

华北地块沁水盆地三叠统刘家沟组 古地磁倾角浅化研究

周庭红¹ 黄宝春^{1,†} 贾舒斐¹ 梁雅伦¹ 张东海¹ 赵千¹ 张也¹ 闫永刚²

1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 岩石圈演化国家重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; † 通信作者, E-mail: bchuang@pku.edu.cn

摘要 对华北地块沁水盆地三叠统刘家沟组红层样品进行系统的岩石磁学、磁组构和古地磁学研究, 并用 E/I (elongation/inclination) 方法对其进行磁倾角浅化的识别与校正, 获得刘家沟组红层磁倾角浅化因子 $f=0.6$ 。岩石磁学结果显示, 刘家沟组红层的主要载磁矿物是赤铁矿及磁铁矿, 其磁组构具有典型的静水沉积特征。经地层校正后, 15个采样点特征剩磁分量的平均方向为 $D_s=318.8^\circ$, $I_s=30.9^\circ$ ($\alpha_{95}=6.9^\circ$), 对应的古地磁极为 49.3°N , 5.5°E ($A_{95}=6.7^\circ$), 磁倾角浅化校正后的古地磁极为 53.5°N , 18.0°E 。对包括本文数据在内的高质量华北早三叠世古地磁极数据 ($Q \geq 4$) 进行平均, 得到校正前的古地磁极为 55.3°N , 357.1°E ($A_{95}=5.5^\circ$), 校正后的古地磁极为 60.8°N , 13.4°E ($A_{95}=5.8^\circ$)。经过古地磁倾角浅化校正, 华北地块早三叠世的古纬度有约 10° 的明显提高, 指示其东部早三叠世时与华南地块之间可能存在一定的纬度差, 但是该纬度差很可能并不代表华北地块东部早三叠世时与华南地块尚未对接, 而是指示华南地块下三叠统灰岩同样存在显著的磁倾角浅化现象。

关键词 华北地块; 磁倾角浅化; 早三叠世; 刘家沟组; 古地磁

中图分类号 P318

Paleomagnetic Inclination Shallowing in Lower Triassic Liujiagou Formation from Qinshui Basin, North China Block

ZHOU Tinghong¹, HUANG Baochun^{1,†}, JIA Shufei¹, LIANG Yalun¹, ZHANG Donghai¹,
ZHAO Qian¹, ZHANG Ye¹, YAN Yonggang²

1. The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; † Corresponding author, E-mail: bchuang@pku.edu.cn

Abstract A combined paleomagnetic, rock magnetic and magnetic fabrics study is conducted on the redbeds of Early Triassic Liujiagou Formation from Qinshui Basin, North China Block (NCB). The E/I (elongation/inclination) method indicates that the characteristic remanent magnetizations (ChRM) was significantly affected by inclination shallowing with a flattening factor $f=0.6$. Rock magnetic analysis indicates that hematite and magnetite are the main magnetic carriers. Anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) result shows typical depositional fabrics in water. The chRM has been successfully isolated from 15 sites with tilt-corrected mean direction of $D_s=318.8^\circ$, $I_s=30.9^\circ$ ($\alpha_{95}=6.9^\circ$) and a corresponding paleomagnetic pole at 49.3°N , 5.5°E ($A_{95}=6.7^\circ$). The pole after E/I correction is 53.5°N , 18.0°E . Combining with published high quality Early Triassic pole ($Q \geq 4$) for NCB, the mean Early Triassic pole for NCB before and after inclination shallowing correction is 55.3°N , 357.1°E ($A_{95}=5.5^\circ$) and 60.8°N , 13.4°E ($A_{95}=5.8^\circ$), respectively. The paleolatitude of NCB is obviously higher at Early Triassic after inclination shallowing correction with $\sim 10^\circ$ increase. Furthermore, the corrected Early Triassic paleolatitude of

NCB seems to be different from that of South China Block (SCB) at the east, which may result from the inclination shallowing error in Early Triassic limestone rocks of SCB instead of the real separation between the two blocks.

Key words North China Block; inclination shallowing; Early Triassic; Liujiagou Formation; paleomagnetism

沉积岩的碎屑剩磁能否有效地记录地磁场? 自 20 世纪 50 年代开始, 这个问题就引起学界的高度关注^[1-3]。前人在天然沉积岩^[3-5]和重沉积实验研究^[3,6]中均发现普遍存在的磁倾角浅化现象, 且在以赤铁矿为载磁矿物的红层中尤为显著^[7]。磁倾角浅化现象对建立视极移曲线和确定古板块位置有显著影响, 对其进行有效的识别和校正, 对沉积岩古地磁研究十分关键^[8]。20 世纪 50 年代, King^[6]提出经典的磁倾角浅化方程:

$$\tan(I_o) = f \tan(I_f),$$

其中, I_o 为实际观测的磁倾角; I_f 为合成实验时施加的磁倾角, f 为浅化因子。目前, 磁倾角浅化现象的识别和校正主要有两种方法: 基于剩磁各向异性的岩石磁学方法^[9-11]和基于地磁场长期变化模型的 E/I (elongation/inclination) 校正方法^[12-13]。

作为东亚大陆的关键陆块之一, 华北地块的地理位置及其与相邻地块的碰撞时限和模式一直是地质学界关注的焦点。20 世纪 80 年代末, Zhao 等^[14]和 Enkin 等^[15]根据华北、华南地块晚古生代以来的古地磁数据, 提出经典的两地块晚二叠世在东部首先碰撞, 然后由东及西剪刀式旋转拼合的模型。然而, 以往的研究对显生宙以来中国陆块磁倾角浅化问题的探讨主要集中于拉萨^[16-18]、塔里木^[19]和华南^[20-22]等地块, 对华北地块的磁倾角浅化问题的研究较少。Torsvik 等^[23]在全球显生宙古地理重建研究中, 用浅化因子 $f = 0.6$ 对各大板块所有碎屑沉积岩的古地磁数据进行磁倾角校正, 获得比之前更平滑更合理的视极移曲线, 但是由于构造活动等因素的影响, 没有对华北和华南等东亚地块做详细的讨论。Van der Voo 等^[24]在讨论蒙古-鄂霍茨克洋关闭时限的问题时, 将华北和华南地块的古地磁数据进行归纳整理, 同样选取 $f = 0.6$ 对碎屑沉积岩古地磁数据进行磁倾角浅化校正, 绘制了华南华北联合陆块视极移曲线。尽管 Bilardello 等^[8]整理的磁倾角浅化数据显示, 以磁铁矿为主要载磁矿物的沉积岩 f 值的变化区间为 [0.54, 0.79], 平均值为 0.65, 以赤铁矿为主要载磁矿物的沉积岩 f 值的变化区间为 [0.4, 0.83], 平均值为 0.59, 但考虑到不同地区、不

同岩性的磁倾角浅化效应不尽相同, 在没有准确实验数据的情况下, 将 $f = 0.6$ 作为华北地块的浅化因子是否合理, 还有待考证。

中生代是中国大陆各主要块体发生碰撞和拼合的主要时期^[25], 确定华北地块早三叠世的准确位置, 对限定其与相邻地块的拼合时间与模式具有十分重要的意义。早三叠世华北陆块内部火成岩发育较少^[26], 以往的古地磁研究数据均来自红层样品^[25,27]。本文拟对早三叠世刘家沟组红层进行系统的岩石磁学与古地磁学研究, 对华北地块早三叠世古地磁数据进行补充, 并用 E/I 校正方法对其进行磁倾角浅化的识别与校正。最后, 针对校正结果对华北地块与华南地块的相对构造关系的影响和启示进行简要探讨。

1 地质背景及采样

采样剖面位于华北地块山西隆起区南部沁水盆地南缘。在古构造位置上, 沁水盆地属于华北克拉通中带, 是华北古生代克拉通盆地经后期改造变形, 在山西隆起背景下形成的沉积构造盆地, 为一复式向斜^[28-29]。该区地层发育比较齐全, 从老至新依次发育太古宇、下元古界、中上元古界、古生界、中生界和新生界, 缺失志留系和泥盆系。该区三叠系分布广泛^[29], 下三叠统刘家沟组主要为一套灰紫红、灰红、紫红色薄层及中厚层间厚层长石砂岩, 夹紫红色粉砂岩、砂质页岩、砂质泥岩等。砂岩发育交错层理和平行层理, 粒度从北部宁武-静乐-保德一带向南部吉县-安泽-沁县一带逐渐变细, 并在南部普遍发育同生“砂岩球”^[30]。下三叠统地层在该区倾角较缓, 普遍不超过 20°。本研究选取沁水盆地南部安泽(36.18°N, 112.41°E)、沁水(35.93°N, 112.23°E)和长子(36.07°N, 112.63°E) 3 条剖面(图 1)进行系统的古地磁采样。在安泽剖面布设 4 个采样点, 沁水剖面布设 6 个采样点, 长子剖面布设 10 个采样点。在每个采样点钻取独立的定向岩芯样品 8~14 块, 20 个采样点共获得 233 块样品, 均为紫红色细砂-粉砂岩。在野外使用磁罗盘和太阳罗盘对样品进行定向。区域平均地磁偏角约为 -4.88°(<http://>

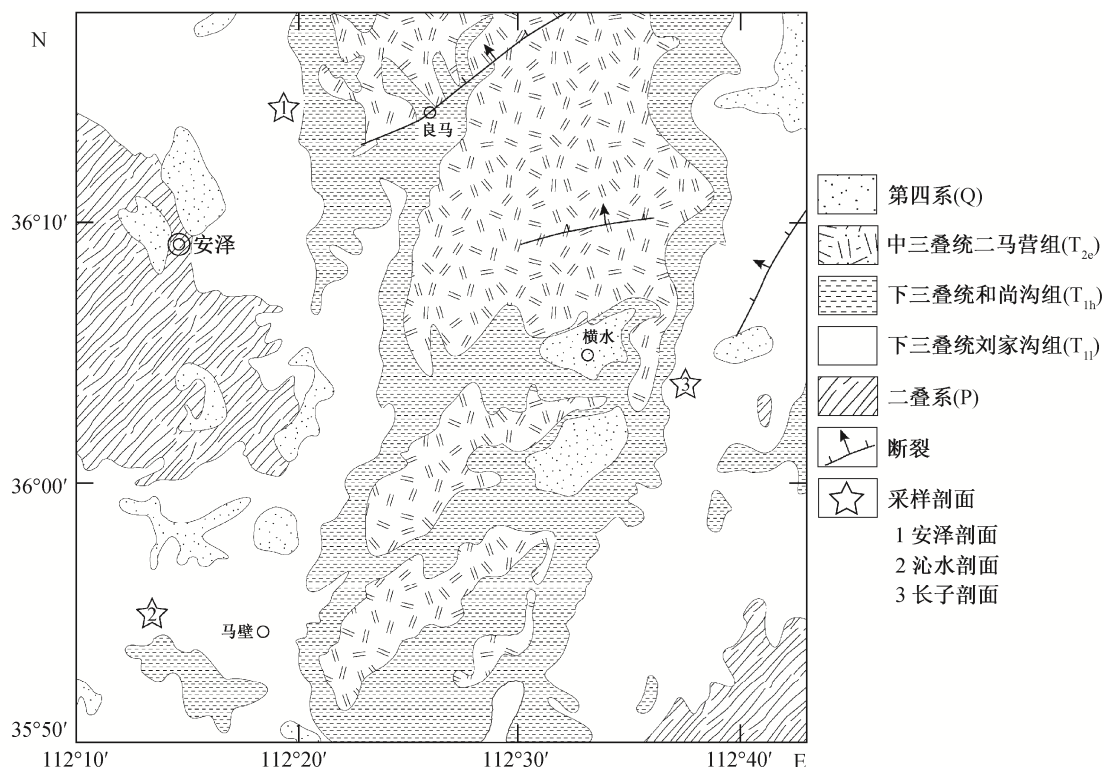


图 1 采样区域地质图(改自文献[30])

Fig. 1 Geological map of sampling area (modified from Ref. [30])

www.ngdc.noaa.gov/).

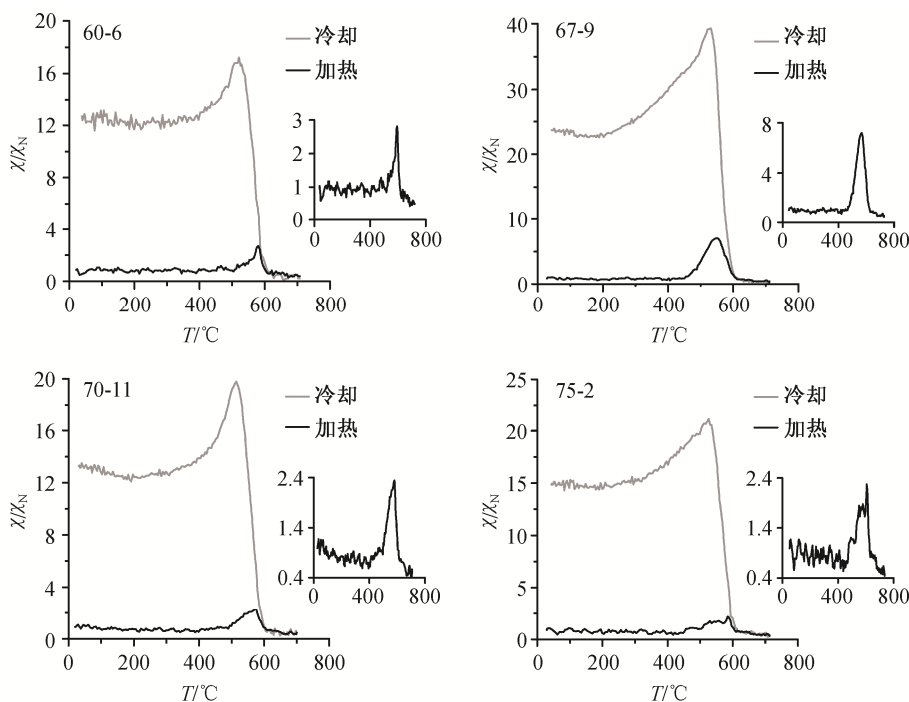
2 实验与分析

为了确定刘家沟组样品中磁性矿物的类型以及特征剩磁方向,对样品进行岩石磁学、磁组构(anisotropy of magnetic susceptibility, AMS)及系统热退磁实验。岩石磁学实验包括磁化率随温度变化曲线(χ - T 曲线)以及磁滞回线。 χ - T 曲线和 AMS 使用 Agico MFK1 Kappabridge 测量,分别在中国科学院青藏高原研究所古地磁实验室、中国地质大学(北京)古地磁学与环境磁学实验室完成。磁滞回线使用中国科学院地质与地球物理研究所古地磁与年代学实验室的 MicroMag3900 型变梯度磁力仪测量完成。热退磁实验在北京大学构造磁学实验室完成,样品逐步退磁和剩磁测量分别在美制 ASC-TD48 退磁炉和 2G-755 超导磁力仪上进行。热退磁在低温阶段的温度间隔为 50~100℃,高温阶段加密至 5~10℃。所有样品均经历至少 18 个温度点的系统退磁。样品的特征剩磁利用主成分法^[31]获得。古地磁数据的处理主要利用 PMGSC 和 PmagPy。

2.1 岩石磁学实验与分析

在 3 个采样剖面各选取 2~4 个代表性样品(共计 10 个样品)进行 χ - T 曲线测量。样品的磁化率在低温时(低于约 400℃)缓慢下降,显示顺磁性矿物的性质,加热到约 560~580℃时磁化率显著升高,随后磁化率急剧降低,指示样品中含有磁铁矿。在 580~700℃,样品磁化率仍在降低,表明样品中含赤铁矿^[32]。所有样品的冷却曲线都显示出磁铁矿的特征,并伴随磁化率的大幅度升高,这可能是顺磁性黏土矿物在加热过程中转化为磁铁矿所致^[33](图 2)。

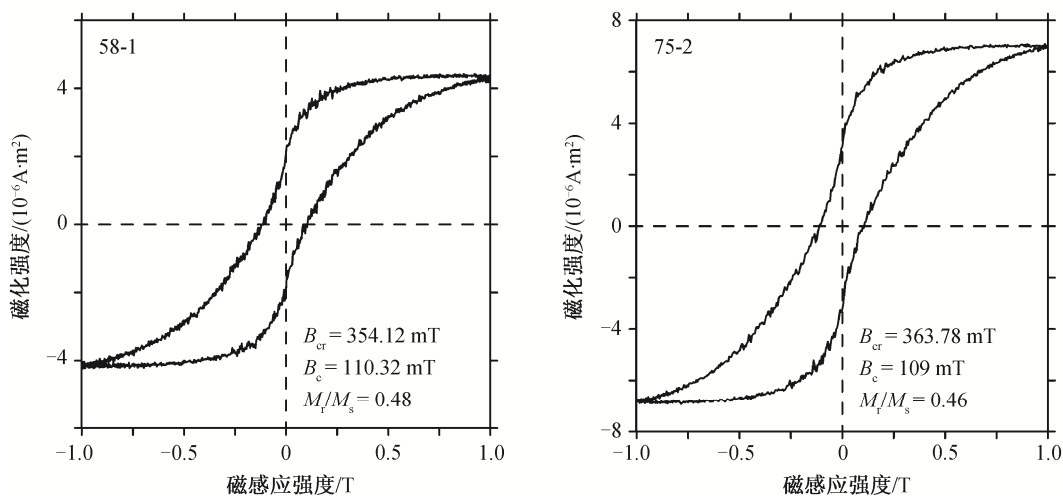
刘家沟组红层样品的磁滞回线全部为细腰型(图 3)。细腰型磁滞回线通常是由矫顽力差异较大的两种磁成分引起的。同一种磁性矿物的不同颗粒混合(如单畴+超顺磁,或单畴+准单畴/多畴的磁铁矿)或者不同磁性矿物的混合(如磁铁矿+赤铁矿)都会造成这种矫顽力差异^[32-34]。磁铁矿的矫顽力一般为数十毫特^[35],赤铁矿的矫顽力一般可达数百毫特^[36]。刘家沟组红层样品的矫顽力均在 100 mT 以上。结合 χ - T 曲线分析,我们认为刘家沟组细腰型



χ/χ_N 表示磁化率与初始常温磁化率之比, 小图为加热曲线

图 2 刘家沟组代表性样品的 $\chi-T$ 曲线

Fig. 2 $\chi-T$ curves of representative specimens of Liujiagou Formation



B_{cr} : 剩磁矫顽力(由等温剩磁反向场退磁曲线确定); B_c : 矫顽力; M_r : 饱和剩余磁化强度; M_s : 饱和磁化强度

图 3 刘家沟组代表样品磁滞回线

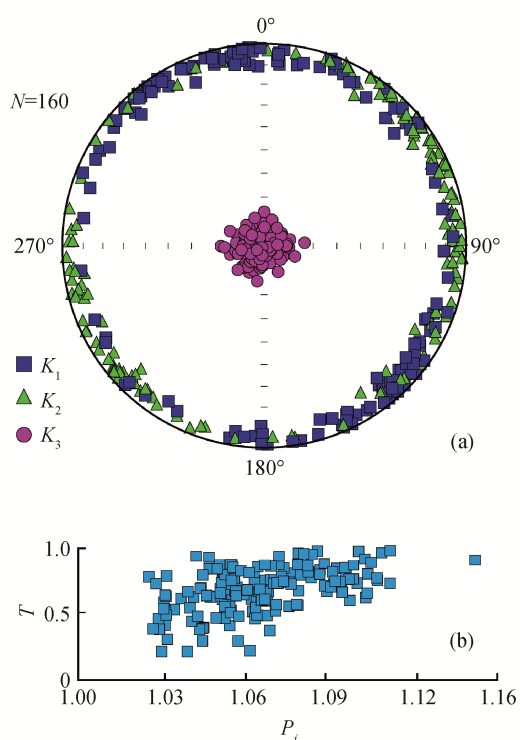
Fig. 3 Hysteresis loops of representative specimens from Liujiagou Formation

磁滞回线是由于赤铁矿和磁铁矿混合所致。鉴于磁铁矿的磁化率是赤铁矿的 1000 多倍^[35], 可认为载磁矿物以赤铁矿为主。

综合 $\chi-T$ 曲线及磁滞回线结果可以发现, 沁水盆地地下三叠统刘家沟组红层样品的主要载磁矿物是赤铁矿, 并含少量磁铁矿。

2.2 磁组构(AMS)分析

对 20 个采样点的 160 块样品进行岩石磁组构(AMS)测试(图 4)。在地层坐标系下, 磁化率各向异性椭球体最小轴(K_3)位于投影中心, 中间轴(K_2)轴和最大轴(K_1)轴沿基圆随机分布, 表明采样剖面具有典型的静水沉积磁组构特征, 且未遭受后期的构造



T 为磁化率各向异性椭球体形状因子, P_j 为修正的各向异性度

图 4 层面坐标系下磁化率各向异性椭球主轴方向的赤平投影(a)和 Jelinek 图解(b)

Fig. 4 Stereoplots of three principal axes of AMS (a) and Jelinek plots (b)

变形。样品的平均各向异性度为 1.06, 符合正常沉积岩的各向异性度^[37-39]。

2.3 热退磁及特征剩磁方向

对刘家沟组红层 20 个采样点的 194 块古地磁样品进行系统热退磁实验, 各采样点退磁样品数为 8~11 块。样品退磁曲线表现出双分量的特征, 低温分量在 300℃ 以下拟合, 高温分量自 500℃ 之后开始拟合(图 5)。可分离稳定高温分量样品的解阻温度均在 650℃ 以上。

2.3.1 低温分量

从 175 块样品中分离出稳定的低温分量, 经过 Fisher 平均后, 得到低温分量方向 $D_g = 1.2^\circ$, $I_g = 52.1^\circ$, $k_g = 78.1$, $\alpha_{95} = 1.2^\circ$ 。经地层校正后, $D_s = 0.5^\circ$, $I_s = 50.6^\circ$, $k_s = 44.8$, $\alpha_{95} = 1.6^\circ$ 。该分量在地理坐标系下更集中, 并与现今地磁场方向($D = 355.1^\circ$, $I = 54.8^\circ$)相近。我们认为低温分量记录的是现代地磁场黏滞剩磁。

2.3.2 高温特征剩磁分量

从 15 个采样点的 132 块样品中分离出稳定的高温分量(表 1)。65, 66, 68 和 69 这 4 个采样点中,

部分样品未分离出稳定的高温分量, 或者, 虽然可以分离出高温分量, 但剩磁方向与现代地磁场方向一致, 故未纳入统计。另外, 采样点 63 和 64 中只有少数样品可以分离出稳定的高温分量, 考虑到这两个采样点距离相近, 将其视为一个采样点进行统计。实验结果显示, 11 个采样点(99 块样品)表现出正极性, 4 个采样点(33 块样品)表现出负极性。对样品进行采样点水平的 Fisher 平均, 得到各采样点的平均方向。对各采样点的平均方向再进行 Fisher 平均, 得到总体的平均方向(图 6)。计算古纬度时, 先求出每个采样点对应的虚地磁极(virtual geomagnetic pole, VGP), 然后对所有的 VGP 进行 Fisher 平均, 求出古地磁极, 最后通过古地磁极计算出参考点的古纬度。

在地理坐标系下, 刘家沟组红层的高温分量方向为 $D_g = 318.7^\circ$, $I_g = 32.9^\circ$, $k = 23.3$, $\alpha_{95} = 8.1^\circ$ 。在地层坐标系下, 刘家沟组红层的高温分量方向为 $D_s = 318.8^\circ$, $I_s = 30.9^\circ$, $k = 32.1$, $\alpha_{95} = 6.9^\circ$, 对应的古地磁极为 49.3°N , 5.5°E ($A_{95} = 6.7^\circ$), 参考点(36.1°N , 112.6°E)的古纬度为 16.9°N 。

本文研究的 3 个剖面产状各异, 故对 15 个采样点进行褶皱检验。McFadden 褶皱检验^[40]结果显示, 在地理坐标系下 $\zeta_2 = 3.502$, 经过地层校正后 $\zeta_2 = 0.916$; 在大约 100% 展开时获得方向的最大集中, 此时 $\zeta_1 = 0.800$ 。由于这两个 ζ_2 值均小于 95% 置信水平上的临界值 4.510 ($N = 15$), 即在地层校正前后, 剩磁方向的集中程度均受构造因素影响较小, 故很难判断剩磁的获得时间。Watson-Enkin 褶皱检验^[41]结果显示, 地层逐步展平至 132.9% 时, 古地磁方向精度参数 k 值最大, 95% 置信区间为 [105%, 146.2%] (图 7), 表明该特征剩磁方向很有可能是褶皱前获得的。该地区刘家沟组地层虽然倾向变化明显, 但倾角平缓, 野外测得地层倾角区间为 $[4^\circ, 11^\circ]$, 这可能是褶皱检验结果不显著的根本原因。总之, 从地层逐步展平过程中特征剩磁方向的集中程度单调增加的特点来看, 该剩磁方向在一定程度上通过了褶皱检验。

对特征剩磁组分进行倒转检验。Watson 检验^[42]结果显示, 两组数据的 Watson 统计量 $V_w = 5.2$, 小于临界值 $V_c = 7.4$ (图 8), 指示正负极性数据的平均值在 95% 置信水平上相一致, 通过该倒转检验。McFadden-McElhinny 倒转检验^[43]结果显示, 刘家沟组样品正极性剩磁平均方向与负极性剩磁平

表 1 沁水盆地刘家沟组特征剩磁分量数据
Table 1 Site mean paleomagnetic directions of the Liujiagou Formation in Qinshui Basin, Shanxi Province

剖面	采样点	岩性	$\lambda_s/(^\circ)$	$\varphi_s/(^\circ)$	DD($^\circ$)	Dip($^\circ$)	n/n_0	R/N	$D_g/(^\circ)$	$I_g/(^\circ)$	$D_s/(^\circ)$	$I_s/(^\circ)$	k(K)	$\alpha_{95}(A_{95})/(^\circ)$	$\lambda_p/(^\circ)$	$\varphi_p/(^\circ)$
安泽	58	砂岩	36.2	112.4	10.2	4.0	10/10	0/10	301.0	36.5	303.7	35.0	56.2	6.5	38.2	19.3
	59	砂岩	36.2	112.4	10.2	4.0	10/10	0/10	304.2	23.9	305.7	22.2	32.5	8.6	35.4	9.9
	60	砂岩	36.2	112.4	343.2	5.0	8/10	0/8	318.5	31.3	319.6	26.8	43.4	8.5	47.8	1.6
	61	砂岩	36.2	112.4	37.2	7.0	10/10	0/10	335.4	46.3	341.3	42.6	33.3	8.5	70.3	352.0
沁水	62	砂岩	35.9	112.2	117.3	9.0	10/10	10/0	117.0	-19.7	117.0	-28.7	32.5	8.6	30.6	19.4
	63+64	砂岩	35.9	112.2	131.3	7.0	6/17	7/0	136.0	-21.9	137.0	-29.8	90.0	7.1	47.0	6.1
	65+66	砂岩	35.9	112.2	136.0	7.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	67	砂岩	35.9	112.2	123.3	11.0	6/8	6/0	135.5	-7.8	136.0	-18.5	33.1	11.8	44.3	359.1
长子	68+69	砂岩	36.1	112.6	11.0	8.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70	砂岩	36.1	112.6	249.1	5.0	10/10	10/0	130.0	-40.2	126.0	-37.6	23.8	10.1	40.9	20.2
	71	砂岩	36.1	112.6	300.1	4.0	10/10	0/10	341.0	46.9	338.4	43.9	38.3	7.9	68.8	359.3
	72	砂岩	36.1	112.6	321.1	5.0	10/10	0/10	329.4	32.9	329.0	28.0	56.2	6.5	55.2	353.3
平均值(地理坐标系)	73	砂岩	36.1	112.6	314.1	5.0	8/10	0/8	317.3	19.6	317.2	14.6	55.5	7.5	41.6	356.9
	74	砂岩	36.1	112.6	314.1	5.0	10/10	0/10	311.4	27.8	311.5	22.8	70.3	5.8	40.2	6.2
	75	砂岩	36.1	112.6	300.1	7.3	8/10	0/8	331.4	34.9	329.2	28.6	45.5	8.3	55.6	353.5
	76	砂岩	36.1	112.6	300.1	11.0	8/10	0/8	327.3	41.1	323.8	31.2	23.4	11.7	52.6	1.3
平均值(地层坐标系)	77	砂岩	36.1	112.6	300.1	11.0	8/11	0/8	344.6	52.2	336.6	43.8	16.2	14.2	67.4	1.6
	平均值(地理坐标系)					15/20	33/99		318.7	32.9			23.3	8.1		
平均值									318.8	30.9			32.1	6.9		
									(34.3)	(6.6)			49.3			5.5

说明: λ_s 和 φ_s 分别表示采样点的纬度和经度; DD 表示地层倾向; Dip 表示地层倾角; n/n_0 表示参与统计的样品个数/退磁样品数; R/N 表示负极性样品数/正极性样品数; D_g 和 I_g 分别表示地理坐标系下的偏角和倾角; D_s 和 I_s 分别表示地层校正后的偏角和倾角; k(K) 表示 Fisher 统计精度参数; $\alpha_{95}(A_{95})$ 表示 95% 置信圆锥半顶角; λ_p 和 φ_p 分别表示虚地磁极的纬度和经度。

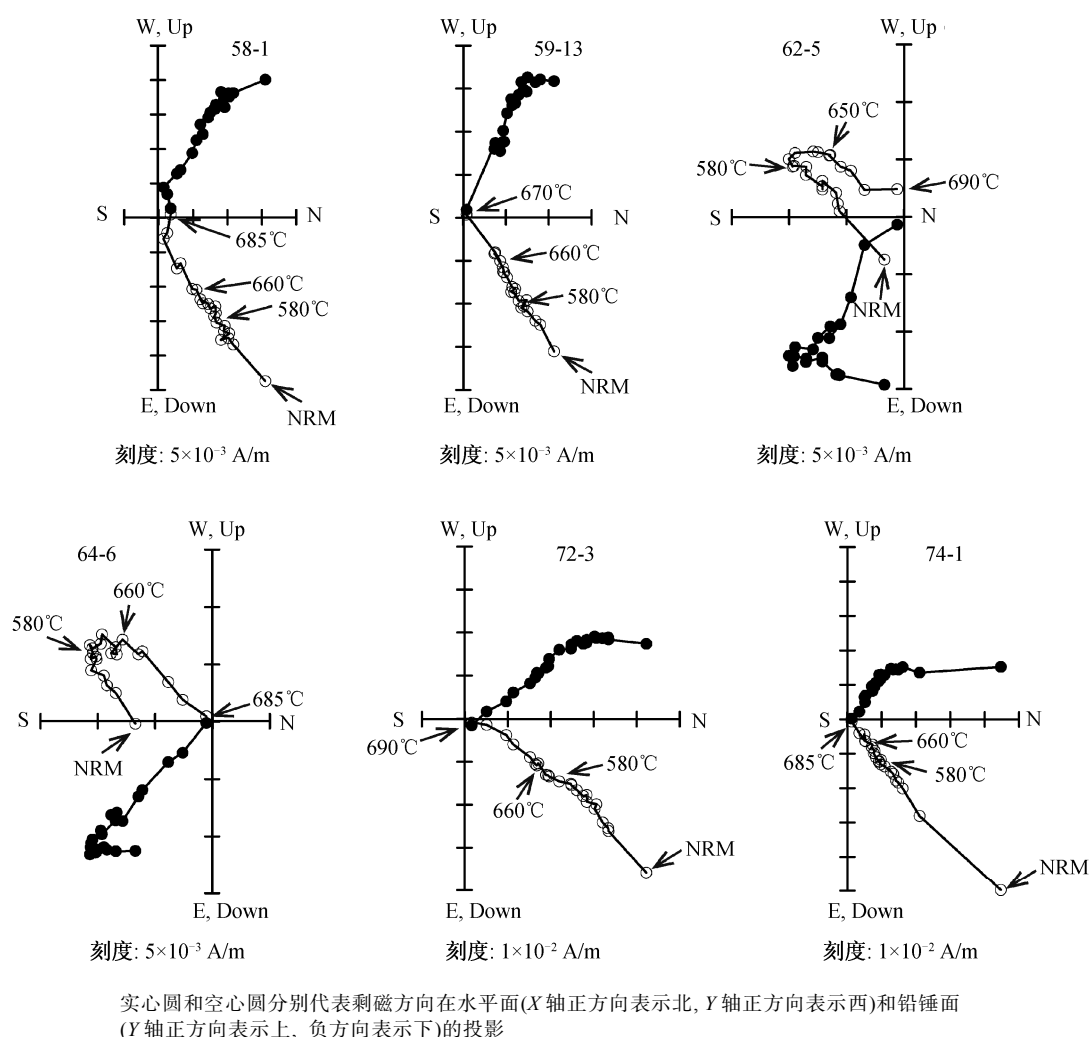
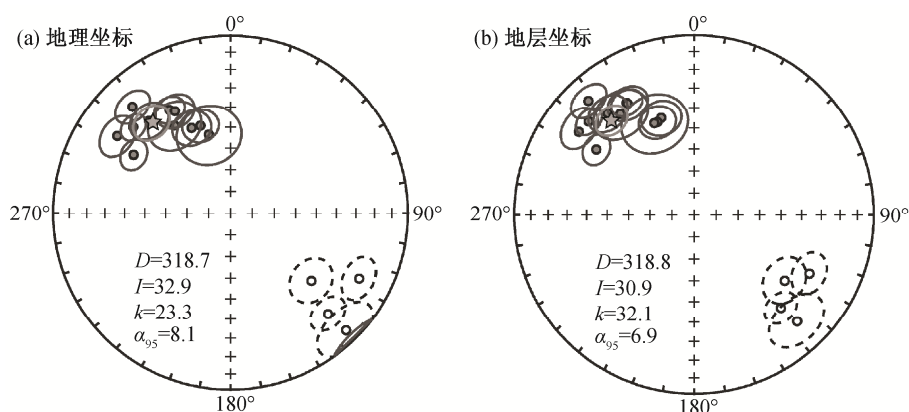


图 5 地理坐标系下刘家沟组代表样品退磁曲线的正交矢量投影

Fig. 5 Orthogonal (zijderveld) vector plots of representative specimens from Liujiagou Formation (*in situ*)



五角星表示对所有采样点平均后得到的平均方向, 实心圆和空心圆分别表示正极性和负极性采样点方向, 实线圆圈和虚线圆圈分别表示正极性和负极性采样点方向 95% 置信圆; D 表示磁偏角, I 表示磁倾角; k 表示 Fisher 统计精度参数, α_{95} 表示 95% 置信圆锥半顶角

图 6 刘家沟组样品高温特征剩磁方向的地理坐标系(a)及地层坐标系(b)等面积投影图

Fig. 6 Equal-area projections of site-mean directions of the ChRMs before (a) and after (b) tilt correction

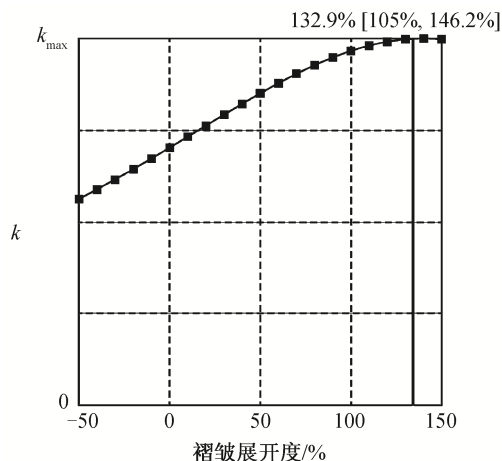
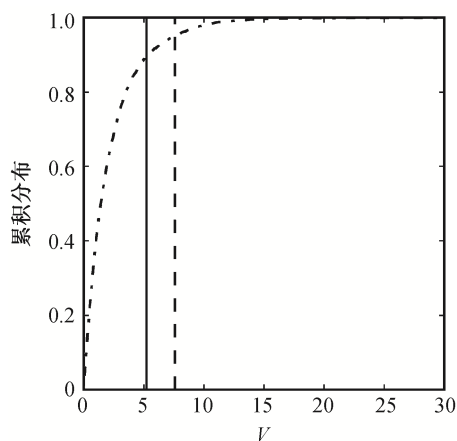


图 7 Watson-Enkin 褶皱检验结果
Fig. 7 Result of Watson-Enkin's fold test



点画线: Watson 统计量累积分布曲线; 实线: 刘家沟组正负极性样品 Watson 统计量(V_w); 虚线: Watson 统计量临界值(V_c)

图 8 刘家沟组 Watson 统计量累积分布
Fig. 8 Watson's V cumulative distribution from Monte Carlo simulation

均方向的夹角 $\gamma_0 = 11.7^\circ$, 小于计算得到的临界值 $\gamma_c = 13.7^\circ$, 通过 C 级倒转检验。

3 讨论

3.1 E/I 校正

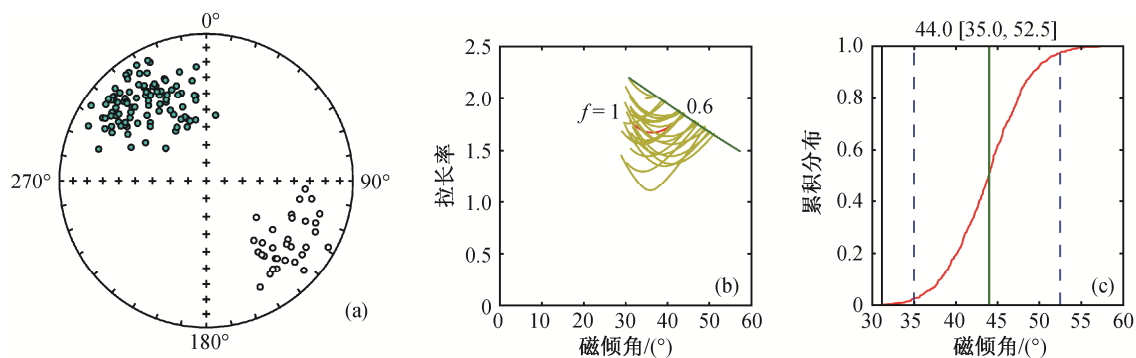
Tauxe 等^[12]提出基于地磁场长期变化模型的磁倾角浅化误差校正方法—— E/I 校正方法, 在古地磁研究中得到广泛应用。该方法的原理是通过不断调整 f 值, 使得实际数据的 $E-I$ 关系与 TK03.GAD 模型下的 $E-I$ 关系相符合, 二者吻合程度最佳时的 f 值即为该组古地磁数据的浅化因子, I 的置信区间则由解靴带法确定。使用 E/I 方法进行校正必须满足两个前提条件: 首先, 样品磁化方向的离散只能是由地磁场长期变化或者是由符合磁倾角异常方程

的磁倾角浅化引起的; 其次, 由地磁场变化产生的方向分布满足 TK03.GAD 模型。根据 Tauxe 等^[13]对 E/I 方法使用范围(如年代、样品数)的详细分析, E/I 方法对中生代以来的地层均适用, 并且, 当数据量大于 100 时, 可以获得合理的置信区间。本文得到的下三叠统刘家沟组特征剩磁受其他因素的影响不明显, 且数据量足够($N=132$), 因此可以使用 E/I 方法对刘家沟组的磁倾角浅化现象进行有效的识别与校正。

通过 E/I 校正, 得到刘家沟组浅化因子 $f = 0.6$ (图 9)。校正后的方向为 $D = 318.8^\circ$, $I = 44.0^\circ$, 古纬度为 25.8°N , 对应的古地磁极为 53.5°N , 18.0°E (参考点为 36.1°N , 112.6°E)。从校正结果看, 刘家沟组红层样品倾角校正前为 30.9° , 校正后为 44.0° , 二者相差 13.1° , 对应的古纬度从 16.9°N 提高到 25.8°N 。

以往的研究表明, 岩性类似的岩石单元, 倾角浅化的程度往往也相似^[44]。华北地块下、中三叠统地层整体上为一套紫红色、灰紫色砂泥岩沉积, 在岩性上表现出较高的稳定性和一致性^[45-46]。中三叠世之后, 由于受印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动影响, 华北地区沉积环境不断发生变化, 各时期沉积岩的岩性和岩相有所不同^[45,47-48], 并在侏罗纪和白垩纪沉积了与下、中三叠统相似的红层^[49]。从以往对侏罗系和白垩系红层的古地磁研究^[50-51]来看, 这些时期红层的解阻温度一般在 650°C 以上, 说明三叠系、侏罗系及白垩系红层的携磁矿物基本上相同, 均为碎屑成因的大颗粒赤铁矿^[52]。除中生界之外, 华北地块上二叠统石盒子组和石千峰组也有红层发育, 研究报道的解阻温度高低不等。Zhao 等^[53]和 Embleton 等^[54]对华北上二叠统的古地磁学研究表明, 解阻温度较高(650°C 以上)红层的特征剩磁可作为晚二叠世原生剩磁, 可能是与中生界一致的碎屑剩磁。解阻温度较低红层的特征剩磁往往是重磁化的结果^[55], 可能为化学剩磁。事实上, Tan 等^[56]指出, 即便红层携带的是重磁化的化学剩磁, 也可能受到倾角浅化问题的影响。由于本文更关注华北红层的磁学共性, 故对该问题不做深入讨论。

综上所述, 我们认为华北地块的下、中三叠统, 乃至晚古生代至中生代的所有红层, 均可能存在与沁水盆地刘家沟组红层类似程度的磁倾角浅化现象。然而, 各时期的浅化因子是否完全与刘家沟组



(a) E/I 校正后样品高温分量等面积投影图, 实心圆表示正极性, 空心圆表示负极性; (b) 求解得到浅化因子 $f=0.6$; (c) E/I 校正后磁倾角及 95% 置信区间, 黑色和绿色直线分别表示校正前后磁倾角, 蓝色虚线表示校正后磁倾角的 95% 置信区间, 红线为磁倾角的累计分布曲线

图 9 刘家沟组 E/I 校正结果

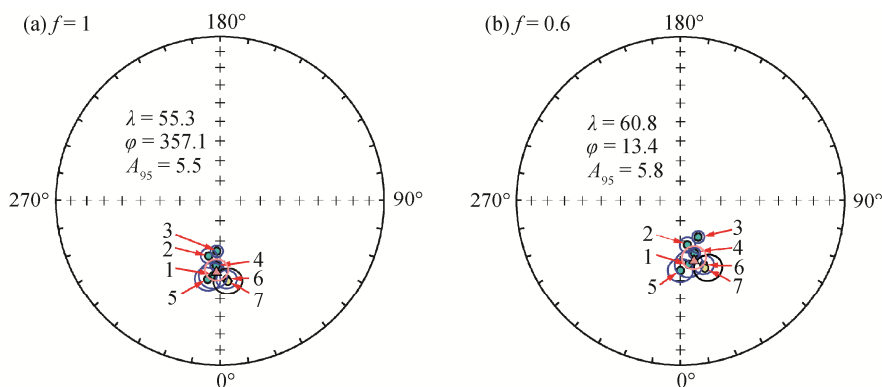
Fig. 9 The E/I correction for the chRM from Early Triassic Liujiagou Formation

表 2 华北地块早三叠世古地磁极位置

Table 2 Summary of available Early Triassic paleomagnetic poles for the North China Block

编号	岩性	$\lambda_p/(\circ)$	$\varphi_p/(\circ)$	$S(N)$	$\lambda_p/(\circ)$	$\varphi_p/(\circ)$	$\lambda_p^*/(\circ)$	$\varphi_p^*/(\circ)$	$A_{95}(dp/dm)$	文献	Q
1	碎屑岩	38.6	112.0	7	52.1	354.6	58.0	7.4	(5.0/9.1)	[59]	5
2	红层	35.5	110.2	16(93)	61.9	348.3	67.8	8.9	3.8	[61]	5
3	红层	36.3	110.8	10(41)	64.8	356.3	69.9	26.0	3.0	[58]	7
4	砂岩	35.5	110.3	32	57.6	356.5	63.0	15.0	(2.1/3.8)	[51]	7
5	红色页岩, 泥岩	37.8	112.3	(25)	50.0	351.0	55.1	359.9	6.0	[54]	7
6	砂岩	37.6	112.0	14(79)	50.3	4.8	55.8	20.1	4.8	[63]	6
7	砂岩	36.1	112.6	15(132)	49.3	5.5	54.2	19.9	6.7	本文	7
平均值(原始数据)					55.3	357.1			5.5		
平均值(磁倾角校正后)							60.8	13.4	5.8		

说明: $S(N)$ 表示采样点数(样品数); λ_p^* 和 φ_p^* 分别表示使用浅化因子 $f=0.6$ 校正后的古地磁极纬度和经度; dp/dm 表示 95% 置信椭圆的半短轴/半长轴; Q 为 Van der Voo 等^[62] 提出的古地磁数据可靠性指数; 其余同表 1。



(a) 未经 E/I 校正古地磁极位置, (b) 使用浅化因子 $f=0.6$ 进行校正后得到的古地磁极位置; 三角形、点和圆圈分别表示平均极位置、极位置和置信圆; 序号同表 2

图 10 华北地块早三叠世古地磁极位置

Fig. 10 Equal area plot of Early Triassic paleomagnetic poles for the North China Block

的浅化因子($f = 0.6$)相同, 需要通过今后的工作来确定。同时, 该 f 值与前人在全球范围内得到的浅化因子平均值^[8]基本上一致, 说明华北地块的红层磁倾角浅化特征在全球范围内也是可对比的。

3.2 磁倾角浅化校正后的华北地块早三叠世古地磁极及其指示意义

前人对华北地块早三叠世开展了一系列古地磁学研究, 采样地点包括辽宁和山东^[57]、山西^[54,57-60]和陕西^[51,61]等。为了更准确地确定华北地块早三叠世的古位置, 本文根据 Van der Voo^[62]提出的古地磁可靠性判据, 挑选 $Q \geq 4$ 的古地磁极进行平均(表 2, 图 10(a))。Lin^[57]的古地磁极数据与其他研究得到的华北早三叠世古地磁极差别较大, 未被使用。因其采样位置靠近郯城-庐江断裂, 可能发生了局部旋转^[61,63]。谈晓冬等^[60]所得数据也未使用, 因其样品数太少, 且出现反磁组构现象, 可能遭受了构造活动的影响。

对前人及本文的原始古地磁数据进行 Fisher 平均, 得到华北地块早三叠世古地磁极位置 55.3°N , 357.1°E ($A_{95} = 5.5^\circ$)。从前人及本文获得的古地磁数据分布来看, 这些古地磁极位置没有显著的差别。本文旨在从宏观上讨论华北地块早三叠世的位置, 有关前人研究中太行地块相对于鄂尔多斯地块的旋转问题^[61,63], 在此不做深入讨论。

使用本文获得的刘家沟组浅化因子 $f = 0.6$, 对华北地块早三叠世古地磁极数据分别进行校正, 并对校正后得到的古地磁极进行 Fisher 平均, 得到经过倾角浅化校正后的古地磁极 60.8°N , 13.4°E ($A_{95} =$

5.8°)(表 2, 图 10(b))。

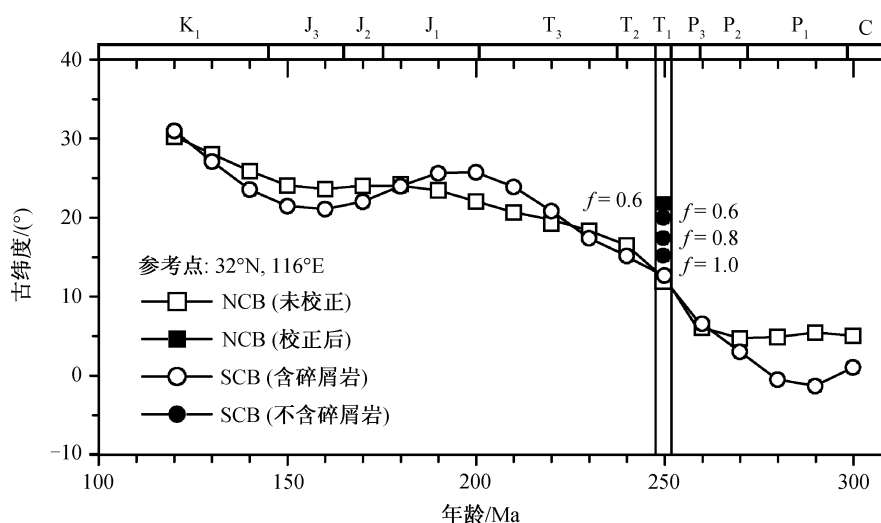
华北地块古地磁极位置的显著变化, 一方面意味着早三叠世时华北地块的古纬度由校正前的约 12°N 提高到约 22°N (东部参考点 32°N , 116°E); 另一方面还可能促成对其与周边地块的相对构造关系等的新认识。比如, 本文在 Huang 等^[64]收集的华南地块早三叠世古地磁数据基础上, 剔除两个可能存在显著磁倾角浅化的碎屑岩数据, 对余下主要来自灰岩的 7 个数据进行平均(表 3), 得到华南地块早三叠世古地磁极 44.2°N , 216.4°E ($A_{95} = 2.5^\circ$)。

在华北地块与华南地块缝合带东部的参考点 (32°N , 116°E) 上对比发现, 华北地块校正前古纬度为 $11.7^\circ\text{N} \pm 7.1^\circ$, 校正后为 $21.9^\circ\text{N} \pm 6.3^\circ$; 华南地块古纬度为 $15.1^\circ\text{N} \pm 3.1^\circ$ 。校正前后, 华北地块与华南地块的纬度差 Δ 分别为 $-3.4^\circ \pm 4.3^\circ$ 和 $6.8^\circ \pm 4.5^\circ$ (表 3, 图 11)。从华北地块倾角变浅校正后的结果看, 早三叠世华北地块与华南地块似乎还存在一定的纬度差。然而, 诸多与俯冲碰撞相关的研究结果(如苏鲁-大别超高压榴辉岩的变质年龄为约 250~230 Ma^[71-72]、华南地块在中三叠世已发育前陆盆地沉积^[73]等)表明, 在东部, 华北地块与华南地块早三叠世已经拼合。因此, 上述纬度差可能并不代表华北地块和华南地块早三叠世时在其东部尚未对接, 而是指示华南地块下三叠统灰岩同样存在倾角浅化现象, 使得华南地块古纬度偏低。前人对灰岩的磁倾角浅化问题存在不同观点^[7,74]。Torsvik 等^[23]和 Van der Voo 等^[24]在古地理重建中未对灰岩进行倾角变浅校正。但是, 有研究表明灰岩确实存在一

表 3 华南地块早三叠世古地磁极位置
Table 3 Summary of Early Triassic paleomagnetic poles for the South China Block

编号	岩性	$\lambda_s/(\circ)$	$\phi_s/(\circ)$	$S(N)$	$\lambda_p/(\circ)$	$\phi_p/(\circ)$	$A_{95}(\text{dp/dm})$	文献	Q	古纬度	Δ
1	海洋沉积物	28.6	106.9	9(47)	46.3	219.2	10.9	[65]	5		
2	海洋沉积物	28.9	104.9	6	43.3	211.7	(3.3/6.4)	[66]	5		
3	海洋沉积物	29.9	107.0	9	39.8	216.2	(2.7/5.3)	[66]	5		
4	灰岩	29.3	107.7	(88)	44.3	217.4	3.5	[67]	5		
5	灰岩	32.1	106.2	8(64)	42.5	214.6	(3.2/6.1)	[68]	5		
6	灰岩	29.6	103.4	3(94)	48.8	218.7	(1.8/3.6)	[69]	3		
7	灰岩	28.9	105.0	19(94)	44.1	217.2	4.9	[70]	7		
平均值($f = 1.0$)					44.2	216.4	2.5			$15.1^\circ\text{N} \pm 3.1^\circ$	$6.8^\circ \pm 4.5^\circ$
平均值($f = 0.6$)					46.8	210.7	2.8			$19.8^\circ\text{N} \pm 3.2^\circ$	$2.1^\circ \pm 4.6^\circ$
平均值($f = 0.8$)					45.2	214.3	2.6			$16.8^\circ\text{N} \pm 3.1^\circ$	$5.0^\circ \pm 4.5^\circ$

说明: 修改自文献[64]; 古纬度参考点(32°N , 116°E); Δ 表示华北地块与华南地块纬度差; 其余同表 2。



实心方块表示华北地块倾角变浅改正后的古纬度, 实心圆表示华南地块剔除碎屑岩后的古纬度

图 11 华北地块与华南地块纬度变化(改自文献[64])

Fig.11 Paleolatitude versus age according to various paleomagnetic data for North China Block and South China Block (modified from Ref. [64])

定程度的磁倾角浅化现象, 如 Kodama^[75]得到北美宾夕法尼亚西南石炭系 Glenshaw 组灰岩和粉砂岩的浅化因子 $f = 0.65$, Yi 等^[76]得到藏南特提斯喜马拉雅岗巴地区的古近纪宗浦组灰岩的浅化因子 $f = 0.7$ 。为此, 我们尝试用 $f = 0.6$ 和 $f = 0.8$ 分别对华南下三叠统灰岩进行倾角变浅改正, 得到华南地块经过磁倾角浅化校正后的古地磁极和古纬度(表 3, 图 11)。使用浅化因子 $f = 0.6$ 对华南地块早三叠世古地磁极进行磁倾角浅化校正后, 华北地块与其没有明显的纬度差($\Delta = 2.1^\circ \pm 4.6^\circ$); 使用浅化因子 $f = 0.8$ 校正后, 尽管仍有一定的纬度差($\Delta = 5.0^\circ \pm 4.5^\circ$), 但非常接近 95% 的置信范围。因此, 我们推测华南地块下三叠统灰岩浅化因子介于 0.6~0.8 之间。然而, 其磁倾角浅化的实际程度有待进一步研究。

4 结论

1) 采样剖面下三叠统刘家沟组红层中的载磁矿物主要是赤铁矿, 并含少量磁铁矿。AMS 表现为典型的静水沉积组构特征。

2) E/I 校正结果显示, 刘家沟组红层中磁倾角浅化现象明显, 浅化因子 f 值为 0.6。在不考虑倾角变浅的情况下, 得到华北地块早三叠世古地磁极为 49.3°N , 5.5°E ($A_{95} = 6.9^\circ$), 经过 E/I 校正后, 得到采样剖面的古地磁极为 53.5°N , 18.0°E 。

3) 本文获得的刘家沟组红层古地磁极与前人

数据具有很好的一致性。如果考虑磁倾角浅化现象, 华北地块早三叠世的古纬度显著提高约 10° 。尽管华北地块二叠纪、三叠纪及侏罗纪的古地磁极数据均来自陆相碎屑岩, 但本文从沁水盆地地下三叠统刘家沟组红层中得到的磁倾角浅化因子 ($f = 0.6$) 是否适用于该地块其他时代的沉积物, 有待进一步研究。

4) 经过磁倾角浅化校正后, 早三叠世时华北地块与华南地块在东部存在一定的纬度差。该纬度差可能并不意味着二者当时在东部还未拼合, 而是指示华南地块下三叠统灰岩同样存在显著的磁倾角浅化效应, 使其纬度偏低。华南地块下三叠统灰岩倾角浅化的实际程度有待进一步研究。

参考文献

- [1] Verosub K L. Depositional and postdepositional processes in the magnetization of sediments. *Reviews of Geophysics*, 1977, 15(2): 129-143
- [2] Tan X, Kodama K P, Fang D. Laboratory depositional and compaction-caused inclination errors carried by haematite and their implications in identifying inclination error of natural remanence in red beds. *Geophysical*, 2002, 151(2): 475-486
- [3] Tauxe L, Kent D V. Properties of a detrital remanence carried by haematite from study of modern river deposits and laboratory redeposition experiments.

- Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1984, 76(3): 543–561
- [4] Kent D V, Tauxe L. Corrected Late Triassic latitudes for continents adjacent to the North Atlantic. *Science*, 2005, 307: 240–244
- [5] Arason P, Levi S. Compaction and inclination shallowing in deep-sea sediments from the Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(B4): 4501–4510
- [6] King R F. The remanent magnetism of artificially deposited sediments. *Geophysical Journal*, 1955, 7 (suppl 3): 115–134
- [7] Tauxe L, Butler R F, Van der Voo R, et al. *Essentials of paleomagnetism*. Berkeley: University of California Press, 2010
- [8] Bilardello D, Kodama K P. Rock magnetic evidence for inclination shallowing in the early Carboniferous Deer Lake Group red beds of western Newfoundland. *Geophysical Journal International*, 2010, 181(1): 275–289
- [9] Hodych J P, Buchan K L. Early Silurian palaeolatitude of the Springdale Group redbeds of central Newfoundland: a palaeomagnetic determination with a remanence anisotropy test for inclination error. *Geophysical Journal International*, 1994, 117(3): 640–652
- [10] Jackson M. Anisotropy of magnetic remanence: a brief review of mineralogical sources, physical origins, and geological applications, and comparison with susceptibility anisotropy. *Pure and Applied Geophysics*, 1991, 136(1): 1–28
- [11] Tan X, Kodama K P. An analytical solution for correcting palaeomagnetic inclination error. *Geophysical Journal International*, 2003, 152(1): 228–236
- [12] Tauxe L, Kent D V. A simplified statistical model for the geomagnetic field and the detection of shallow bias in paleomagnetic inclinations: was the ancient magnetic field dipolar?. *Geophysical Monograph*, 2004, 145: 101–115
- [13] Tauxe L, Kodama K P, Kent D V. Testing corrections for paleomagnetic inclination error in sedimentary rocks: a comparative approach. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 2008, 169: 152–165
- [14] Zhao X, Coe R S. Palaeomagnetic constraints on the collision and rotation of North and South China. *Nature*, 1987, 327: 141–144
- [15] Enkin R J, Yang Z, Chen Y, et al. Paleomagnetic constraints on the geodynamic history of the major blocks of China from the Permian to the present. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B10): 13953–13989
- [16] Ding J, Zhang S, Chen W, et al. Paleomagnetism of the Oligocene Kangtuo Formation red beds (Central Tibet): inclination shallowing and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 104(1): 55–68
- [17] Tan X, Gilder S, Kodama K P, et al. New paleomagnetic results from the Lhasa block: revised estimation of latitudinal shortening across Tibet and implications for dating the India-Asia collision. *Earth & Planetary Science Letters*, 2010, 293(3): 396–404
- [18] Huang W, Dupontnivet G, Lippert P C, et al. Inclination shallowing in Eocene Linzizong sedimentary rocks from Southern Tibet: correction, possible causes and implications for reconstructing the India-Asia collision. *Geophysical Journal International*, 2013, 194 (3): 1390–1411
- [19] 方大钧, 沈忠悦, 谈晓冬. 塔里木地块库车坳陷早白垩世古地磁结果及磁倾角偏低的成因探讨. *地球物理学报*, 2001, 44(1): 72–82
- [20] Wang B, Yang Z. Late Cretaceous paleomagnetic results from southeastern China, and their geological implication. *Earth & Planetary Science Letters*, 2007, 258(1): 315–333
- [21] Sun Z, Yang Z, Yang T, et al. New Late Cretaceous and Paleogene paleomagnetic results from south China and their geodynamic implications. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(B3): 1581–1600
- [22] 赵千. 四川盆地早白垩世红层磁倾角偏低问题研究[D]. 西安: 西北大学, 2016
- [23] Torsvik T H, Van der Voo R, Preeden U, et al. Phanerozoic polar wander, palaeogeography and dynamics. *Earth-Science Reviews*, 2012, 114(3): 325–358
- [24] Van der Voo R, Van Hinsbergen D J J, Domeier M, et al. Latest Jurassic-earliest Cretaceous closure of the Mongol-Okhotsk Ocean: a paleomagnetic and seismological-tomographic analysis. *Geological Society of America Special Papers*, 2015, 513: 589–606
- [25] 黄宝春, 周桃秀, 朱日祥. 从古地磁研究看中国大陆形成与演化过程. *地学前缘*, 2008, 15(3): 348–359
- [26] 中国地质图集编委会. *中国地质图集*. 北京: 地质

- 出版社, 2002
- [27] 杨振宇, 马醒华, 孙知明, 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 1): 1-16
- [28] 刘超, 张庆龙, 葛荣峰, 等. 山西沁水盆地东缘太行大断裂构造变形特征及其成因探讨. 地质学刊, 2011, 35(2): 113-122
- [29] 承金, 汪新文, 王小牛. 山西沁水盆地热史演化特征. 现代地质, 2009, 23(6): 1093-1099
- [30] 山西省质矿产局. 山西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1989
- [31] Kirschvink J L. The least-squares line and plane and the analysis of palaeomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1980, 62(3): 699-718
- [32] 敖红, 刘彩彩, 邓成龙. 泥河湾盆地大长梁剖面河湖相沉积序列的细腰磁滞回线性质及其环境意义. 第四纪研究, 2007, 27(6): 1072-1080
- [33] Deng C, Zhu R, Verosub K L, et al. Mineral magnetic properties of loess/paleosol couplets of the central loess plateau of China over the last 1.2 Myr. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(1): 241-262
- [34] Roberts A P, Cui Y, Verosub K L. Wasp-waisted hysteresis loops: mineral magnetic characteristics and discrimination of components in mixed magnetic systems. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100 (B9): 17909-17924
- [35] O'Reilly W. Rock and mineral magnetism. Glasgow: Blackie, 1984
- [36] Banerjee S K. New grain size limits for palaeomagnetic stability in haematite. *Nature*, 1971, 232(27): 15-16
- [37] Parés J M, Ba V D P, Dinarès J. Evolution of magnetic fabrics during incipient deformation of mudrocks (Pyrenees, Northern Spain). *Tectonophysics*, 1999, 307(1): 1-14
- [38] Borradaile G J, Henry B. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth-Science Reviews*, 1997, 42(1): 49-93
- [39] Kodama K P. *Paleomagnetism of Sedimentary Rocks: Process and Interpretation*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012
- [40] Mcfadden P L. A new fold test for palaeomagnetic studies. *Geophysical Journal International*, 1990, 103 (1): 163-169
- [41] Watson G S, Enkin R J. The fold test in paleomagnetism as a parameter estimation problem. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(19): 2135-2137
- [42] Watson G S. Large sample theory of the Langevin distribution. *Journal of Statistical Planning & Inference*, 1983, 8(3): 245-256
- [43] McFadden P L, McElhinny M W. Classification of the reversal test in palaeomagnetism. *Geophysical Journal International*, 1990, 103(3): 725-729
- [44] Domeier M, Van der Voo R, Torsvik T H. Paleomagnetism and Pangea: The road to reconciliation. *Tectonophysics*, 2012, 514: 14-43
- [45] 彭兆蒙, 吴智平. 华北地区三叠纪地层发育特征及原始沉积格局分析. 高校地质学报, 2006, 12(3): 343-352
- [46] 刘绍龙. 华北地区大型三叠纪原始沉积盆地的存在. 地质学报, 1986, 60(2): 128-138
- [47] 孟彩. 华北地台区晚三叠世-新近纪岩相古地理研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2015
- [48] 林玉祥, 孟彩, 韩继雷, 等. 华北地台区晚侏罗世—早白垩世岩相古地理特征. 西北大学学报(自然科学版), 2015, 45(4): 611-617
- [49] 程强, 寇小兵, 黄绍槟, 等. 中国红层的分布及地质环境特征. 工程地质学报, 2004, 12(1): 34-40
- [50] Gilder S, Courtillot V. Timing of the North-South China collision from new middle to late Mesozoic paleomagnetic data from the North China Block. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B8): 17713-17727
- [51] 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. 地球物理学报, 1993, 36(1): 68-79
- [52] Jiang Z, Liu Q, Dekkers M J, et al. Acquisition of chemical remanent magnetization during experimental ferrihydrite-hematite conversion in Earth-like magnetic field — implications for paleomagnetic studies of red beds. *Earth & Planetary Science Letters*, 2015, 428: 1-10
- [53] Zhao X, Coe R S. Tectonic Implications of Permian-Triassic paleomagnetic results from North and South China. *American Geophysical Union*, 1989, 50: 267-283
- [54] Embleton B J J, McElhinny M W, Ma X, et al. Permian-Triassic magnetostratigraphy in China: the type section near Taiyuan, Shanxi Province, North China.

- Geophysical Journal International, 1996, 126(2): 382-388
- [55] 刘育燕, 朱宗敏, 袁爱华, 等. 山西二、三叠系界线岩石地层的次生磁化及其地质意义. 地球学报, 2004, 25(4): 437-442
- [56] Tan X, Kodama K P. Magnetic anisotropy and paleomagnetic inclination shallowing in red beds: evidence from the Mississippian Mauch Chunk Formation, Pennsylvania. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(11): 1-9
- [57] Lin J. The apparent polar wander paths for the North and South China blocks [D]. Santa Barbara: University of California, 1984
- [58] 谈晓冬, 袁友仁. 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
- [59] 方大钧, 郭亚滨, 王兆裸, 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
- [60] 谈晓冬, 刘椿. 山西沁水盆地三叠纪岩石古地磁学研究. 中国科学(D辑), 1995(7): 755-763
- [61] Yang Z, Ma X, Besse J, et al. Paleomagnetic results from Triassic sections in the Ordos Basin, North China. *Earth & Planetary Science Letters*, 1991, 104: 258-277
- [62] Van der Voo R. The reliability of paleomagnetic data. *Tectonophysics*, 1990, 184(1): 1-9
- [63] Huang B, Shi R, Wang Y, et al. Palaeomagnetic investigation on Early-Middle Triassic sediments of the North China block: a new Early Triassic palaeopole and its tectonic implications. *Geophysical Journal International*, 2005, 160(1): 101-113
- [64] Huang B, Yan Y, Piper J, et al. Paleomagnetic constraints on the paleogeography of the East Asian blocks during the Late Paleozoic and Early Mesozoic times. *Earth-Science Reviews*, 2018 (in press)
- [65] Opdyke N D, Huang K, Xu G, et al. Paleomagnetic results from the Triassic of the Yangtze Platform. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(B9): 9553-9568
- [66] Enkin R J, Courtillot V, Leloup P, et al. The paleomagnetic record of Uppermost Permian, Lower Triassic rocks from the South China Block. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(21): 2147-2150
- [67] Heller F, Haihong C, Dobson J, et al. Permian-Triassic magnetostratigraphy — new results from South China. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 1995, 89(3): 281-295
- [68] 白立新, 吴汉宁. 四川旺苍早三叠世古地磁学结果及其大地构造学意义. 中国科学(D辑), 1997, 27(6): 514-518
- [69] 马醒华, 张振坤. 四川峨眉、山西太原地区二叠纪的古地磁研究. 地球物理学报, 1989, 专辑 I (32): 451-465
- [70] Yang Z, Besse J. New Mesozoic apparent polar wander path for south China: tectonic consequences. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(B5): 8493-8520
- [71] Wan Y, Li R, Wilde S A, et al. UHP metamorphism and exhumation of the Dabie Orogen, China: evidence from SHRIMP dating of zircon and monazite from a UHP granitic gneiss cobble from the Hefei Basin. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(17): 4333-4348
- [72] Liu D, Jian P, Kröner A, et al. Dating of prograde metamorphic events deciphered from episodic zircon growth in rocks of the Dabie-Sulu UHP complex, China. *Earth & Planetary Science Letters*, 2006, 250(3): 650-666
- [73] 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 等. 秦岭-大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带. 中国科学(D辑), 2003, 33(12): 1121-1135
- [74] Butler R F. Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes. Boston: Blackwell Scientific Publications, 1992
- [75] Kodama K P. Simplification of the anisotropy-based inclination correction technique for magnetite- and haematite-bearing rocks: a case study for the Carboniferous Glenshaw and Mauch Chunk Formations, North America. *Geophysical Journal International*, 2009, 176(2): 467-477
- [76] Yi Z, Huang B, Chen J, et al. Paleomagnetism of early Paleogene marine sediments in southern Tibet, China: implications to onset of the India-Asia collision and size of Greater India. *Earth & Planetary Science Letters*, 2011, 309(1): 153-165