/9	18.3	35	24.2	69.8	75.7	6	
	采点 5	159	34	7/7	355.8	39.6	20.1	70.2	165.1	4.7	
	采点 6	234	19	3/5	17.3	40.9	2.5	54.8	727.8	4.6	
	采点 7	240.3	20	4/13	20.3	40.2	4.1	53.8	486.1	4.2	
	采点 8	240.3	20	8/9	19	39.4	3.1	52.6	932.5	1.8	
	采点 9	258	33	15/16	27.6	39.3	354.6	53.1	201.1	2.7	
	采点 11	279	22	11/16	27.6	46.3	3.2	48.9	355.9	2.4	
	采点 12	222	34	5/8	21.9	29	5.8	59.5	372.9	4	
	采点 13	236	29	8/10	20.9	27.9	4.6	49.4	297.9	3.2	
	采点 14	237	33	8/8	25.9	27.4	7.2	53.1	927.6	1.8	
		所有采点平均			12/14	21.8	35.2	—	—	61.6	5.6
						—	—	8	57	87.1	4.7

注: n 为可靠样品数; N 为参加退磁样品数; D 和 I 分别为地层产状的倾向和倾角; D_g 和 I_g 分别为地理坐标系下磁偏角和磁倾角; D_s 和 I_s 分别为地层坐标系下磁偏角和磁倾角; κ 为 Fisher 统计精度参数; α_{95} 为 95% 置信圆锥半顶角。

5 讨论

本文观察到的磁组构显示三轴椭球体且以线理最明显, 似乎反映了水流作用的结果. 对于赤铁矿颗粒而言, 沉积作用使得扁平面总体上平行于水平面, 从而使最小磁化率轴垂直层面. 在水流作用下, 赤铁矿颗粒会呈叠瓦状排列, 表现为样品磁化率椭球体

三个主轴方向分明, 最大轴和中间轴分布在水平面且中间轴与水流方位一致(这里请注意: 对于含磁铁矿颗粒的沉积物, 受水动力强度的影响, 可以是最大轴或者中间轴方位与水流方位一致), 而最小轴略微偏离地层法线或者以地层法线为中心向水流方位发生一定程度的离散(由叠瓦状交错排列的几何形态决定). 显然, 这和我们观察到的磁组构最小轴显著偏离地层法线的特征不同, 结合在一个采点观察到

的磁组构中间轴和中间应力轴的一致性,可以排除磁组构主要反映水流作用的可能性.或许我们的样品在沉积过程中曾经受到过水流的作用,但是已经被构造应变所改变了.

以 $19.1^{\circ}\text{N}, 109.2^{\circ}\text{E}$ 为参考点,利用 14 个采点高温特征剩磁在褶皱展平到最大精度参数时对应的方向计算出海南岛在早白垩世的古纬度 25.3°N ,古地磁极位置为 $83.8^{\circ}\text{N}, 108.4^{\circ}\text{E}$, $\alpha_{95} = 4.7^{\circ}$. 这与前人获得的古纬度和古地磁极位置相近,见图 8 和表 4. 高温特征剩磁在 80.4% 集中程度最大,可能原因之一是发生了同褶皱重磁化,但在本文研究区及附近并没有找到热侵入等导致同褶皱重磁化发生的证据;可能原因之二是剩磁是沉积时的剩磁,但是沉积后被构造应力改造,使磁性矿物颗粒排列方式发生改变,导致古地磁方向发生变化. 无论是何种原因,本研究区早白垩世红层古地磁记录都难以真实地反映早白垩世时的原生剩磁方向,因此据此数据计算出来的海南岛在白垩纪的古纬度可能不准确. 由于前人古地磁结果非常接近本文结果,也没有通过严格意义上的褶皱检验(付璐露数据除外),本文认为,前人的古地磁结果也难以准确反映本研究区在早白垩世时的古地磁方向,因此用该数据来计算海南在白垩纪的古纬度是值得怀疑的.

以上是对海南岛白垩纪古地磁方向本身的可靠性进行了讨论,下面根据海南岛围区的地质和古地磁限制讨论海南岛白垩纪红层古地磁方向的可靠性. 假设前人和本文研究区红层记录的古地磁方向是早白垩世原生的沉积剩磁方向,没有受到构造扰动,并采用华南地块白垩纪参考极位置 $80.1^{\circ}\text{N}, 204.1^{\circ}\text{E}$, $\alpha_{95} = 2.5^{\circ}$ ^[19], 计算出海南岛自白垩纪以来相对华南地块的运动,结果如表 4 所示,表明海南岛相对华南地块自白垩纪以来向南漂移了 6° 左右. 这一古地磁结果是难以成立的,因为在海南岛与华南

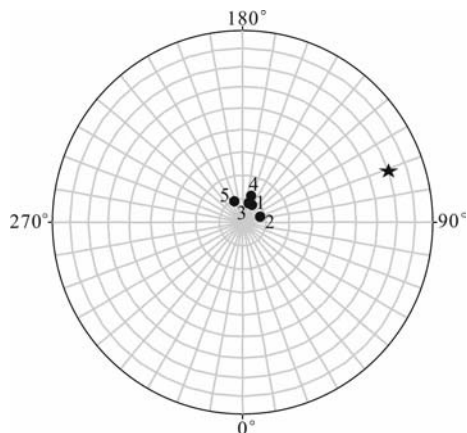


图 8 海南岛白垩纪古磁极

1 来自付璐露等^[10], 年代为 K_2 ; 2 为本文 14 个采点统计出来的古磁极, 年代为 K_1 ; 3 来自 Li 等^[8], 年代为 K_1 ; 4 来自 Liu 等^[9], 年代为 K_1 ; 5 为华南地块参考极^[19], 五角星为海南位置.

Fig. 8 Stereonet projection of the Cretaceous paleomagnetic poles from the Hainan Island

地块之间找不到一条大断裂带使它们之间能错动如此大的距离.

海南岛周边最大规模的断裂带为红河断裂带, 虽然红河断裂带入海后如何延伸尚存在争议, 但是共同认为红河断裂带入海的延伸是在海南岛的西南边^[41~45], 见图 9. 所以海南岛不可能沿红河断裂带相对华南地块错动. Liu 等试图推断出使得海南岛相对华南地块大规模错动的断裂带所在位置. Liu 通过比较广西、海南岛白垩纪古地磁结果与他们统计出来的华南地块白垩纪参考极位置 $74^{\circ}\text{N}, 223.3^{\circ}\text{E}$, $\alpha_{95} = 5.3^{\circ}$, 认为广西相对华南地块自早白垩世以来向南漂移了 $7.8^{\circ} \pm 6.9^{\circ}$, 海南岛相对华南地块自早白垩世以来向南漂移了 $14.1^{\circ} \pm 5.5^{\circ}$, 因此认为在华南大陆上存在平行于红河断裂带的断裂带, 广西和海南位于这条断裂带与红河断裂带之间, 见图 9; 并认为这条断裂带使得印支地块沿红河断裂带向东南挤出的时候, 海南、广西也被牵引着沿这条断裂带

表 4 海南岛白垩纪红层古地磁结果对比

Table 4 List of paleomagnetic results isolated from the Cretaceous red beds of the Hainan Island

研究者	研究对象	年代	采点数	剩磁方向			古纬度 ($^{\circ}\text{N}$)	古磁极		相对华南地块运动	
				展平度/(%)	$D(^{\circ})/I(^{\circ})$	$\alpha_{95}/(^{\circ})$		($^{\circ}\text{N}$)/($^{\circ}\text{E}$)	$\alpha_{95}/(^{\circ})$	旋转/($^{\circ}$)	漂移/($^{\circ}$)
Li 等 ^[8]	白沙盆地	K_1	6	72.8	7.9/41.7	8.0	24.0	81.1/163.8	7.7	-2.5 ± 6.5	-6.1 ± 5.9
Liu 等 ^[9]	白沙盆地	K_1	18	54	10.9/44.1	4.2	25.9	77.8/163.3	4.2	0.6 ± 3.9	-7.9 ± 3.6
付璐露等 ^[10]	定安盆地	K_2	7	51	6.7/44.7	5.4	26.3	81.2/153.3	5.4	-3.6 ± 4.8	-7.3 ± 4.4
本文	白沙盆地	K_1	14	80.4	359.9/43.4	4.8	25.3	83.8/108.4	4.7	-10.5 ± 4.3	-7.3 ± 3.9

注:剩磁方向为褶皱展平到最大精度参数时的方向,古磁极为褶皱展平到最大精度参数时的古磁极;相对运动量中,漂移中负号代表南向漂移;旋转运动中负号代表逆时针旋转.计算软件为 PMGSC 软件.

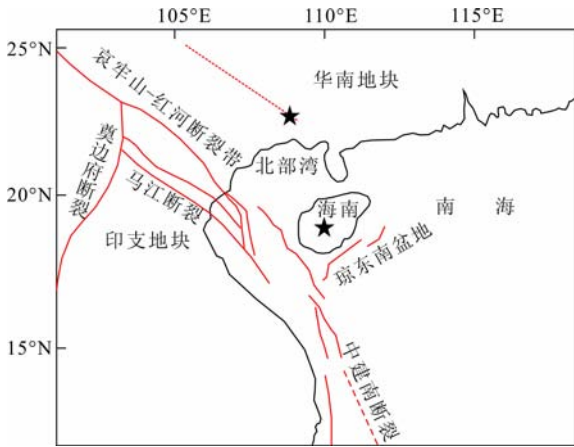


图9 海南岛周边断裂带

红色实线为确定断裂;红色虚线为推测断裂;五角星为 Liu 等推测海南与华南间断裂带所用古地磁点(海南和广西新龙)。华南陆上红色虚线为 Liu 推测断裂,其他断裂源自孙珍等^[45]。

Fig. 9 Large scale faults mapped in areas surrounding the Hainan Island

相对华南地块向东南移动。但是,本文将广西白垩纪古地磁极与现在资料更新的华南白垩纪参考极位置 $80.1^{\circ}\text{N}, 204.1^{\circ}\text{E}, \alpha_{95} = 2.5^{\circ}$ ^[19] 比较,却发现广西自白垩纪以来相对华南地块向南漂移仅为 $1.7^{\circ} \pm 5.3^{\circ}$ 。这表明广西相对华南地块并无明显的纬向漂移。并且广西西部早三叠世古地磁数据表明,广西西部自早三叠世以来相对华南板块无相对运动发生^[46]。这进一步否定了 Liu 等提出的海南岛与华南地块之间的断裂带位置。这表明海南岛在白垩纪位于比现今纬度北 6° 以上的古地磁结果在围区白垩纪古地磁结果的限制下是难以成立的。

假设本文研究区红层记录的是新生代同褶皱重磁化的剩磁,也难以在海南围区古地磁和地质限制条件下作合理解释。将 14 个采点高温特征剩磁数据褶皱展平 80.4% 达最大精度参数时计算出的古磁极位置 $83.8^{\circ}\text{N}, 108.4^{\circ}\text{E}, \alpha_{95} = 4.7^{\circ}$ 与华南地块新生代参考极位置 $89.4^{\circ}\text{N}, 328.7^{\circ}\text{E}, \alpha_{95} = 5.9^{\circ}$ ^[47] 比较,表明海南岛自新生代以来相对华南地块南向漂移了 $6.7^{\circ} \pm 5.5^{\circ}$, 逆时针旋转了 $0.3^{\circ} \pm 6^{\circ}$ 。

因此比较合理的解释是红层的剩磁是沉积时获得,但在沉积后受到了构造应力的改造,磁性矿物颗粒排列发生了变化,导致古地磁方向随之变化。因此海南岛红层的古地磁方向不适宜用来恢复海南岛在白垩纪时的古纬度。

6 结 论

综上所述,通过对海南岛早白垩世红层进行古

地磁采样、测试分析和讨论,结合围区古地磁和地质限制条件,本文对海南岛白垩纪红层的古地磁研究取得以下几点认识:

(1) 海南岛早白垩世红层 14 个采点 AMS 最小轴显著偏离地层法线,没有反映沉积岩的沉积或者压实作用特征。相反,磁化率各向异性椭球体中间轴与野外观察到的节理组交线重合,反映了构造应变特征。说明红层在沉积后因构造应力影响磁性矿物排列发生了改变。

(2) 热退磁结果表明,14 个采点高温特征剩磁在褶皱展平 80.4% 时集中程度最高,不能通过褶皱检验。原因可能是红层发生了同褶皱重磁化;也可能是红层剩磁在沉积时获得,但在沉积后因磁性矿物排列发生变化而导致古地磁方向改变,致使不能通过褶皱检验。

(3) 将本文和前人古地磁数据与华南地块白垩纪参考极对比,表明海南岛白垩纪位于比现今纬度北 6° 左右的位置,并自白垩纪以来,相对华南地块向南漂移 6 个纬度。与华南地块新生代参考极对比计算出来的相对漂移量和旋转量也很大。而来自海南岛围区古地磁结果和地质观察表明“海南岛在白垩纪或新生代位于比现今纬度北 6° 以上的位置”是难以成立的。本文对海南白垩纪古地磁结果与华南地块古地磁数据以及周边地质现象的不协调性给出一种解释,即海南岛红层剩磁可能在沉积时获得,但在沉积后受到构造应力改造使古地磁方向发生变化,因此,它不是古纬度的准确载体。

致 谢 中国科学院广州地球化学研究所欧朱照宇研究员、欧阳萍婷副研究员对本文样品磁组构测试提供指导和帮助,审稿人的指正和建设性意见提升了本文的质量,中国科学院地质与地球物理研究所江为为副研究员以及学报编辑为本文审阅过程提供了便利,在此表示衷心的感谢。

参考文献(References)

- [1] 杨振宇, Besse J, 孙知明等. 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, 1998, **72**(2): 112~125
Yang Z Y, Jean B, Sun Z M, et al. Tertiary squeeze-out of the Indo-China Block and Lithospheric evolution of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 1998, **72**(2): 112~125
- [2] 杨振宇, 孙知明, 马醒华等. 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, 2001, **75**(1): 35~44
Yang Z Y, Sun Z M, Ma X H, et al. Palaeomagnetic study of the Early Tertiary on both sides of the Red River fault and its geological implications. *Acta Geologica Sinica* (in

- Chinese), 2001, **75**(1): 35~44
- [3] Tapponnier P, Lacassin R, Leloup P H, et al. The Ailao Shan/Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and south China. *Nature*, 1990, **343** (6257): 431~437
- [4] Briais A, Patriat P, Tapponnier P. Updated interpretation of magnetic anomalies and seafloor spreading stages in the South China Sea: implications for the tertiary tectonics of Southeast Asia. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(B4): 6299~6328
- [5] 莫宴情, 施央申. 海南岛地体及其毗邻陆缘晚中生代—新生代古地磁研究和构造演化. *南京大学学报(自然科学版)*, 1987, **23**(3): 521~532
- Mo Y Q, Shi Y S. Paleomagnetic study and tectonic evolution of Hainan Terrane and its vicinal continental coast the Late Mesozoic to Cenozoic. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)* (in Chinese), 1987, **23**(3): 521~532
- [6] 杨树锋, 虞子治, 郭令智等. 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)*, 1989, **1**(1-2): 38~46
- Yang S F, Yu Z Y, Ge L Z, et al. Differentiation of Hainan terrane, the research of paleogeomagnetism and the significance of plate tectonics. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition)* (in Chinese), 1989, **1** (1-2): 38~46
- [7] 罗伟新, 陈永. 海南岛白垩地层及第四纪玄武岩的古地磁研究. *广东地质*, 1990, **5**(4): 65~72
- Luo W X, Chen Y. Palaeomagnetic study on Cretaceous strata and Quaternary basalt of Hainan Island. *Guangdong Geology* (in Chinese), 1990, **5**(4): 65~72
- [8] Li Z X, Metcalfe I, Wang X F. Vertical-axis block rotations in southwestern China since the Cretaceous: new paleomagnetic results from Hainan Island. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**(22): 3071~3074
- [9] Liu Y Y, Morinaga H. Cretaceous palaeomagnetic results from Hainan Island in south China supporting the extrusion model of Southeast Asia. *Tectonophysics*, 1999, **301**(1-2): 133~144
- [10] 付璐露, 沈忠悦, 贺丽等. 海南岛白垩纪古地磁结果及其构造地质意义. *地质学报*, 2010, **84**(2): 183~194
- Fu L L, Shen Z Y, He L, et al. Cretaceous paleomagnetic results from Hainan Island and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2010, **84**(2): 183~194
- [11] Lee G D, Besse J, Courtillot V, et al. Eastern Asia in the Cretaceous: new paleomagnetic data from South Korea and a new look at Chinese and Japanese data. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(B5): 3580~3596
- [12] 林金录. 中国古地磁数据表(2). *地质科学*, 1989, (4): 400~404
- Lin J L. China paleomagnetic data list(2). *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 1989, (4): 400~404
- [13] Gilder S, Coe R, Wu H, et al. Cretaceous and tertiary paleomagnetic results from Southeast China and their tectonic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, **117**(3-4): 637~652
- [14] Gilder S A, Leloup P H, Courtillot V, et al. Tectonic evolution of the Tancheng-Lujiang (Tan-Lu) fault via Middle Triassic to Early Cenozoic paleomagnetic data. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(B7): 15365~15390
- [15] Enkin R J, Courtillot V, Xing L, et al. The stationary Cretaceous paleomagnetic pole of Sichuan (South China Block). *Tectonics*, 1991, **10**(3): 547~559
- [16] Enkin R J, Yang Z Y, Chen Y, et al. Paleomagnetic constraints on the geodynamic history of the major blocks of China from the Permian to the present. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(B10): 13953~13989
- [17] 吴汉宁, 朱日祥, 白立新等. 扬子地块湖北兴山—秭归剖面古生界至中生界构造古地磁研究. *中国科学(D辑)*, 1999, **29**(2): 144~154
- Wu H N, Zhu R X, Courtillot V, et al. Paleomagnetic results of Paleozoic and Mesozoic rocks from Xingshan—Zigui section in Hubei Province, South China. *Science in China (Series D)*, 1999, **42**(2): 182~194
- [18] Morinaga H, Liu Y Y. Cretaceous paleomagnetism of the eastern South China Block: establishment of the stable body of SCB. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, **222**(3-4): 971~988
- [19] Zhu Z M, Morinaga H, Gui R J, et al. Paleomagnetic constraints on the extent of the stable body of the South China Block since the Cretaceous: New data from the Yuanma Basin, China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, **248** (1-2): 533~544
- [20] Tan X D, Kodama K P, Wang P Y, et al. Palaeomagnetism of Early Triassic limestones from the Huanan Block, south China: no evidence for separation between the Huanan and Yangtze Blocks during the early Mesozoic. *Geophys. J. Int.*, 2000, **142**(1): 241~256
- [21] 沈忠悦, 丁敬海, 叶长贺等. 广东黄盆早三叠世古地磁结果及其构造地质意义. *科学通报*, 2006, **51**(14): 1689~1695
- Shen Z Y, Ding J H, Ye C H, et al. New Early Triassic paleomagnetic data from Huangben section, Guangdong and its tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51** (15): 1894~1902
- [22] 陈忠, 袁友仁. 广东三水盆地早第三纪古地磁问题的初步探讨. *南海海洋科学集刊(第8集)*, 1987: 87~94
- [23] 袁友仁, 王保贵, 汤贤赞等. 华南三水盆地白垩纪—早第三纪古纬度漂移与南海演化. *热带海洋*, 1992, **11**(1): 37~44
- Yuan Y R, Wang B G, Tang X Z, et al. Cretaceous-Early Tertiary paleolatitude migration in Sanshui Basin of South China and evolution of South China Sea. *Tropic Oceanology* (in Chinese), 1992, **11**(1): 37~44
- [24] 王保贵, 汤贤赞, 侯红明等. 广东南雄盆地晚白垩系古地磁研究. *热带海洋*, 1994, **13**(3): 54~61
- Wang B G, Tang X Z, Hou H M, et al. A paleomagnetic study on Late Cretaceous in Nanxiong Basin of Guangdong Province. *Tropic Oceanology* (in Chinese), 1994, **13**(3): 54~61

- [25] 侯红明, 袁友仁, 张毅祥等. 广东三水盆地晚白垩世—始新世古地磁研究及构造意义. *热带海洋*, 1994, **13**(4): 65~72
Hou H M, Yuan Y R, Zhang Y X, et al. Paleomagnetic study of Sanshui Basin in Guangdong from Late Cretaceous to Eocene and its tectonic significance. *Tropic Oceanology* (in Chinese), 1994, **13**(4): 65~72
- [26] Tan X D, Kodama K P, Gilder S, et al. Rock magnetic evidence for inclination shallowing in the Passaic Formation red beds from the Newark basin and a systematic bias of the Late Triassic apparent polar wander path for North America. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, **254**(3-4): 345~357
- [27] Tan X D, Kodama K P, Chen H L, et al. Paleomagnetism and magnetic anisotropy of Cretaceous red beds from the Tarim Basin, northwest China: Evidence for a rock magnetic cause of anomalously shallow paleomagnetic inclinations from central Asia. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(B2): 2107
- [28] Tan X D, Kodama K P. Magnetic anisotropy and paleomagnetic inclination shallowing in red beds: Evidence from the Mississippian Mauch Chunk Formation, Pennsylvania. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(B11): 2311
- [29] 汪啸风, 马大铨, 蒋大海等. 海南岛地质. 北京: 地质出版社, 1991
Wang X F, Ma D Q, Jiang D H, et al. Geology of Hainan Island (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1991
- [30] Kirschvink J L. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.*, 1980, **62**: 699~718
- [31] Fisher R A. Dispersion on a sphere. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 1953, **217**(1130): 295~305
- [32] Graham J W. Magnetic susceptibility anisotropy, an unexploited petrofabric element. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 1954, **65**: 1257~1258
- [33] Hrouda F. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Surveys in Geophysics*, 1982, **5**(1): 37~82
- [34] Borradaile G J, Henry B. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth-Sci. Rev.*, 1997, **42**(1-2): 49~93
- [35] 韩玉林, 谈晓冬, Kenneth P K. 岩石磁组构可以揭示应变吗? ——以华南地块早三叠世灰岩为例. *地球物理学报*, 2009, **52**(10): 2588~2594
Han Y L, Tan X D, Kenneth P K. Can rock magnetic fabric reveal strain? Case studies of Early Triassic limestones from South China Block. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(10): 2588~2594
- [36] 孟小红, 周海民. 冀东油田钻井岩芯的磁学研究. *地球物理学报*, 1997, **40**(6): 809~820
Meng X H, Zhou H M. Magnetic study of drill-cores in Jidong Oil Field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, **40**(6): 809~820
- [37] 周勇, 王二七, 李齐等. 拉脊山及邻区磁组构特征及其地质意义. *中国科学(D辑)*, 2001, **31**(S1): 187~194
Zhou Y, Wang E Q, Li Q, et al. Characteristic of magnetic susceptibility anisotropy in and around Laji Shan and its geological significance. *Science in China (Series D)*, 2001, **44**(Suppl.): 233~242
- [38] Jelínek V, Kropáček V. Statistical processing of anisotropy of magnetic susceptibility measured on groups of specimens. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 1978, **22**(1): 50~62
- [39] Watson G S, Enkin R J. The fold test in paleomagnetism as a parameter estimation problem. *Geophys. Res. Lett.*, 1993, **20**(19): 2135~2137
- [40] Enkin R J. The direction-correction tilt test: an all-purpose tilt/fold test for paleomagnetic studies. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, **212**(1-2): 151~166
- [41] 曾维军. 广州—巴拉望地质断面综合研究. *南海地质研究*, 1991, (3): 39~64
Zeng W J. Comprehensive study on Guangzhou—Palawan Transect. *Research of Geological South China Sea* (in Chinese), 1991, (3): 39~64
- [42] 姚伯初, 曾维军, 陈艺中等. 南海西沙海槽, 一条古缝合线. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, **14**(1): 1~9
Yao B C, Zeng W J, Chen Y Z, et al. Xisha Trough of South China Sea—An ancient suture. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 1994, **14**(1): 1~9
- [43] 万玲, 姚伯初, 吴能友. 红河断裂带入海后的延伸及其构造意义. *南海地质研究*, 2000, (12): 22~32
Wan L, Yao B C, Wu N Y. The extending of Honghe Faults in the South China Sea and its tectonic significance. *Geological South China Sea* (in Chinese), 2000, (12): 22~32
- [44] 郝天珧, 刘建华, 宋海斌等. 华南及其相邻边缘海域一些重要断裂的地球物理证据. *地球物理学进展*, 2002, **17**(1): 13~23
Hao T Y, Liu J H, Song H B, et al. Geophysical evidences of some important faults in South China and adjacent marginal seas region. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2002, **17**(1): 13~23
- [45] 孙珍, 钟志洪, 周蒂等. 红河断裂带的新生代变形机制及莺歌海盆地的实验证据. *热带海洋学报*, 2003, **22**(2): 1~9
Sun Z, Zhong Z H, Zhou D, et al. Deformation mechanism of Red River Fault Zone during Cenozoic and experimental evidences related to Yinggehai Basin formation. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 2003, **22**(2): 1~9
- [46] Gilder S A, Coe R, Wu H N, et al. Triassic paleomagnetic data from south China and their bearing on the tectonic evolution of the western circum-Pacific region. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1995, **131**(3-4): 269~287
- [47] 吴汉宁, 吕建军, 朱日祥等. 扬子地块显生宙古地磁视极移曲线及地块运动特征. *中国科学(D辑)*, 1998, **28**(增刊): 70~78
Wu H N, Zhu R X, Bai L X, et al. Revised apparent polar wander path of the Yangtze Block and its tectonic implications. *Science in China (Series D)*, 1998, **41**(Suppl. 2): 78~90