

doi: 10.12097/gbc.2023.04.007

华北克拉通东北缘改造：来自吉林辉南地区构造热事件的古地磁记录

金继浩¹, 任收麦^{2*}, 王胜建³, 刘永江⁴, 侯啓东⁵, 刘一珉⁶, 王浩⁵

JIN Jihao¹, REN Shoumai^{2*}, WANG Shengjian³, LIU Yongjiang⁴, HOU Qidong⁵, LIU Yimin⁶, WANG Hao⁵

1. 中国石化胜利油田分公司孤东采油厂, 山东 东营 257237;

2. 中国地质调查局, 北京 100037;

3. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083;

4. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100;

5. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

6. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

1. Shengli Oilfield Branch Gudong Oil Production Plant, Sinopec, Dongying 257237, Shandong, China;

2. China Geological Survey, Beijing 100037, China;

3. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

4. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;

5. School of Earth Science and Resources, China University of Geoscience, Beijing 100083, China;

6. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

摘要: 华北克拉通东北缘处于构造运动活跃地区, 古地磁研究可为构造演化和岩浆热事件提供依据。笔者在吉林辉南地区中寒武统 32 个采点共采集 246 块样品进行了岩石学、岩石磁学及系统热退磁实验。古地磁实验表明, 徐庄组砂质泥岩主要磁性矿物是赤铁矿和磁铁矿, 张夏组灰岩主要磁性矿物是颗粒较小的磁铁矿和黄铁矿, 且均发生了重磁化, 并记录了稳定的中温分量, 前者中温分量地理坐标平均方向为 $D/I = 10.9^\circ/50.8^\circ$, $\alpha_{95} = 11.7^\circ$, 对应的极位置为 $76^\circ\text{N}, 264.6^\circ\text{E}, A_{95} = 13^\circ$, 与早白垩世岩浆活动记录的古地磁极位置一致; 后者中温分量地理坐标平均方向为 $D/I = 29.1^\circ/59.0^\circ$, $\alpha_{95} = 6.5^\circ$, 对应的极位置为 $68^\circ\text{N}, 213.7^\circ\text{E}, A_{95} = 8.4^\circ$, 与第四纪火山岩记录的古地磁极位置一致。综合区域地质背景分析, 早白垩世—第四纪, 吉林辉南及邻区古地磁记录的 2 次较为强烈的构造热事件, 以及因敦化—密山断裂带左旋走滑运动造成的北向运移形成的古纬度差, 一定程度上对华北克拉通东北缘起到双重改造作用。

关键词: 华北克拉通东北缘; 中寒武世; 重磁化; 构造热事件

中图分类号: P314.2; P318.4⁴ **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)02/03-0289-13

Jin J H, Ren S M, Wang S J, Liu Y J, Hou Q D, Liu Y M, Wang H. Reconstruction of the northeastern margin of the North China Craton: Paleomagnetic records from tectonic thermal events in Huinan of Jilin Province. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(2/3): 289-301

收稿日期: 2023-04-05; 修订日期: 2023-11-30

资助项目: 国家自然科学基金项目《松嫩和佳木斯地块晚古生代构造重建: 来自古地磁的约束》(编号: 41472197)、科技部重点研发计划项目《东亚俯冲陆缘的构造变形响应与转换》(编号: 2022YFF0800401-2)、泰山学者计划《洋陆过渡带构造演化研究》(编号: ts20190918)

作者简介: 金继浩(1993-), 男, 硕士, 从事构造地质学研究。E-mail: 1334584139@qq.com

* 通信作者: 任收麦(1973-), 男, 研究员, 从事构造地质学和页岩气地质研究。E-mail: realshaw@vip.sina.com

Abstract: The northeastern margin of North China Craton is located in an active area of tectonic movement. Paleomagnetic study can provide a basis record for tectonic evolution and magmatic thermal events. 246 samples were collected from 32 mining sites of the Middle Cambrian in Huinan area, Jilin Province, for petrology, rock magnetism and systematic thermal demagnetization experiments. Rock magnetic study implies that the main magnetic minerals of the Xuzhuang Formation sandy mudstone are hematite and magnetite. The main magnetic minerals of the Zhangxia Formation limestone are magnetite with smaller particles and a small amount of pyrite. Stepwise thermal demagnetization succeeded in isolating the middle-temperature characteristic directions of the samples. The average direction of the Xuzhuang Formation ($D/I = 10.9^\circ/50.8^\circ$, $\alpha_{95} = 11.7^\circ$, corresponding pole position is 76°N , 264.6°E , $A_{95} = 13^\circ$), indicates that magmatic activity in the Early Cretaceous affected it. The average direction of the Zhangxia Formation ($D/I = 29.1^\circ/59.0^\circ$, $\alpha_{95} = 6.5^\circ$, corresponding pole position is 68°N , 213.7°E , $A_{95} = 8.4^\circ$) were remagnetized which is related to Quaternary volcanic activity. Based on the analysis of regional geological background, at least two strong tectonic thermal events may have occurred from the Early Cretaceous to Quaternary respectively in Huinan area of Jilin Province, which also moved toward north large distance affected by Dunhua–Minshan sinistral slip fault during that time. These magnetic minerals were all remagnetized and recorded a stable middle–temperature characteristic direction.

Key words: northeastern margin of North China Craton; Middle Cambrian; remagnetization; tectonic thermal event

中国东北地区位于华北板块、西伯利亚板块和太平洋板块围限的区域内(刘永江等, 2010), 大地构造位置属于中亚–蒙古造山带的东端和太平洋构造域的叠加部位(周建波等, 2016; 李锦轶等, 2019), 包括松嫩地块、兴安地块、额尔古纳地块、兴凯–佳木斯–布列亚地块和华北板块东北部(葛肖虹等, 2007), 构造–岩浆活动复杂活跃(林强等, 1999; 吴福元等, 1999; 刘俊来等, 2022), 是研究区域构造演化与板块运动过程的热点地区(朱日祥等, 2011; 任收麦等, 2015; 关子成等, 2023)。

该区域锆石 U–Pb 定年结果显示, 至少存在晚三叠世、早—中侏罗世、中—晚侏罗世、早白垩世早期、早白垩世晚期和晚白垩世 6 期岩浆活动(许文良等, 2013)。特别是中生代以来, 受太平洋板块俯冲作用的影响, 华北、东北及朝鲜半岛岩石圈减薄、构造伸展, 发生强烈的岩浆活动(吴福元等, 2003, 2008, 2014; Zhu et al., 2012, 2021; 唐杰等, 2018), 早白垩世晚期火山岩广泛分布(Wang et al., 2006), 尤其是 133~93 Ma 辽宁地区火山熔岩流大面积喷发(朱日祥等, 2002; 于泓超, 2023)。新生代, 吉林长白山地区火山活动非常活跃, 但相对于中生代强度减弱(朱日祥等, 1990; 朱日祥, 2018)。古地磁重磁化现象可以作为间接证据反映岩石受到的后期变质加热作用, 成为研究火山活动影响时间范围和程度的一种很好的手段(Bychkova et al., 2019)。前人研究发现古生界重磁化现象具有全球性和遍布性(吴怀春, 2005), 如北美克拉通内部(Suk et al., 1990, 1996)、欧洲海西造山带(Courtillot et al., 1986)、澳大利亚

(Li et al., 1989)、俄罗斯(Smethrust et al., 1992; Salnaia et al., 2022)、青藏高原(姚勇等, 2023; Fu et al., 2024), 重磁化机制研究成果较多(Zegers et al., 2003; 刘成英等, 2013; Liang et al., 2019; Huang et al., 2019; Meng et al., 2022)。中国华北板块南缘早古生代岩石发现的重磁化现象, 与燕山期岩浆侵入活动有关(杨振宇等, 1998)。东北地区古地磁研究表明, 泥盆系、石炭系、三叠系遭受不同程度的后期重磁化(张雪峰等, 2014)。对于华北克拉通东北缘改造, 前人多通过锆石 U–Pb 年代学、岩石地球化学及 Hf 同位素等方法开展研究(玄雨菲等, 2022; 程昌泉等, 2023), 本次研究通过古地磁重磁化现象探究古生界沉积岩中是否存在中生代、新生代火山活动影响的记录, 追索其时空演化规律, 厘定重磁化现象与构造热事件的关系, 为揭示太平洋板块俯冲事件及华北克拉通破坏的存在开拓一个新的研究手段, 对研究区域构造运动具有重要意义。

1 地质背景及样品采集

研究区位于吉林省南部, 华北板块东北缘, 敦化–密山断裂带南段东部, 与其正东的长白山火山相距约 150 km(杨清福等, 2011)。区内褶皱、断裂发育, 中央是一个 NEE 向展布的向斜, 宽约 10 km, 长约 20 km, 核部为侏罗系, 两翼从内向外依次为奥陶系、寒武系、震旦系及青白口系, 推测其形成于晚侏罗世—早白垩世; 发育 2 期主要断层, 第一期 NEE 向延伸, 第二期 NNW 向延伸, 后期对前期有明显的切割。区内地层从老到新发育鞍山群石英岩、斜长角闪岩, 震

旦系及青白口系杂色页岩夹灰岩, 下寒武统砖红色砂页岩、条带状灰岩, 中寒武统中厚层灰岩、生物碎屑灰岩、紫红色砂质泥岩, 上寒武统紫色砂质页岩夹灰岩透镜体, 奥陶系厚层灰岩、燧石结核条带灰岩, 侏罗系砂砾岩、页岩夹煤层, 白垩系紫色砂砾岩, 第四系黄土、砂砾及玄武岩, 局部可见酸性、基性岩浆的侵入(图 1)。

古地磁样品采自吉林省辉南县双安屯(北纬 42°32'、东经 126°21')向斜的北西翼寒武纪地层, 其中张夏组岩性主要为中厚层灰岩、鲕粒灰岩、白云质灰岩(图 2-b), 个别采点可见方解石脉(图 2-c)及燧石条带; 徐庄组岩性主要为紫红色薄层砂质泥岩(图 2-d), 节理发育。利用便携式岩心取样汽油钻, 在剖面可供采样的露头区钻取古地磁定向样品, 共布置采点 32 个, 编号分别为 ZHN1-ZHN17、XHN1-

XHN15, 每个采点至少采集 6 个独立定向岩心, 利用磁罗盘和太阳罗盘结合定向。野外共采集 246 块定向岩心, 在实验室内将样品切成直径为 2.5 cm, 长度为 2.5 cm 的圆柱用于古地磁学系统退磁实验, 部分代表性样品做岩石磁学研究。

2 样品测试及结果

2.1 岩石学

为了解研究剖面中磁性矿物的成分和岩石结构, 选择典型样品开展岩石学测试分析。实验在中国地质科学院京区地质科研实验基地进行, 扫描电子显微镜是德国 ZEISS 公司生产的 Merlin Compact 型, 能谱仪是英国 OXFORD 公司生产的 INCA Energy, 样品切割研磨使用的是德国 LEICA 公司生产的 EM TXP 精研一体机和 EM

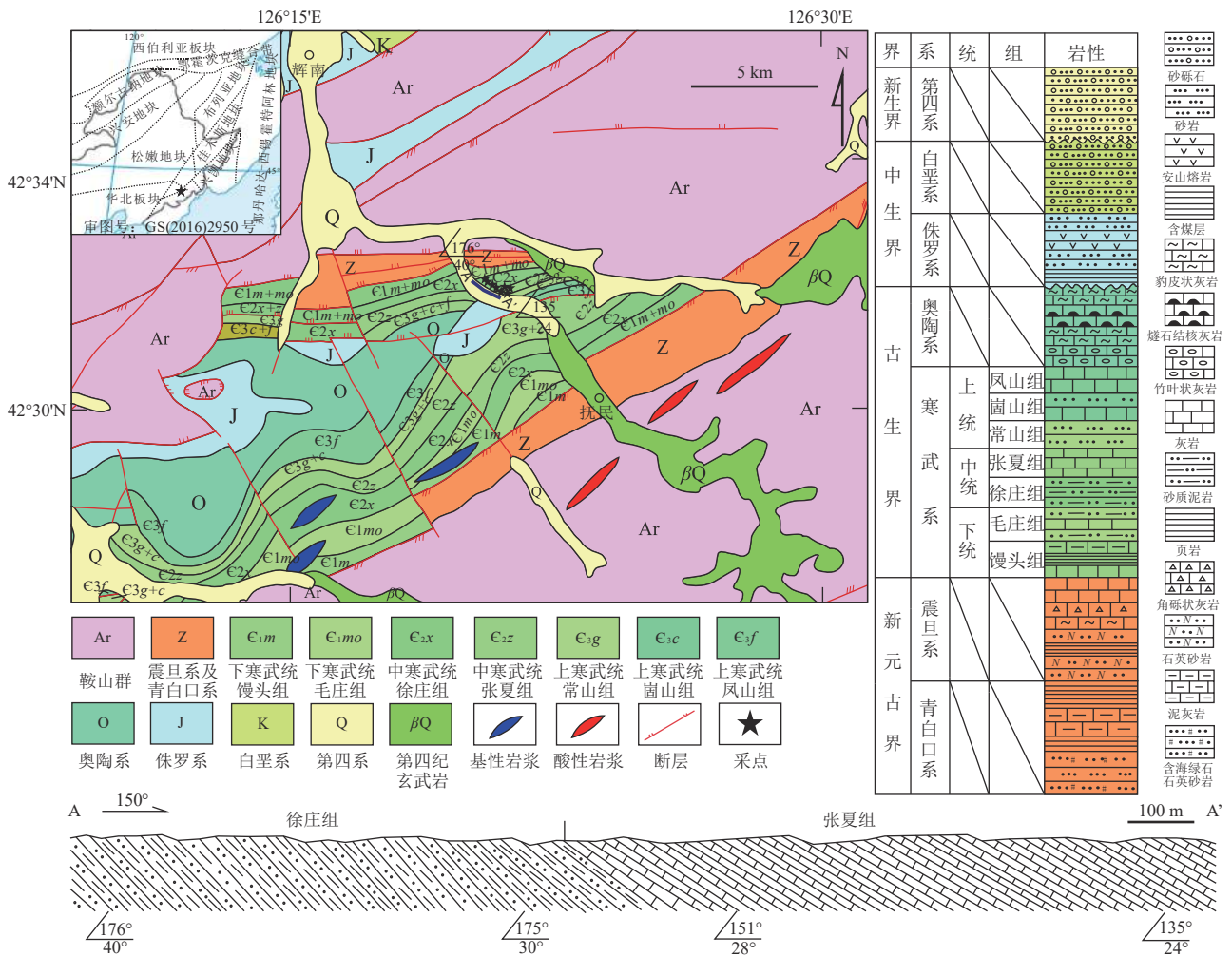


图 1 吉林辉南地区地质图、柱状图及采样剖面图

Fig. 1 Geological map, columnar map and sampling section of Huinan area, Jilin Province

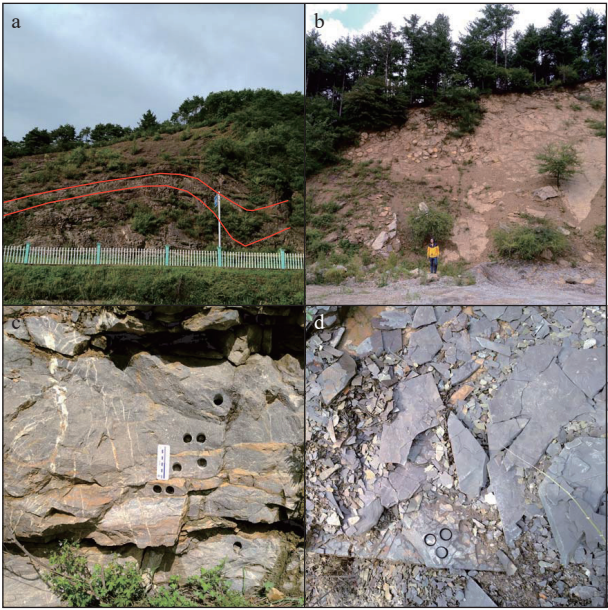


图 2 辉南地区双安屯野外露头照片
Fig. 2 Field outcrop photos in Shuangantun, Huinan area
a—剖面次级褶皱; b—张夏组石鼓灰岩; c—张夏组灰岩中方解石脉充填; d—徐庄组砂质泥岩

TIC3X 氩离子抛光仪。结合典型样品的能谱数据(表 1)和扫描电子显微镜观察可以看出,张夏组灰岩中含有黄铁矿(图 3-a),呈不规则团块状,直径 8 ~ 10 μm;徐庄组砂质泥岩中主要含有磁铁矿(图 3-b),呈方形或者不规则状分布,长度 10 ~ 12 μm。

2.2 岩石磁学

为了解岩石中所含磁性矿物的种类和磁畴状态等特征,挑选部分样品进行岩石磁学研究。利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 型振动样品磁力仪(灵敏度 $0.5 \times 10^{-9} \text{Am}^2$)测得磁滞回线、等温剩磁(IRM)获得曲线和反向场退磁曲线。

中寒武统张夏组典型样品(ZHN11-8)磁滞回线显示出比较低的矫顽力(Hc)和剩磁矫顽力(Hcr),分

别为 7.36 mT 和 30.97 mT,在 0.25 T 时已经达到饱和和磁化强度的 90% 以上,在 0.5 T 左右达到饱和。形态上呈“蜂腰形”特征,表明存在具有不同矫顽力的多个磁性成分,这可能对应于不同种类的磁性矿物的混合或单一矿物不同粒级的混合(Tauxe et al., 1996)。等温剩磁在 0.2 T 时,饱和等温剩磁(SIRM)基本达到了饱和(图 4)。徐庄组典型样品(XHN15-6)的磁滞回线可见其具有较高的矫顽力(Hc)和剩磁矫顽力(Hcr),分别为 77.05 mT 和 293.1 mT,在 0.75 T 左右接近饱和。形态上呈典型的“鹅颈形”特征,表明样品中含有 2 种不同类型的磁性矿物。等温剩磁随着外场增加缓慢上升,在 1.5 T 时仍未饱和,表明该样品中剩磁信号存在高矫顽力硬磁性矿物(图 4)。结合系统退磁结果,样品在 560℃ 左右磁化强度接近为零,部分样品剩磁具有赤铁矿的贡献,在 680℃ 磁化强度降为零,判断徐庄组砂质泥岩的磁性矿物可能由赤铁矿和磁铁矿颗粒混合组成。

2.3 系统热退磁结果

古地磁样品测试在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室完成,热退磁实验采用的是该所研制的全自动热退磁仪,内部静态残余磁场低于 10 nT,通电加热时感应磁场低于 100 nT/A;剩磁测量采用的是美国 2G-755R 型超导磁力仪,测量灵敏度达到 10^{-12}Am^2 。全部实验都在零磁空间(小于 300 nT)里完成,对所有样品进行逐步热退磁,从室温到 585℃ 共 18 步,部分样品在此基础上继续进行 5 步到 680℃。大部分样品在 100 ~ 250℃ 之间可分离出稳定的一组剩磁组分,部分样品在 250 ~ 400℃ 之间可分离出第二组剩磁组分,徐庄组个别样品在 500 ~ 685℃ 之间可分离出第三组剩磁组分(图 5)。第三组剩磁组分与第二组剩磁组分存在个别重合现象,但是缺乏足够数据支撑,有待进一步验证。

徐庄组和张夏组剖面第二组分中温分量在地理

表 1 典型样品的能谱成分数据
Table 1 Energy spectrum composition data of typical samples

测点位置编号	C	O	S	Ca	Ti	Fe	合计	推测矿物名称
ZHN8-15-11 1	26.84		51.77			21.39	100	黄铁矿
ZHN8-15-11 3	36.35		41.50	2.61		19.53	100	黄铁矿
XHN15-4-09 1		73.50			1.65	24.85	100	磁铁矿
XHN15-4-09 5	6.62	70.56			2.12	20.70	100	磁铁矿

注:按元素百分比(%)显示所有结果,无数据表明不含该元素

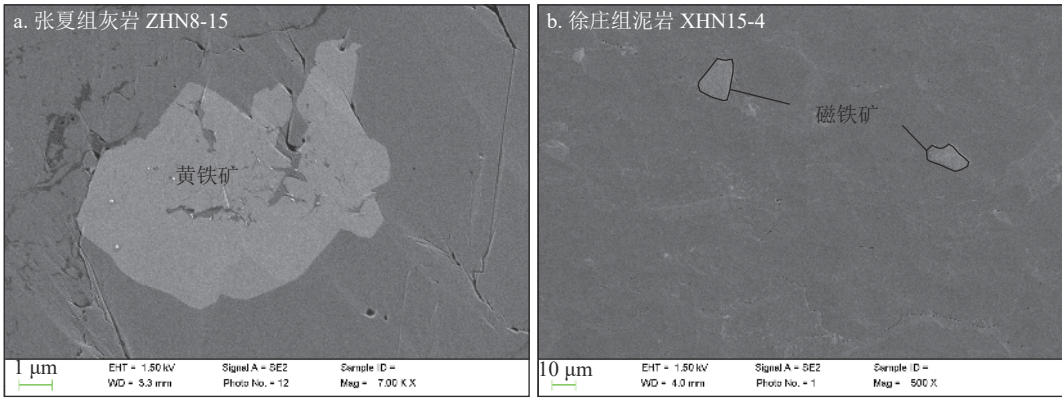


图 3 典型样品扫描电镜照片
Fig. 3 SEM photos of typical samples

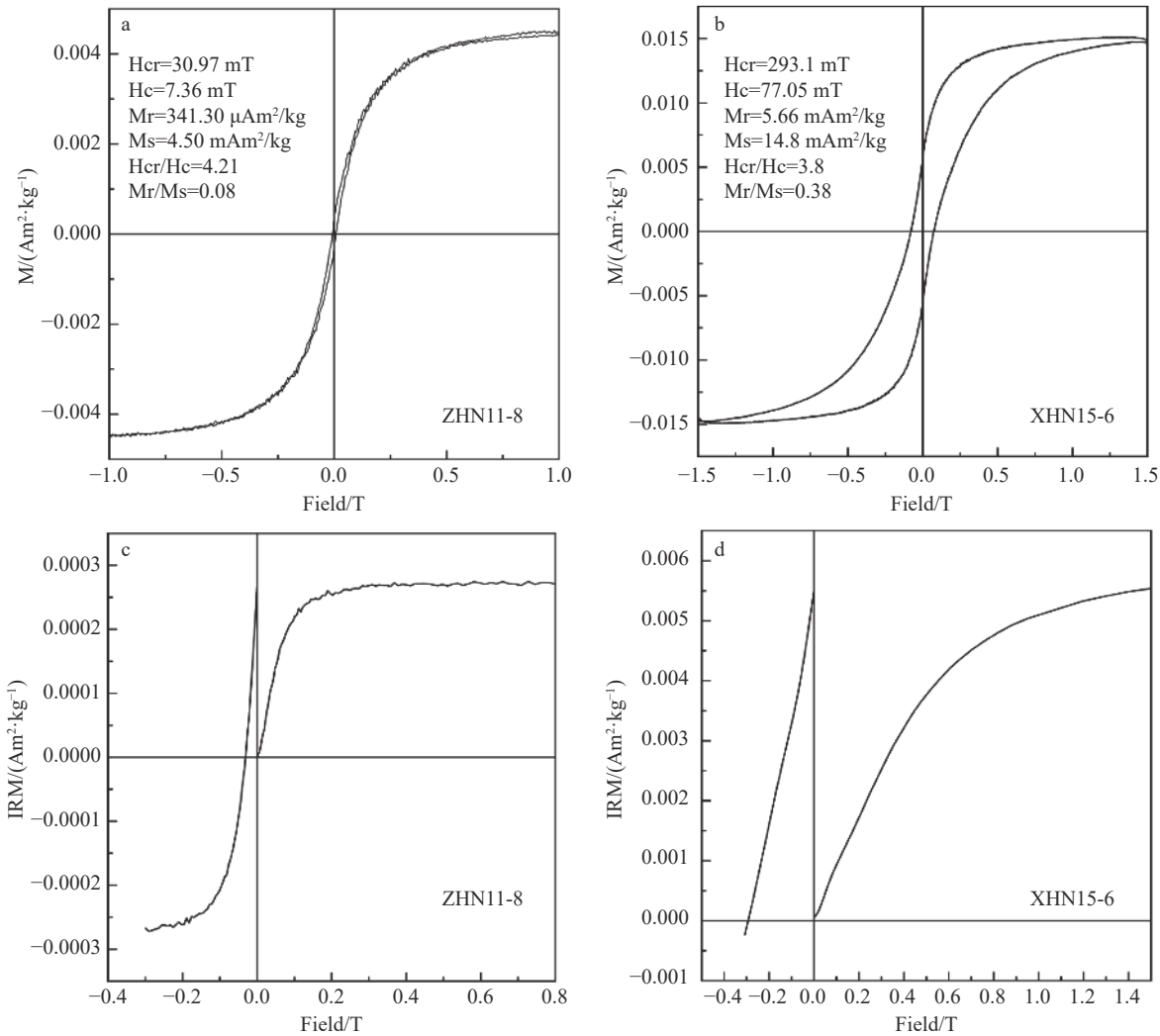


图 4 典型样品的磁滞回线 (a, b) 及等温剩磁获得曲线和反向场退磁曲线 (c, d)

Fig. 4 Hysteresis loop (a, b), isothermal remanence curve and reverse field demagnetization curve (c, d) of typical samples

坐标下剩磁方向集中, 倾斜校正后趋于分散(图 6、图 7), 显然它是一组褶皱后的叠加剩磁, 表明该分量

为褶皱后获得的重磁化分量。根据主向量分析求得每个样品的特征剩磁分量后, 以采点为单位对剩磁

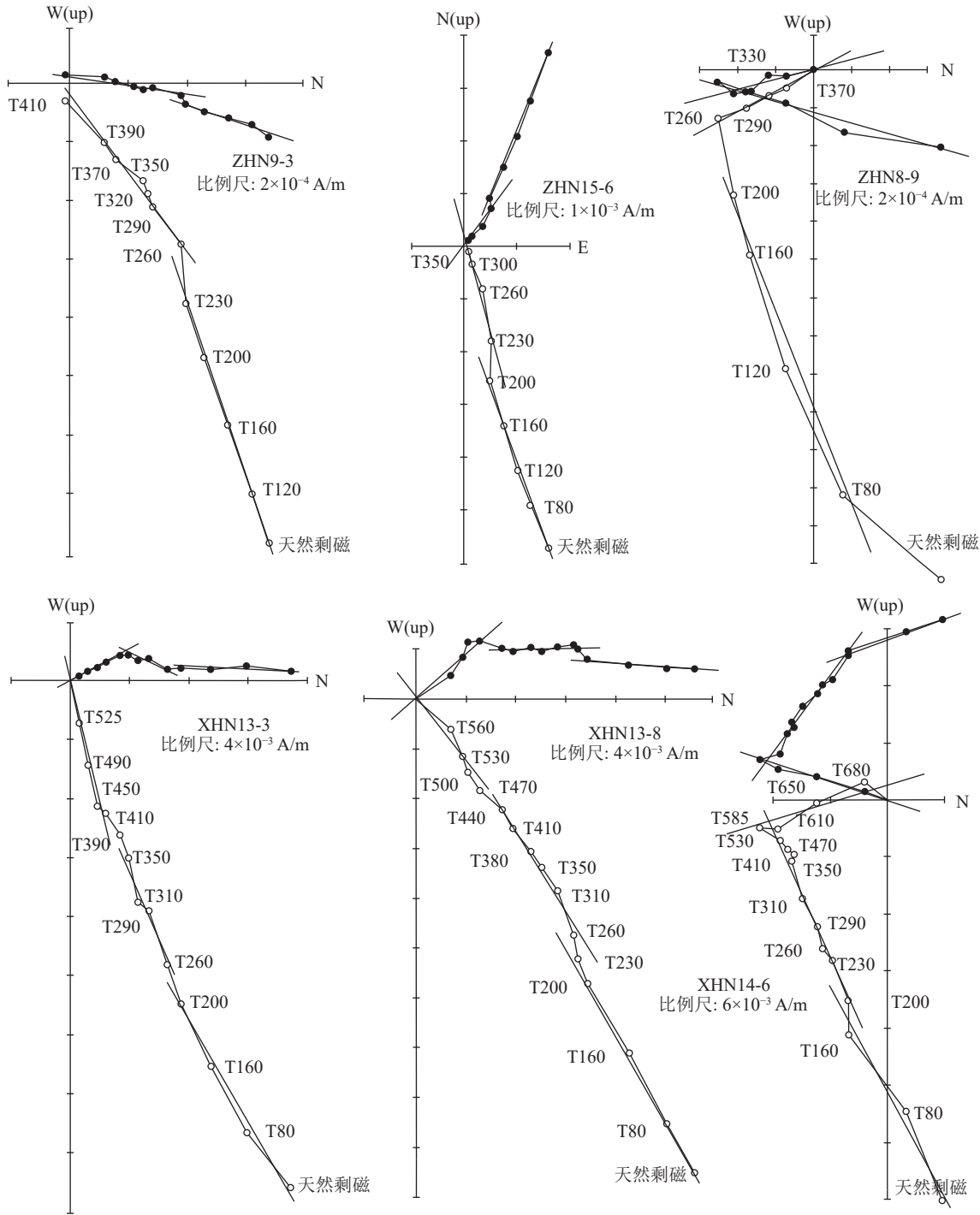


图 5 代表样品倾斜校正前的系统热退磁结果正交矢量(实心圆和空心圆分别表示剩磁方向在水平面和铅垂面上的投影)

Fig. 5 The orthogonal vector of the system thermal demagnetization results for typocal samples before tilt correction

分量进行 Fisher 统计, 然后对各采样点平均方向进行统计, 求得徐庄组剖面的中温分量的平均剩磁方向为 $D/I = 10.9^\circ/50.8^\circ$, $\alpha_{95} = 11.7^\circ$ (表 2), 对应的古地磁极位置为北纬 76° 、东经 264.6° , $A_{95} = 13^\circ$, 古纬度为北纬 31.5° ; 张夏组剖面的平均中温剩磁方向为

$D/I = 29.1^\circ/59.0^\circ$, $\alpha_{95} = 6.5^\circ$ (表 2), 对应的古地磁极位置为 68°N , 213.7°E , $A_{95} = 8.4^\circ$, 古纬度为 39.8°N 。徐庄组 15 个采点可统计出低温分量, 平均方向为 $D/I = 5.1^\circ/62.7^\circ$, $\alpha_{95} = 2.8^\circ$ (表 3); 张夏组 17 个采点可统计出低温分量, 平均方向为 $D/I = 5.9^\circ/63.4^\circ$,

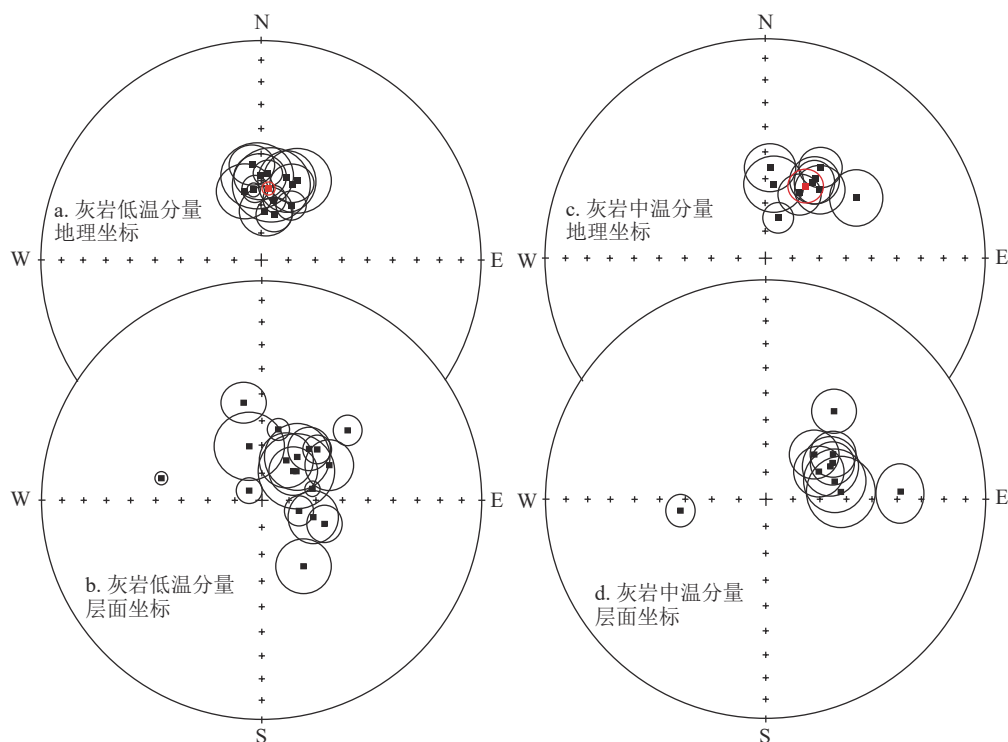


图 6 吉林辉南地区张夏组灰岩剩磁方向及平均方向 95% 置信椭圆的等面积投影 (红圈为平均方向)

Fig. 6 Equal area projection of 95% confidence ellipse of characteristic remanence direction and average direction of Zhangxia Formation limestone in Huinan area, Jilin Province

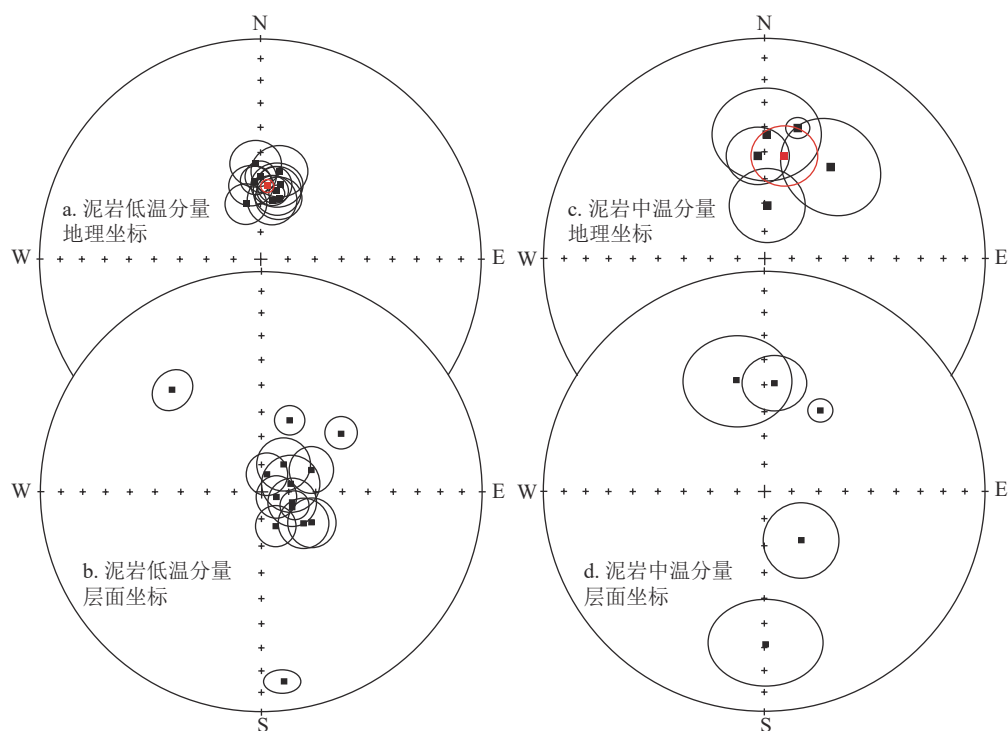


图 7 吉林辉南地区徐庄组砂质泥岩剩磁方向及平均方向 95% 置信椭圆的等面积投影 (红圈为平均方向)

Fig. 7 Equal area projection of 95% confidence ellipse of characteristic remanence direction and average direction of sandy mudstone of Xuzhuang Formation in Huinan area, Jilin Province

$\alpha_{95} = 3.2^\circ$ (表 3), 均与现代地磁场的方向在 95% 置信度内保持一致, 表明这一低温分量为现代磁场方向的粘滞剩磁。

3 讨论

3.1 重磁化的时代

吉林辉南地区中寒武统张夏组灰岩和徐庄组砂质泥岩古地磁研究表明, 这些岩石都遭受不同程度的后期重磁化作用, 如此大规模的重磁化作用很可能与本区域的重大构造热事件有关。重磁化作用时代的确定可以通过与邻区的后期古地磁极相比较获得, 周围地区前人研究较多(Zhao et al., 1990; 朱日祥等 1990, 2002; Pruner et al., 1992), 数据可靠。考虑到褶皱后剩磁, 笔者将徐庄组剖面得出的极位置与邻区内蒙古、辽宁等地及蒙古国区域侏罗纪之后的极位置对比(表 4), 发现其极位置与早白垩世极位置在 95% 置信区间内保持一致(图 8-a), 由此推测徐庄组砂质泥岩后期在早白垩世发生了重磁化作用。

张夏组剖面得出的极位置与附近长白山地区第四纪火山岩极位置对比(表 5), 二者在 95% 置信区间内高度一致(图 8-b), 表明张夏组灰岩可能在第四纪受火山活动影响发生了重磁化, 灰岩中广泛充填的方解石脉也验证了其受岩浆热液运移影响的推测。

根据古地磁、岩石磁学和岩石学实验, 辉南地区中寒武统张夏组灰岩磁滞回线呈“蜂腰形”, 主要磁性矿物是颗粒较细的磁铁矿, 此外还含有黄铁矿。张夏组砂质泥岩磁滞回线表现为“鹅颈形”, 前人通过模拟发现, 当赤铁矿与磁铁矿混合时, 磁滞回线会呈现出“鹅颈形”, 即不同类型或粒度的磁性矿物相互混合时, 磁化强度呈线性叠加而矫顽力呈非线性叠加(Carvalho et al., 2006), 因此其主要磁性矿物为赤铁矿和磁铁矿。

同一地区的地层, 张夏组灰岩和徐庄组砂质泥岩受重磁化的影响不同, 可能取决于其所含磁性矿物对构造热事件的响应。张夏组灰岩中的黄铁矿是还原条件下最稳定的铁硫化物, 在地质体中普遍存

表 2 吉林辉南地区徐庄组砂质泥岩、张夏组灰岩古地磁中温分量数据

Table 2 Data of paleomagnetic middle temperature component of Xuzhuang Formation sandy mudstone and Zhangxia Formation limestone in Huinan area, Jilin Province

采点	样品数	古地磁方向							
	n/N	$Dg/^\circ$	$Ig/^\circ$	Kg	$\alpha_{95g}/^\circ$	$Ds/^\circ$	$Is/^\circ$	Ks	$\alpha_{95s}/^\circ$
XHN2	3/8	36.3	47.3	46.9	14.2	346.3	46.8	46.9	14.2
XHN3	4/8	1.1	42.6	25.9	14.4	179.6	31.5	25.9	14.4
XHN5	3/6	356.4	51.3	126.6	11.0	5.6	48.9	126.6	11.0
XHN6	4/8	2.9	70.3	45.3	13.8	142.0	67.3	45.3	13.8
XHN15	5/8	14.3	38.8	332.7	4.2	35.0	52.7	332.7	4.2
徐庄组	平均	10.9	50.8	43.7	11.7	16.3	62.5	3.4	49.3
ZHN2	6/8	31.5	49.7	74.7	7.8	56.7	60.1	63.1	8.5
ZHN4	6/8	27.9	62.9	78.7	7.6	61.7	61.7	67.7	8.2
ZHN7	5/8	18.6	74.5	187.6	5.6	262.1	57.8	187.6	5.6
ZHN8	9/16	3.0	55.9	33.0	9.1	46.6	65.8	33.0	9.1
ZHN9	9/10	33.3	54.7	37.6	8.5	75.1	63.5	21.4	11.4
ZHN10	6/8	56.5	48.7	45.0	10.1	87.0	38.9	45.8	10.0
ZHN11	3/8	275.7	30.2	278.5	7.4	283.3	59.3	278.5	7.4
ZHN13	4/8	6.8	62.3	72.0	10.9	84.9	61.9	50.2	13.1
ZHN14	4/8	31.4	56.5	123.5	8.3	38.1	47.9	120.6	8.4
ZHN15	5/8	38.4	57.1	71.6	9.1	61.9	67.8	71.6	9.1
张夏组	平均	29.1	59.0	63.7	6.5	63.0	63.3	24.1	10.7

注: n/N 为获得稳定剩磁的样品数/测量样品数; Dg 、 Ds 为地层校正前/后的磁偏角; Ig 、 Is 为地层校正前/后的磁倾角; Kg 、 Ks 为地层校正前/后平均方向的精度参数; α_{95g} 、 α_{95s} 为地层校正前/后平均方向95%置信圆锥半顶角

表 3 吉林辉南地区徐庄组砂质泥岩、张夏组灰岩古地磁低温分量数据

Table 3 Data of paleomagnetic low temperature component of Xuzhuang Formation sandy mudstone and Zhangxia Formation limestone in Huinan area, Jilin Province

采点	样品数	古地磁方向							
	n/N	$Dg/^{\circ}$	$Ig/^{\circ}$	Kg	$\alpha_{95g}/^{\circ}$	$Ds/^{\circ}$	$Is/^{\circ}$	Ks	$\alpha_{95s}/^{\circ}$
徐庄组砂质泥岩									
XHN1	5/9	356.9	54.3	74.9	8.9	109.3	78.2	74.9	8.9
XHN2	6/8	8.4	62.0	82.9	7.4	318.9	38.7	82.9	7.4
XHN3	7/8	356.8	60.6	121.4	5.5	173.5	14.2	121.4	5.5
XHN4	6/6	12.2	56.4	45.8	10.0	39.3	77.0	45.8	10.0
XHN5	6/6	7.7	65.5	154.9	5.4	21.5	61.4	154.9	5.4
XHN6	6/8	12.8	63.7	56.4	9.0	122.0	68.3	57.6	8.9
XHN7	6/8	17.5	66.3	72.9	7.9	18.5	83.3	72.9	7.9
XHN8	5/8	10.6	67.6	71.6	9.1	126.7	70.5	73.2	9.0
XHN11	6/9	0.4	59.3	134.4	5.8	54.0	53.1	134.4	5.8
XHN12	5/8	351.9	62.4	99.7	7.7	111.6	84.1	99.7	7.7
XHN13	7/10	11.0	63.4	146.7	5.0	111.9	77.2	146.7	5.0
XHN14	4/8	345.3	68.8	147.1	7.6	157.0	76.1	147.1	7.6
XHN15	5/8	14.5	61.4	66.1	8.3	67.4	69.8	66.1	8.3
平均		5.1	62.7	220.0	2.8	76.8	79.0	16.3	10.6
张夏组灰岩									
ZHN1	5/8	354.9	54.1	94.7	7.9	348.6	52.5	94.7	7.9
ZHN2	4/8	354.6	63.3	417.7	4.5	308.6	83.9	417.7	4.5
ZHN3	5/8	7.6	61.4	30.8	14.0	48.8	73.1	31.2	13.9
ZHN4	7/8	4.6	57.6	146.7	5.0	47.0	62.2	146.7	5.0
ZHN5	6/8	22.7	59.8	71.1	8.0	42.1	63.7	71.1	8.0
ZHN6	4/8	24.5	57.1	58.6	12.1	38.3	69.4	58.6	12.1
ZHN7	12/12	354.0	63.8	389.9	2.2	282.6	51.0	389.9	2.2
ZHN8	16/16	4.4	67.9	187.5	2.7	76.2	70.9	187.5	2.7
ZHN9	10/10	28.6	66.6	78.1	5.5	106.2	75.9	78.1	5.5
ZHN10	7/8	10.3	66.8	130.6	5.3	50.3	48.1	130.6	5.3
ZHN11	6/8	16.1	72.2	104.0	6.6	110.1	65.4	104.0	6.6
ZHN12	6/10	347.3	63.5	43.3	10.3	147.6	60.8	43.3	10.3
ZHN13	4/8	359.4	58.8	102.9	9.1	61.9	61.8	102.9	9.1
ZHN14	4/8	353.2	67.6	528.3	4.0	12.7	63.0	528.3	4.0
ZHN15	4/8	17.4	57.6	83.7	10.1	31.0	72.4	83.7	10.1
ZHN16	4/8	357.4	58.7	51.7	12.9	346.0	69.4	51.7	12.9
ZHN17	6/8	5.7	71.8	52.8	9.3	108.0	70.2	52.8	9.3
平均		5.9	63.4	125.2	3.2	46.2	74.1	16.7	9.0

注: n/N 为获得稳定剩磁的样品数/测量样品数; Dg 、 Ds 为地层校正前/后的磁偏角; Ig 、 Is 为地层校正前/后的磁倾角; Kg 、 Ks 为地层校正前/后平均方向的精度参数; α_{95g} 、 α_{95s} 为地层校正前/后平均方向95%置信圆锥半顶角

在(石采东等, 2000), 空气中加热时会生成磁黄铁矿和磁铁矿(李海燕等, 2005)。前人研究磁铁矿与黄铁矿存在双向交代作用, 起因于流体与气体活动或

热扰动, 都与构造运动有着直接或间接的联系(徐和聆等, 2000)。沉积岩的孔隙度较大, 有利于流体的运移、留存和与原岩中的有机质发生相互作用, 使次

表 4 辉南及相邻地区早白垩世古地磁数据

Table 4 Paleomagnetic data of Early Cretaceous in Huinan and adjacent areas

采样地点	采样位置		平均古地磁方向			古地磁极位置			参考文献
	纬度(N)/°	经度(E)/°	偏角/°	倾角/°	α_{95}	纬度(N)/°	经度(E)/°	A_{95}	
吉林辉南	42.5	126.3	10.9	50.8	11.7	76.0	264.6	13.0	本文
内蒙古	42.0	119.2	6.8	56.6	4.7	82.9	249.5	5.7	Zhao et al., 1990
辽宁碱锅	41.6	120.7	5.9	58.8	2.9	84.1	244.9	4.9	朱日祥等, 2002
辽宁四合屯	41.6	120.7	6.2	58.2	5.5	86.7	246.8	6.0	朱日祥等, 2002
蒙古国	45.4	107.6	182.9	-62.6	14.2	86.9	252.6	21.4	Pruner et al., 1992

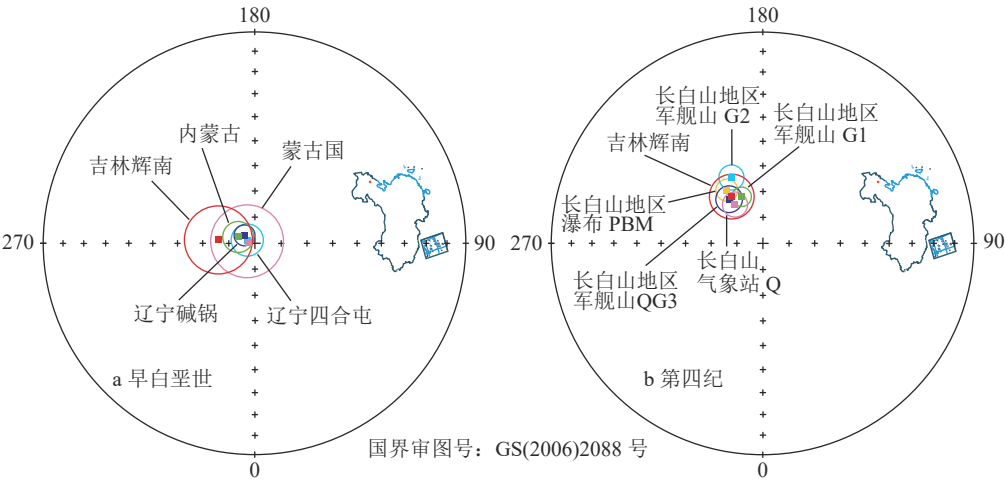


图 8 辉南及邻区早白垩世(a)与第四纪(b)古地磁极的等面积投影

Fig. 8 Equal area projection of paleomagnetic poles of the Early Cretaceous (a) and the Quaternary period (b) in Huinan and adjacent areas

表 5 辉南及邻区第四纪古地磁数据

Table 5 Paleomagnetic data of the Quaternary period in Huinan and adjacent areas

采样地点	采样位置		平均古地磁方向			古地磁极位置			参考文献
	纬度(N)/°	经度(E)/°	偏角/°	倾角/°	α_{95}	纬度(N)/°	经度(E)/°	A_{95}	
吉林辉南	42.5	126.4	29.1	59.0	6.5	68.0	213.7	8.4	本文
军舰山G1	42.2	129.3	27.1	62.2	4.0	70.3	205.5	4.0	
军舰山G2	42.2	129.3	38.5	61.4	5.0	61.8	205.8	5.0	
军舰山G3	42.2	129.3	28.4	58.9	5.2	68.5	216.9	5.2	朱日祥等, 1990
瀑布PBM	42.0	128.1	33.0	58.2	4.2	64.9	214.0	4.2	
气象站东Q	42.0	128.1	23.8	59.6	5.2	72.0	215.0	5.2	

生磁铁矿、黄铁矿等磁性矿物得以生长(刘成英等, 2013)。吉林辉南地区处于华北克拉通东北缘, 区内侵入的岩浆岩广泛分布, 中生代以来至少发生了 2 期较强烈的构造-岩浆活动。早白垩世, 软流圈物质热上涌, 发生了一期剧烈的构造-岩浆活动, 张夏组

和徐庄组都受到该地质时期的热事件影响, 记录了古地磁重磁化信息。第四纪, 发生了另外一期较强烈的火山活动, 但相对于第一期稍弱。张夏组灰岩存在大量充填的方解石脉, 是岩浆热液作用的结果, 黄铁矿受热生成次生磁铁矿, 发生了再次重磁化作

用,其特征剩磁分量是次生磁铁矿携带的。徐庄组砂质泥岩磁性矿物以磁铁矿和赤铁矿为主,岩浆热液作用导致的构造热事件并没有达到其解阻温度,保留了大部分早白垩世的古地磁记录。因此,在以后的古地磁研究中,如果采样点周围有火山岩分布,应该留意样品是否受到后期重磁化作用的影响,同时进行彻底的岩石磁性和岩相研究,以确定天然剩磁的起源和构造意义。

3.2 区域大地构造意义

吉林辉南地区徐庄组剖面砂质泥岩受早白垩世岩浆热作用影响,发生了后期重磁化,对应的古地磁极获得的古纬度为 31.5°N ,与现今纬度 42.5°N 相差 11° ,在 95% 置信区间内一致;张夏组剖面灰岩受第四纪火山活动影响发生重磁化,对应的古地磁极位置获得的古纬度为 39.8°N ,与现今纬度基本一致。将吉林辉南地区早白垩世古地磁极位置与邻区对比发现,华北板块与欧亚大陆在 95% 置信区间内一致,华北板块、西伯利亚板块、内蒙古褶皱带已经完全一体,在动力学意义上已经成为整体(任收麦等, 2002)。

吉林辉南地区在早白垩世和第四纪期间存在 8.3° 的古纬度差,究其原因,可能与敦化-密山断裂中生代以来的大规模左行走滑平移有关。敦密断裂带糜棱岩中黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果和大规模走滑逆冲断裂的几何学、运动学特征反映的郯庐断裂带北段和中段在晚白垩世末期都发生了强烈的走滑-逆冲事件(孙晓猛等, 2016),断裂带中发育的糜棱面理、矿物拉伸线理、显微构造、石英 C 轴,以及一系列剪切带内变形和未变形岩体与岩脉的锆石 U-Pb 年龄结果,综合证明左行走滑活动发生于早白垩世初和晚白垩世初(刘程, 2019),这应该与中—晚侏罗世—早白垩世期间古太平洋板块的斜向俯冲有关(葛肖虹等, 2007; 王枫等, 2016)。

受太平洋板块俯冲作用的影响,华北、东北及朝鲜半岛岩石圈减薄、构造伸展,发生强烈的岩浆活动,而吉林辉南地区 2 期构造热事件是太平洋板块俯冲的响应,导致华北克拉通东北缘发生强烈改造。大兴安岭突泉地区下白垩统与下伏地质体之间普遍存在的区域角度不整合面,既代表了蒙古-鄂霍茨克洋在早白垩世前闭合碰撞造山,又暗示从早白垩世开始进入东部大陆边缘向东蠕散伸展演化阶段(宋维民等, 2022),东北地区最强烈的一期火山活动

发生于早白垩世,反映西太平洋板块俯冲作用在早白垩世达到了顶峰,因此华北克拉通破坏的峰期应该在早白垩世(蔡书慧等, 2012)。长白山火山是与太平洋俯冲板块在地幔转换带中滞留与深部脱水等过程紧密相关的一种弧后板内火山(雷建设等, 2004),长白山火山活动造成的第四纪吉林辉南地区的重磁化现象,是对太平洋板块俯冲事件的直接反映。吉林辉南地区寒武纪地层重磁化的研究,为揭示太平洋板块俯冲事件及华北克拉通破坏的存在开拓了一种新的研究手段,对研究区域构造运动具有重要意义。

4 结 论

(1)吉林辉南地区中寒武统张夏组灰岩、徐庄组砂质泥岩均发生重磁化现象,由于磁性矿物的不同,受火山活动的影响也不同。根据古地磁记录推测,吉林辉南地区重磁化现象与构造热事件相关。2 期重磁化作用可能对应该区域 2 次构造热事件,分别发生在早白垩世和第四纪,为研究该区域的构造演化和岩浆热事件提供了古地磁学证据。

(2)早白垩世,华北板块、西伯利亚板块、内蒙古褶皱带在动力学上已经成为一体。吉林辉南地区位于华北克拉通东北缘,古地磁数据记录反映的 2 期岩浆活动和早白垩世—第四纪的大规模北向漂移,在全球动力学背景下是西太平洋板块俯冲的产物,在一定程度上为华北克拉通改造提供了证据。

致谢: 成文过程中和中国地质大学(北京)刘俊来教授、中国地质科学院地质力学所孙知明研究员进行了有益讨论。野外采样工作得到吉林大学周建波教授、中国地质调查局油气资源调查中心周志高级工程师的协助和支持。室内样品测试和数据解析得到中国科学院地质与地球物理研究所秦华峰研究员、章敏博士的帮助。在此一并表示感谢。

参考文献

- Bychkova A Y, Popovaa Y A, Kivadzeb O E, et al. 2019. A thermodynamic model of chemical remagnetization based on the example of the girvas paleovolcano in the Omega structure of the Karelian craton[J]. *Moscow University Geology Bulletin*, 74(2): 154–161.
- Carvalho C, Muxworthy A R, Dunlop D J. 2006. First-order reversal curve (FORC) diagrams of magnetic mixtures: Micromagnetic models and measurements[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*,

- 154(3/4): 308–322.
- Courtillot V, Chambon P, Brun J P, et al. 1986. A magnetotectonic study of the Hercynina Montagne Noire (France)[J]. *Tectonics*, 5: 733–751.
- Fu Q, Yan M, Dekkers M J, et al. 2024. Inverse magnetic fabric of remagnetized limestones in the Zaduo area, Eastern Qiangtang Terrane: Implications for oroclinal bending in the Eastern Himalayan Syntaxis[J]. *Tectonophysics*, 871: 230175.
- Huang W T, Jackson M J, Dekkers M J, et al. 2019. Challenges in isolating primary remanent magnetization from Tethyan carbonate rocks on the Tibetan Plateau: Insight from remagnetized Upper Triassic limestones in the eastern Qiangtang block[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 523: 115695.
- Huang W T, Jackson M J, Dekkers M J, et al. 2019. Nanogoethite as a Potential Indicator of Remagnetization in Red Beds[J]. *Geophysical Research Letters*, 46(22): 12841–12850.
- Li Z X, Powell C M, Schmidt P W. 1989. Syn-deformational remanent magnetization of Mount Eclipse sandstone, Central Australia[J]. *Geophysical Journal International*, 99(1): 205–222.
- Liang G, Wang Q F, Deng J, et al. 2019. Magmatic–hydrothermal alteration mechanism for Late Mesozoic remagnetization in the South China Block[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 124(11): 10704–10720.
- Meng J, Gilder S A, Li Y, et al. 2022. Remagnetization age and mechanism of Cretaceous sediments in relation to dyke intrusion, Hainan Island: Tectonic implications for South China and the Red River fault [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127 (1): 1–19.
- Pruner P. 1992. Palaeomagnetism and palaeogeography of Mongolia from the Carboniferous to the Cretaceous—Final report[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 70(3/4): 169–177.
- Salnaia N V, Rostovtseva Y V, Pilipenko O V, et al. 2022. Palaeomagnetism of the Sarmatian–Maetian of the Eastern Paratethys: Remagnetization or Not? [J]. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, (6): 882–901.
- Smethurst M A, Khramov A N. 1992. A new paleomagnetic pole for the Russian platform and Baltica, and related apparent polar wander path[J]. *Geophysical Journal International*, 108: 179–192.
- Suk D, Peacor D R, Der Voo R V. 1990. Replacement of pyrite framboids by magnetite in limestone and implications for palaeomagnetism[J]. *Nature*, 345: 611–613.
- Suk D R, Halgedahl S L. 1996. Hysteresis properties of magnetic spherules and whole specimens from some Paleozoic platform carbonate rock[J]. *Journal of geophysical research:Solid Earth*, 101(B11): 25053–25075.
- Tauxe L, Mullender T, Pick T. 1996. Potbellies, wasp–waists, and superparam–agnetism in magnetic hysteresis[J]. *Journal of geophysical research:Solid Earth*, 101(B1): 571–583.
- Wang W, Xu W L, Ji W Q, et al. 2006. Late Mesozoic and Paleogene basalts and deep–derived xenocrysts in eastern Liaoning Province, China: Constraints on nature of lithospheric mantle[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(1): 30–40.
- Zegers T E, Dekkers M J, Bailly S. 2003. Late Carboniferous to Permian remagnetization of Devonian limestones in the Ardennes: Role of temperature, fluids, and deformation[J]. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 108(B7): 2357.
- Zhao X, Coe R, Wu H. 1990. New paleomagnetic results from Northern China, collision and suturing with Siberia and Kazakhstan[J]. *Tectonophysics*, 181: 43–81.
- Zhu R X, Xu Y G, Zhu G, et al. 2012. Destruction of the North China Craton[J]. *Science China:Earth Sciences*, 121(10): 197–213.
- Zhu R X, Zhao G C, Xiao W J, et al. 2021. Origin, Accretion, and Reworking of Continents[J]. *Reviews of Geophysics*, 59(3): 1–84.
- 蔡书慧, 贺怀宇, 朱日祥. 2012. 燕山地区承德盆地下白垩统磁性地层学研究及其对华北克拉通破坏的制约[J]. *地球物理学报*, 55(1): 66–75.
- 程昌泉, 刘锦, 张健, 等. 2023. 辽东半岛丹东地区晚侏罗世花岗岩成因及其对华北克拉通破坏的制约[J]. *大地构造与成矿学*, 47(1): 149–164.
- 葛肖虹, 马文璞. 2007. 东北亚南区中—新生代大地构造轮廓[J]. *中国地质*, 34(2): 212–228.
- 关子成, 裴福萍, 魏敬洋, 等. 2023. 吉林敦化地区万宝岩组碎屑锆石 U–Pb–Hf 同位素组成: 对区域构造演化的制约[J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*: 1–16. <https://doi.org/10.13218/j.cnki.juese.2023008>.
- 雷建设, 赵大鹏. 2004. 长白山火山的起源和太平洋俯冲板块之间的关系[J]. *地球科学进展*, 19(3): 364–367.
- 李海燕, 张世红. 2005. 黄铁矿加热过程中的矿相变化研究—基于磁化率随温度变化特征分析[J]. *地球物理学报*, 48(6): 171–178.
- 李锦铁, 刘建峰, 曲军峰, 等. 2019. 中国东北地区主要地质特征和地壳构造格架[J]. *岩石学报*, 35(10): 2989–3016.
- 林强, 葛文春, 孙德有, 等. 1999. 东北亚中生代火山岩的地球动力学意义[J]. *地球物理学报*, 42(增刊): 75–84.
- 刘成英, 李仕虎, 邓成龙, 等. 2013. 扬子地块奥陶系碳酸盐岩重磁化机制探讨[J]. *地球物理学报*, 56(2): 579–591.
- 刘程. 2019. 敦化-密山断裂带构造特征与演化历史[D]. 合肥工业大学博士学位论文.
- 刘俊来, 季雷, 倪金龙, 等. 2022. 早白垩世华北克拉通岩石圈减薄与破坏动力学: 兼论古太平洋型活动大陆边缘[J]. *地质学报*, 96(10): 3360–3380.
- 刘永江, 张兴洲, 金巍, 等. 2010. 东北地区晚古生代区域构造演化[J]. *中国地质*, 37(4): 943–951.
- 任收麦, 朱日祥, 黄宝春, 等. 2002. 造山带内古地磁研究——以苏宏图早白垩世火山岩为例[J]. *中国科学 (D 辑)*, (10): 799–804.
- 任收麦, 朱日祥, 邱海峻, 等. 2015. 黑龙江省饶河枕状玄武岩古地磁学研究及其构造意义[J]. *地球物理学报*, 58(4): 1269–1283.
- 石采东, 朱日祥. 2000. 铁硫化物在古地磁学和环境学中的应用[J]. *地球物理学进展*, 15(3): 91–97.
- 宋维民, 王建恒, 杨佳林, 等. 2022. 蒙古–鄂霍茨克洋闭合时限: 来自大兴安岭突泉地区下白垩统与下伏地质体之间角度不整合关系的约束[J]. *地质通报*, 41(7): 1202–1213.
- 孙晓猛, 张旭庆, 何松, 等. 2016. 敦密断裂带白垩纪两期重要的变形事件[J]. *岩石学报*, 32(4): 1114–1128.
- 唐杰, 许文良, 王枫, 等. 2018. 古太平洋板块在欧亚大陆下的俯冲历

- 史: 东北亚陆缘中生代—古近纪岩浆记录[J]. 中国科学: 地球科学, 48(5): 549–583.
- 王枫, 许文良, 葛文春, 等. 2016. 敦化-密山断裂带的平移距离: 来自松嫩-张广才岭-佳木斯-兴凯地块古生代—中生代岩浆作用的制约[J]. 岩石学报, 32(4): 1129–1140.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. 地学前缘, 10(3): 51–59.
- 吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, 29(4): 313–318.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 24(6): 1145–1174.
- 吴福元, 徐义刚, 朱日祥, 等. 2014. 克拉通岩石圈减薄与破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 44(11): 2358–2372.
- 吴怀春. 2005. 华北蓟县地区中元古界古地磁研究及其古大陆再造意义[D]. 中国地质大学(北京) 博士学位论文: 1–142.
- 徐和聆, 陈克樵, 马醒华, 等. 2000. 磁铁矿与黄铁矿双向交代研究及意义[J]. 地质力学学报, 26(3): 83–89.
- 许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 2013. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. 岩石学报, 29(2): 339–353.
- 玄雨菲, 董晓杰, 王长兵, 等. 2022. 吉南白山地区早白垩世岩浆岩 U–Pb 年代学、岩石地球化学、Hf 同位素证据: 对华北克拉通破坏的制约[J]. 岩石学报, 38(8): 2442–2466.
- 杨清福, 王建, Hattori K H, 等. 2011. 吉林南部辉南—靖宇地区岩石圈地幔氧化-还原状态及研究意义[J]. 岩石学报, 27(6): 1797–1809.
- 杨振宇, 马醒华, 孙知明, 等. 1998. 华北盆地南缘早古生代岩石的重磁化——I. 古地磁结果及其意义[J]. 中国科学 (D 辑), 28(增刊): 24–30.
- 杨振宇, 马醒华, 孙知明, 等. 1998. 华北盆地南缘早古生代岩石的重磁化——II. 岩石磁学结果[J]. 中国科学 (D 辑), 28(增刊): 31–37.
- 姚勇, 边伟伟, 沈中山, 等. 2023. 青藏高原拉萨地块中部上三叠统多布日组沉积岩古地磁研究及其构造意义[J]. 地球物理学报, 66(12): 5086–5106.
- 于泓超. 2023. 胶-辽-吉造山带吉南地区古元古代沉积-岩浆作用及构造意义[D]. 吉林大学博士学位论文.
- 张雪锋, 张世红, 孟宪刚, 等. 2014. 太平洋板块中生代俯冲构造事件的响应: 来自黑龙江东部饶河三叠纪层状燧石的古地磁证据[J]. 中国地质, 41(6): 2019–2027.
- 周建波, 石爱国, 景妍. 2016. 东北地块群: 构造演化与古大陆重建[J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 46(4): 1042–1055.
- 朱日祥. 2018. “华北克拉通破坏”重大研究计划结题综述[J]. 中国科学基金, 32(3): 282–290.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. 中国科学 (D 辑), 41(5): 583–592.
- 朱日祥, 刘椿. 1990. 长白山地区晚新生代古地磁场测定结果[J]. 科学通报, 35(19): 1518–1519.
- 朱日祥, 邵济安, 潘永信, 等. 2002. 辽西白垩纪火山岩古地磁测定与陆内旋转运动[J]. 科学通报, 47(17): 1335–1340.