

山西交城地区早三叠世古地磁研究: 局部旋转及构造意义*

史瑞萍 黄宝春 朱日祥 任收麦

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要 对山西交城早三叠世刘家沟组红色砂岩的岩石磁学和系统热退磁研究表明, 一方面高矫顽力的赤铁矿为高温特征剩磁载体. 另一方面, 绝大多数样品的系统热退磁表现为室温至 100/200℃之间的粘滞剩磁和 250~500℃之间的中温分量及 500~680℃之间的高温分量. 中温分量在 99%置信范围内有负褶皱检验结果, 且其地理坐标下的平均方向所对应的古地磁极位置在 95%置信范围内与华北地块中晚侏罗世古地磁参考极一致, 表明其很可能为燕山期获得的重磁化分量. 高温分量具有双极性和 c 级分类倒转检验结果, 且在 99%置信范围内通过了褶皱检验, 表明其最可能代表岩石形成时的特征剩磁. 高温分量所对应的古地磁极位置与前人在鄂尔多斯盆地早三叠世古地磁极之间的差异, 可能意味着山西交城地区在早三叠世之后相对于鄂尔多斯盆地发生了一定的局部旋转运动. 这一局部旋转运动很可能与作为山西与鄂尔多斯两个构造单元分界的离石大断裂和位于采样地区东南侧, 中新世代仍在活动的交城大断裂的活动有关.

关键词 山西交城 古地磁 早三叠世 局部旋转

华北块体早三叠世古地磁研究已取得大量成果^{[1~6][1~4]}. 杨振宇等人^[7]研究华北地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动时, 对前人发表的华北地块早三叠世的古地磁数据, 按照国际通用的可靠性判据, 尤其注重样品是否进行了系统退磁、是否进行了剩磁成分的主向量分析以及是否经过了一定的剩磁稳定性检验等, 筛选出 6 个可靠的早三叠世古地磁极位置. 其中 3 个极位置是从山西获得的, 由他们平均所得的极位置为 51.0°N, 353.2°E, $A_{95} = 2.5^\circ$; 另外 3 个是从鄂尔多斯盆地获得的, 所得的平均极位置为 60.2°N, 353.6°, $A_{95} = 4.7^\circ$. 对比发现由这两个构造单元分别获得的早三叠世平均古地磁极位置在经度和纬度上都存在着显著的差异. 如果用不同构造单元之间的相对运动来解释, 则意味着在早三叠世之后, 山西地区相对于鄂尔多斯盆地这一华北地区最稳定的构造单元除发生了一定量的相对旋转($R = 6.8^\circ \pm 4.5^\circ$)之外, 还发生了一定量的南北向相向运动($F = 6.5^\circ \pm 4.3^\circ$). 也就是说在早三叠世之后山西和鄂尔多斯盆

2002-12-28 收稿, 2003-04-20 收修改稿

* 中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZCX1-07)

- 1) Zheng Z. Paleomagnetic constraints on the Phanerozoic tectonic evolution of the North China Block. Ph. D. Dissertation of Tokyo Institute of Technology, 1992
- 2) Lin J L. The apparent polar wander paths for the North and South China Blocks. Ph. D. Thesis of University of California at Santa Barbara, 1984
- 3) 吴汉宁. 中国南北板块古纬度变化与秦岭造山带构造演化. 中国科学院博士学位论文, 1988
- 4) Frost G M. Paleomagnetic studies on the tectonic evolution of North China and Qaidam. Ph. D. Thesis, University of California Santa Cruz, 1994

地这两个构造单元之间在南北方向上可能还存在 (715 ± 473) km 构造缩短或水域. 显然, 这一推论缺乏地质证据的有力支持, 尚有待于深入研究. 为此, 本文报道山西交城地区早三叠世古地磁的研究.

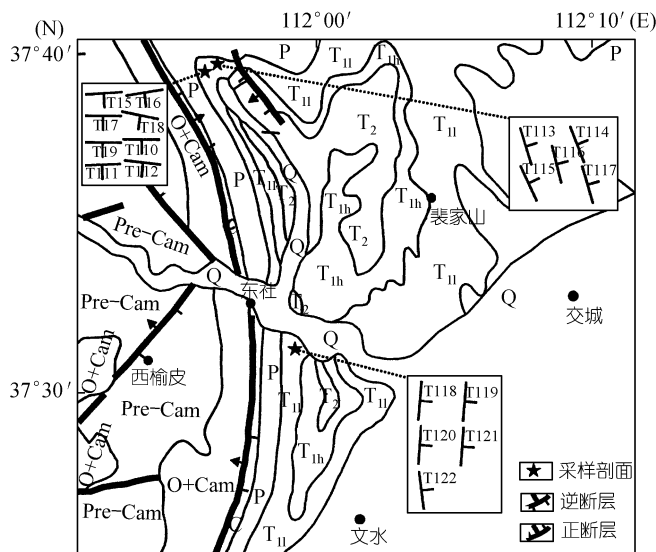


图 1 采样剖面的地质框架图

Taeniaesporites)^[8], 为确定其地层年龄提供了可靠依据. 通常, 刘家沟组的岩性以棕红色砂岩、泥岩和页岩为主. 用古地磁便轻手提式钻机在水峪贯背斜两翼的寺沟剖面(37.67°N, 111.93°E)、陈台榆林剖面(37.65°N, 111.94°E)和东社文娱水库(37.53°N, 111.98°E)3 条剖面上布置了 18 个采样点(图 1), 共采集古地磁独立定向岩芯 193 块, 所有岩芯采用磁罗盘定向.

2 岩石磁学特性

为鉴定样品中的主要磁性矿物, 每个采样点中选取了一块代表样品进行磁化率随温度变化特征的研究. 磁化率随温度变化(即 $K-T$ 曲线)不仅能够揭示样品中主要载磁矿物的居里温度, 有助于判别磁化率贡献显著磁性矿物的种类, 而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. $K-T$ 曲线是在 KLY-3s 卡帕桥上获得的, 实验升温速率为 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 最高加热温度为 700°C . 为了避免样品在加热过程中的氧化作用, 整个加热和冷却过程均在氩气环境中进行.

代表样品的 $K-T$ 曲线可分为 A 和 B 两种类型(图 2): A 类样品的特征是加热曲线与冷却曲线基本可逆(图 2(a)), 表明在加热过程中几乎没有新磁性矿物生成, B 类样品磁化率随温度的变化(图 2(b))表现为冷却曲线高于加热曲线, 表明在室温至 700°C 的加热过程中有新的磁化率高的矿物生成. 另一方面, 无论是类型 A 还是 B, 他们的共同特征是磁化率在 $540\sim 560/585^{\circ}\text{C}$ 之间迅速下降, 然后降低速度变得平缓, 直到 680°C 左右达到最小值, 这一共同点表明磁铁矿和赤铁矿是样品磁化率的主要贡献者.

1 地质背景和样品采集

山西交城地区位于吕梁山复式背斜东翼中段和太原西山向斜西翼中部, 距太原西山华北石炭-二叠系标准剖面西南约 50 km. 该区早三叠世沉积非常发育, 是山西太原理工大学的教学实习基地. 如水峪贯镇以北约 1 km 的寺沟剖面出露有从中石炭至下三叠统刘家沟组的连续地层, 野外可清晰地观察到刘家沟组与上和尚沟组及下石千峰组呈整合接触. 在刘家沟组内已发现有大量的厥类植物孢子(如, *Lundbladispore*)和裸子植物花粉(*Cycadopites*, *Tubermonocolpites*,

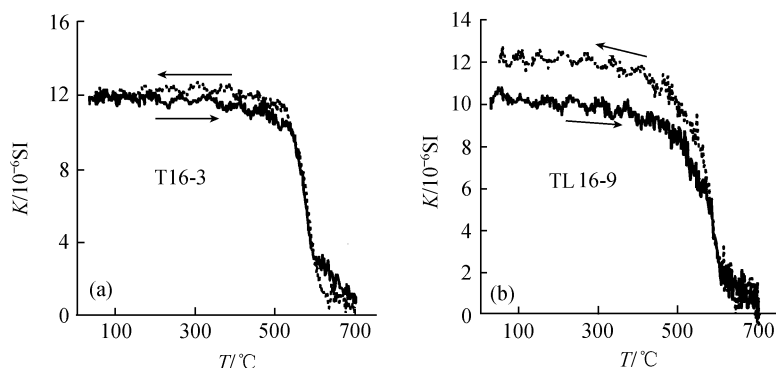


图 2 氦气环境中代表样品的磁化率随温度的变化曲线

(a) A 类型; (b) B 类型

3 古地磁结果

根据上述岩石磁学结果对采自山西交城地区寺沟等 3 条剖面的 18 个采点 186 块古地磁定向样品进行了系统热清洗. 全部样品的测试是在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室 2G-755R 岩石超导磁力仪上完成的. 系统热退磁采用 MMTD60 退磁炉, 热退磁的温度间隔在低温时为 50~100℃, 高温间隔为 10℃, 磁力仪和热退磁炉均安装在中心小于 200 nT 的磁屏蔽线圈中. 退磁结果的分析首先用主向量分析法^[9]或重磁化弧法^[10]求得单样品的剩磁方向或大圆弧, 然后再以采点为单位进行平均^[11, 12]求得各采样点的平均剩磁方向, 最后再对各采点平均方向进行 Fisher 统计^[11], 最终求得各剩磁组分的平均方向.

系统退磁结果表明, 除了在 100~200℃之前的粘滞剩磁外, 样品中主要包含两组剩磁成分(图 3). 18 个采样点中有 16 个采样点(186 块退磁样品中的 97 块)在热退磁温度 250~500℃之间分离出一中温组份. 这一中温组份为单一极性, 在地理坐标下的平均方向为 $D = 9.6^\circ$, $I = 50.8^\circ$, $k = 53.8$, $\alpha_{95} = 5.1^\circ$. 这一分量在 99%置信水平下具 McElhinny^[13]($k_g/k_s = 5.785 > F(30, 30) = 2.38$, 99%置信水平下的临界值)和 McFadden^[14](倾斜校正前 $\xi_2 = 2.384$, 倾斜校正后 $\xi_2 = 13.364$, $N = 16$ 时 99%置信水平下的临界值为 6.516)负褶皱检验结果, 且其对应的古地磁极位置(80.0°N, 237.0°E, $dp/dm = 4.6^\circ/0.9^\circ$)在 95%置信范围内与华北地块中、晚侏罗世极位置^[7]一致, 表明其很可能是燕山期的重磁化分量. 高温分量通常在热退磁温度 500~680℃或 630~680℃之间被分离出来(图 3), 其中某些样品的高温分量用常规的主向量分析法^[10]很难确定, 但可用重磁化弧法求得. 除采点 TL09 和 TL20 未能分离出这一高温分量外, 采点 TL12 的高温分量与其余的中温分量相类似(该采点无稳定的中温分量可分离出), 怀疑其可能未完全清除掉中温分量的影响. 同时, 采点 TL21 的平均方向不仅具有较高离散度($\alpha_{95} = 17.8^\circ$), 且明显离散于其余采点平均方向(图 4). 这 2 个采点因而未参加最后的统计平均. 总之, 山西交城地区 18 个采样点中, 除 2 个未分离出稳定特征高温分量的采点及 2 个有充分理由被剔除的采样点外, 共 14 个采样点(8 个采样点为正极性, 6 个为负极性)揭示出一致性较好的高温特征分量. 倾斜校正前后的平均方向分别 $D_g = 317.3^\circ$, $I_g = 12.3^\circ$, $k_g = 17.9$, $\alpha_{95} = 9.7^\circ$ 和 $D_s = 319.8^\circ$, $I_s = 33.8^\circ$, $k_s = 62.0$, $\alpha_{95} = 5.1^\circ$ (表 1 和图 4). 这一分量在 99%置信水平下通过了 McElhinny^[13]($k_s/k_g = 3.464 > F(26, 26) = 2.55$, 99%置信水平下的临界值)和 McFadden^[14](倾斜校正前 $\xi_2 = 11.181$, 倾斜校正后 $\xi_2 =$

0.691, $N = 14$ 时 99%置信水平下的临界值为 6.087)褶皱检验. 应用 McFadden 和 McElhinny 分类倒转检验^[15]表明这一高温特征分量通过了 C 级倒转检验($\gamma_0 = 4.8^\circ$ 小于95%置信水平下的临

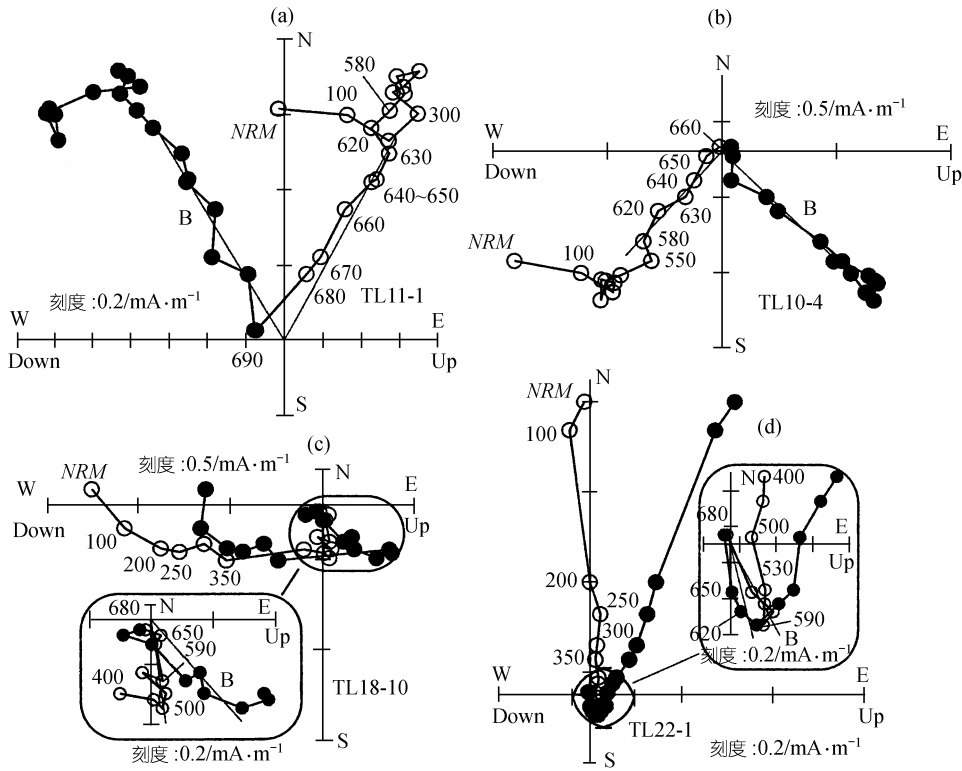


图 3 代表样品倾斜校正前的系统热退磁矢量图
(b), (c)和(a), (d)分别代表在不同温度区间分离出来的极性为正、负的高温分量的热退磁矢量图,
实心圆和空心圆分别代表水平和垂直投影

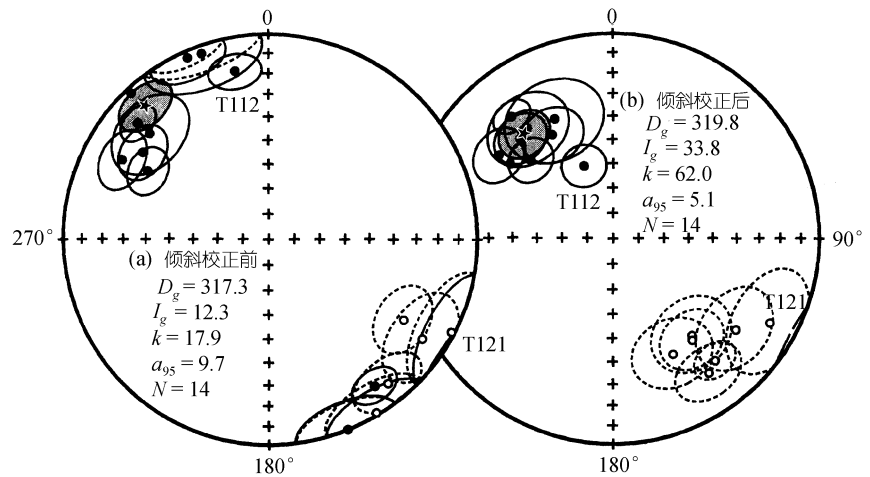


图 4 山西交城地区高温特征分量采点平均方向的等面积投影图
(a) 为倾斜校正前; (b) 为倾斜校正后. 实心圆和空心圆分别代表上和下半球投影; 五角星代表总平均方向

表 1 山西交城早三叠世高温剩磁分量结果及统计参数^{a)}

采点	R/N	n/n ₀	温度范围/℃	地理坐标		地层坐标		k	α_{95}	$\lambda p/^{\circ}$	$\Phi p/^{\circ}$
				$D_g/^{\circ}$	$I_g/^{\circ}$	$D_s/^{\circ}$	$I_s/^{\circ}$				
TL05	6/0	6/9	530~680	148.7	-1.8	140.9	-39.3	19.9	15.4	53.1	8.5
TL06	0/2	2/12	580~670	316.8	2.7	306.2	38.4	—	—	41.3	18.6
TL07	3/0	3/10	550~690	157.7	0.3	152.8	-37.0	69.3	14.9	61.0	353.7
TL08	0/5	5/12	580~680	340.2	4.3	334.1	35.5	24.1	18.0	61.2	350.5
TL09		0/12						没有高温分量			
TL10	8/0	8/12	550~690	144.5	13.8	140.2	-23.9	52.9	7.7	46.5	357.3
TL11	0/5	5/12	630~690	336.0	3.6	329.8	41.2	44.6	11.6	60.7	2.1
TL12 ^{b)}	1/10	11/13	550~680	348.8	17.5	338.2	58.8	28.9	8.6	72.9	35.0
TL13	0/9	9/9	590~680	299.4	32.7	313.7	44.1	35.4	8.8	49.3	18.9
TL14	0/7	7/9	620~660	311.7	15.9	320.5	24.1	80.4	6.8	46.8	357.1
TL15	0/8	8/9	630~680	304.6	26.2	317.4	34.2	30.8	10.1	48.4	7.0
TL16	0/7	7/8	500~680	311.6	23.3	322.3	32.7	16.7	15.2	51.6	1.4
TL17	0/8	8/9	500~680	298.5	19.8	306.3	32.1	29.2	10.4	39.1	13.9
TL18	5/0	5/12	560~680	140.9	-11.0	144.6	-21.0	42.4	11.9	48.6	351.3
TL19	2/1	3/12	500~680	123.4	-13.5	126.7	-26.8	87.8	15.5	37.5	10.4
TL20		0/10						没有高温分量			
TL21 ^{b)}	4/0	4/8	530~680	117.3	-2.4	118.3	-14.8	27.5	17.8	26.9	10.2
TL22	3/0	3/8	500~660	121.3	-25.8	142.2	-37.6	142.2	12.2	53.5	6.0
	0/8			315.4	16.6			18.5	13.2		
						318.8	35.7	63.0	7.0		
	6/0			139.8	-6.6			17.3	16.6		
						141.0	-31.3	57.6	8.9		
平均		14/18		317.3	12.3			17.9	9.7		
						319.8	33.8	62.0	5.1		
								69.0	4.8	50.3	4.8

a) 表内 R/N, 反/正极性样品数或采点数; n/n₀, 参加统计的样品数或采点数/热退磁总样品数或采点数; k 和 α_{95} , Fisher 统计精度参数和 95%圆锥半顶角; D_g/I_g 和 D_s/I_s 分别为地理坐标和地层坐标下的磁偏角和磁倾角. $\lambda p/\Phi p$ 分别为地层坐标下虚古地磁极的纬度和经度

b) 未参加最后统计平均的采点, 详见文中讨论

界值 $\gamma_c = 10.5^{\circ}$).

4 讨论与结论

磁化率随温度的变化特征和热退磁特征表明, 携带剩磁的主要磁性矿物为磁铁矿和赤铁矿, 但赤铁矿为高温特征剩磁载体. 系统热退磁获得的高温特征分量通过了 McElhinny^[13]和 McFadden^[14]褶皱检验及 McFadden 和 McElhinny^[15]分类倒转检验, 表明高温特征分量是褶皱前形成的剩磁; 另一方面高温特征分量所对应的古地磁极(50.6°N, 3.1°E, $A_{95} = 4.8^{\circ}$)明显有别于华北地块早三叠世以来的古地磁参考极位置^[7]. 这表明这一高温特征分量很可能是岩石形成时期获得的原生剩磁.

如前所述, 前人已对华北地块早三叠世红色砂岩进行了大量的古地磁学和磁性地层学研究^{[1~6][1~4]}. 由山西交城地区所获得的早三叠世古地磁极与杨振宇等^[7]筛选出的 6 个早三叠世古地磁极位置^{[1,2,4,5][1]}相比较, 首先可以发现由本次研究所得早三叠世古地磁极无论相对于前人从鄂尔多斯盆地获得的早三叠世古地磁结果, 还是相对于前人从山西宁武等地获得的同时期古地磁结果均显示出一定的系统差异(图5). 如果以不同构造单元之间的相对运动来解释, 上述系

1) 见 981 页脚注 1
2) 见 981 页脚注 2
3) 见 981 页脚注 3
4) 见 981 页脚注 4

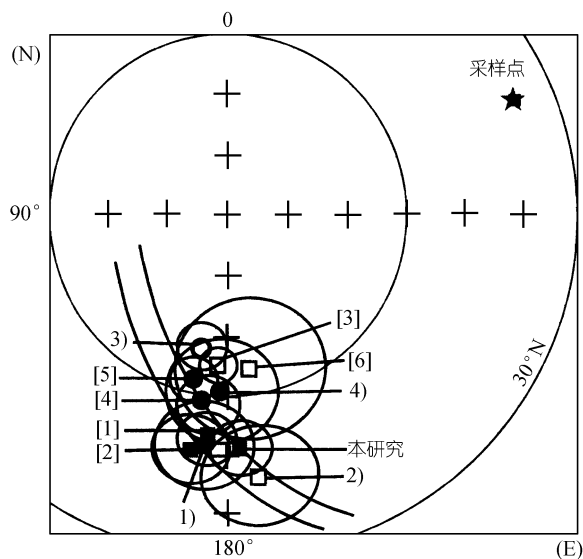


图 5 华北地区早三叠世古地磁结果的等面积投影图
实心(空心)的圆圈和方块分别表示选用(没有被选用)的鄂尔多斯和山西地区早三叠世的古地磁极;五角星表示采样点的位置;[1]~[6]为文献;
1)~4)见 981 页脚注

统差异一方面表明山西交城地区早三叠世之后相对于鄂尔多斯盆地这一华北地区最稳定的构造单元仅发生了 $11.4^\circ \pm 5.7^\circ$ 的局部旋转,而未发生明显的南北向相对运动($2.0^\circ \pm 5.4^\circ$);另一方面还可能意味着山西交城地区在早三叠世之后相对于山西宁武等地发生了较明显的南北向相对位移($5.1^\circ \pm 4.3^\circ$)和旋转运动($5.5^\circ \pm 4.1^\circ$)。显然,在华北地块内部不同构造单元间早三叠世后存在的明显的南北向相对运动或构造缩短尚缺乏地质证据。然而,地处古亚洲洋、环太平洋与特提斯 3 大构造域交汇部位的华北等中国东部块体,在 3 大构造域的相互作用下,不仅在中生代动力学体制上发生了重大变革,触发了大规模岩浆活动等一系列重大的地质事件,而且某些地区产生

了显著的局部旋转运动^[16~18]和主构造线方向及火山-沉积盆地长轴方向的明显偏转。因此,本文结果所揭示出的山西交城地区相对于鄂尔多斯盆地在早三叠世之后发生了 $11.4^\circ \pm 5.7^\circ$ 的相对旋转是可能的。事实上,作为山西与鄂尔多斯盆地两大构造单元分界的离石岩石圈断裂^[19],走向总体呈近南北向,切断前长城系至三叠系地层,北段表现为一系列呈雁行排列的逆冲断层。三叠纪以来该地区地壳升降呈天平式摆动也基本以此大断裂为支点^[19]。另一方面,在采样地区东南侧的交城大断裂,中生代时期表现为以寿阳、坪头一带为扭动支点的枢纽断裂,新生代以来仍在活动^[19]。由此可见,山西交城地区早三叠世之后相对于稳定的鄂尔多斯盆地发生了一定量的相对旋转运动可能与这两条大断裂中、新生代的强烈活动有关。

另一方面,由扬子与华北地块晚二叠世至晚三叠世古地磁视极移曲线的对比可以发现,这期间扬子与华北地块之间仅有较小的相对运动^[20,21]。同时,西秦岭地区在 220~210 Ma 之间强烈的岩浆活动,及大别山地区 Sm/Nd 和 U/Pb 年龄为 235~205 Ma, Ar/Ar 年龄为 228~205 Ma 的含柯石英超高压榴辉岩的出露^[22~24],均表明扬子与华北地块早三叠世时在东部已发生对接。然而,由杨振宇等^[7]筛选出的 6 个分别来自山西和鄂尔多斯盆地的早三叠世古地磁极的平均极位置(55.6°N , 353.4°E , $A_{95} = 4.5^\circ$)与扬子地块早三叠世古地磁极位置^[25]相对比,可以发现其在东部(36°N , 119°E),两地块之间还存在一定量的南北向相对运动($6.9^\circ \pm 5.2^\circ$)和显著的旋转运动($76.7^\circ \pm 5.4^\circ$)。如果仅采用杨振宇等^[8]筛选出的 3 个来自鄂尔多斯盆地的早三叠世古地磁极的平均极位置(60.2°N , 353.6°E , $A_{95} = 4.7^\circ$)作为华北早三叠世的极位置,其结果表明华北与扬子两地块在早三叠世已完全对接,不存在明显的南北向相对运动($F = 3.5^\circ \pm 5.3^\circ$)^[25]。因此,我们倾向于只应用来自鄂尔多斯盆地这一华北地块最稳定构造单元的古地磁结果来确定华北地

块早三叠世古地磁参考极位置, 而山西宁武盆地等地区的古地磁结果^{[1,2]1)}与鄂尔多斯盆地同时期古地磁结果之间的差异, 很可能与红层中的沉积压实引起的磁倾角浅化等有关, 不具构造意义. 当然, 这一推测还有待于进一步深入研究.

参 考 文 献

- 1 方大均, 郭亚滨, 王兆樑, 等. 山西宁武盆地三叠纪、侏罗纪古地磁结果的构造意义. 科学通报, 1988, 33(2): 133 ~ 135
- 2 Embleton B J J, McElhinny M W, Ma X H, et al. Permo-Triassic magnetostratigraphy in China: the type section near Taiyuan, Shanxi Province, North China. *Geophysical Journal International*. 1996, 126: 382 ~ 388
- 3 谈晓东, 方大均, 袁友仁, 等. 山西吉县沃曲桃园下三叠统刘家沟组红层的古地磁研究. 地球物理学报, 1991, 34(6): 736 ~ 743
- 4 马醒华, 邢历生, 杨振宇, 等. 鄂尔多斯盆地晚古生代以来古地磁研究. 北京: 地震出版社, 1992. 99
- 5 Yang Z Y, Ma X, Besse J, et al. Paleomagnetic results from Triassic sections in the Ordos Basin, North China. *Earth Planet Science Letters*, 1991, 104: 258 ~ 277
- 6 谈晓东, 刘 椿, 方大均, 等. 山西沁水盆地三叠纪岩石古地磁学研究. 中国科学, B 辑, 1995, 25(7): 755 ~ 763
- 7 杨振宇, 马醒华, 黄宝春, 等. 华北地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动. 中国科学, D 辑, 1998, 28(增刊): 44 ~ 56
- 8 贾炳文, 李 克. 吕梁山中段水峪贯地区地质综合研究. 北京: 科学出版社, 1993
- 9 Kirschvink J L. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophys J R Astron Soc*, 1980, 62: 699 ~ 718
- 10 Halls C. The use of converging remagnetization circles in paleomagnetism. *Phys Earth Planet Inter*, 1978, 16: 1 ~ 11
- 11 Fisher R A. Dispersion on a sphere. *Proc R Soc London, Ser A*, 1953, 217: 295 ~ 305
- 12 McFadden P L, McElhinny M W. The combined analysis of remagnetisation circles and direct observations in palaeomagnetism. *Earth Planet Sci Lett*, 1988, 87: 161 ~ 172
- 13 McElhinny M W. Statistical significance of the fold test in Paleomagnetism. *Geophys J R Astron Soc*, 1964, 8: 338 ~ 340
- 14 McFadden P L. A new fold test for paleomagnetic studies. *Geophys J Int*, 1990, 103: 163 ~ 169
- 15 McFadden P L, McElhinny M W. Classification of the reversals test in Paleomagnetism. *Gophys J Int*, 1990, 103: 725 ~ 729
- 16 孙知明, 杨振宇, 赵 越, 等. 河北滦平盆地早白垩纪古地磁结果的构造意义. 中国科学, D 辑, 1998, 28(增刊): 17 ~ 23
- 17 Zhao X X, Coe R, Chang K-H, et al. Clockwise rotations recorded in Early Cretaceous rocks of South Korea: implications for tectonic affinity between the Korean Peninsula and North China. *Geophys J Int*, 1999, 139(2): 447 ~ 463
- 18 朱日祥, 邵济安, 潘永信, 等. 辽西白垩纪火山岩古地磁测定与陆内旋转运动. 科学通报, 2002, 47(17): 1335 ~ 1340
- 19 山西省地质矿产局. 山西省区域地质志. 见: 中华人民共和国地质矿产部地质专报——区域地质, 第 18 号. 北京: 地质出版社, 1989. 605 ~ 645
- 20 朱日祥, 杨振宇, 吴汉宁, 等. 中国主要地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动. 中国科学, D 辑, 1998, 28(增刊): 1 ~ 16
- 21 Yang Z Y, Besse J. New Mesozoic apparent polar wander path for south China: Tectonic consequences. *J Geophys Res*, 2001, 106: 8493 ~ 8520
- 22 Wang X, Liou J G, Mao H K. Coesite-bearing eclogite from the Dabie Mountains in Central China. *Geology*, 1989, 17: 1085 ~ 1088
- 23 Ames L, Zhou G, Xiong B. Geochronology and geochemistry of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. *Tectonics*, 1996, 15: 472 ~ 489
- 24 Webb L, Hacher B R, Ratschbacher L, et al. Thermal chronologic constraints on deformation and cooling history of high- and ultrahigh-pressure rocks in the Qinling-Dabie orogen, eastern China. *Tectonics*, 1999, 18: 621 ~ 638
- 25 吴汉宁, 朱日祥, 白立新, 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): 69 ~ 78

1) 见 981 页脚注 1