

王海龙,黄宝春,乔庆庆等. 黑龙江东部白垩纪-古近纪古地磁初步结果及其构造意义. 地球物理学报, 2011, **54**(3): 793~806, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.020

Wang H L, Huang B C, Qiao Q Q, et al. Paleomagnetic study on Cretaceous and Paleogene rocks from eastern Heilongjiang, NE China and its tectonic implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(3): 793~806, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.020

黑龙江东部白垩纪-古近纪古地磁初步结果 及其构造意义

王海龙^{1,2}, 黄宝春^{1*}, 乔庆庆¹, 陈军山¹

1 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

2 中国石油勘探开发研究院西北分院, 兰州 730020

摘 要 陆内块体旋转是周边构造环境和深部构造活动相互作用的结果. 前人研究表明华北东部和俄罗斯远东地区晚中生代以来的块体旋转样式, 很可能以牡丹江断裂为界发生了显著变化. 进一步对牡丹江断裂两侧块体晚中生代以来的块体旋转样式的限定, 有助于正确理解这一差异旋转的机制. 对采自黑龙江省东部白垩纪和古近纪岩石的(51个采点)古地磁学研究表明, 相对于稳定欧亚大陆, 牡丹江断裂东侧的佳木斯地块内部的穆棱、鸡西、七台河和桦南地区旋转样式一致, 整体发生了 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的逆时针旋转, 逆时针旋转很可能发生在晚白垩世末之后. 华北东部及俄罗斯远东地区的差异性相对旋转很可能与白垩纪以来太平洋板块的俯冲作用和作为深俯冲带的牡丹江断裂的重新活化有关.

关键词 佳木斯地块, 白垩纪, 差异旋转, 古地磁学, 牡丹江断裂

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.020

中图分类号 P318

收稿日期 2010-04-01, 2010-11-20 收修定稿

Paleomagnetic study on Cretaceous and Paleogene rocks from eastern Heilongjiang, NE China and its tectonic implications

WANG Hai-Long^{1,2}, HUANG Bao-Chun^{1*}, QIAO Qing-Qing¹, CHEN Jun-Shan¹

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

2 Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Northwest, PetroChina, Lanzhou 730020, China

Abstract Intracontinental block rotation is the result of interaction between crustal tectonic environment and tectonic activity in the lithospheric mantle. Previous studies show that block rotation patterns in the Eastern North China and the Far Eastern Russian areas are remarkably different on the two sides of the Mudanjiang Fault since the late Mesozoic. Further work about the block rotation on both sides of the Mudanjiang Fault is significantly important for the mechanism of the differential block rotations in the eastern areas of Eurasia. Paleomagnetic studies on the Cretaceous and Paleogene rocks from 51 sampling sites in the Eastern Heilongjiang Province confirm that the Muling, Jixi, Qitaihe and Huanan areas in the east of the Mudanjiang

基金项目 国家自然科学基金委员会《华北克拉通破坏》研究计划重点项目(90714007)资助.

作者简介 王海龙,男,硕士研究生,现主要从事构造磁学研究. E-mail:wang_hail@petrochina.com.cn

* **通讯作者** 黄宝春,男,研究员,主要从事古地磁学研究. E-mail:bchuang@mail.iggcas.ac.cn

Fault are subjected to counterclockwise rotation of about $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ relative to stable North and South China blocks and Eurasia since the Late Cretaceous. The differential rotation of the Eastern North China and the Far Eastern Russian areas is probably due to the re-activation of the Mudanjiang Fault and the subduction of the Pacific Plate since the Cretaceous.

Keywords Jiamusi Block, Cretaceous, Differential rotation, Paleomagnetism, Mudanjiang Fault

1 引言

中生代是中国东部最重要的构造变革时期,这一时期古生代构造格局被打破,滨太平洋域开始发展,不同时期形成的构造互相叠加^[1]. 中国东北及俄罗斯远东地区各拼贴地块和深大断裂的再次活动、盆岭体系的形成、大规模花岗岩带的展布、以及陆内块体的旋转,形成了本区十分复杂的构造图案. 这一系列复杂现象的驱动机制及与华北克拉通破坏之间的关系是地学界关注的焦点.

古地磁学研究表明,相对于稳定的华南、华北地块及欧亚大陆,华北地块东部、东北及俄罗斯远东地区诸块体白垩纪以来均发生了一定规模的旋转,差异性逆时针与顺时针旋转的界限很可能为牡丹江断裂(图 1a). 然而,有关此差异旋转的形成机制众说纷纭^[2~10],早期研究^[7]认为该差异旋转可能与郯庐断裂晚白垩世以来的大规模左旋走滑有关;而 Otofujii 等^[2, 3]通过对俄罗斯远东地区的研究,提出差异旋转是深部地幔对流引起的伸展作用的结果;类似地, Lin 等^[11]则重点针对华北东部及朝鲜半岛上发生的顺时针旋转提出晚白垩世以来中国东部的区域性伸展作用导致了华北东部以渤海湾为枢纽的剪刀式旋转模式. 与此同时, Liu 等^[12]通过对中国东部变质杂岩的研究,提出朝鲜半岛及邻区早白垩世相对旋转是深部物质 SE 向运移的结果. Huang 等^[6]进一步根据华北东部、东北及俄罗斯远东地区白垩纪以来块体旋转的空间分布规律,提出中国东部及俄罗斯远东地区白垩世以来不存在统一的块体旋转样式,各断块之间不仅在旋转量上存在差异,而且在旋转样式(逆时针或顺时针)上也存在显著差异. 除一些很可能与局部断裂活动相关的板条状块体外,中国东部及俄罗斯远东地区很可能以牡丹江断裂为界,发生了旋转样式完全不同的差异性旋转;差异性旋转是太平洋板块的俯冲和深部岩浆等多种因素共同作用的结果. 裴军令等^[10]对中国东北及邻区白垩纪古地磁数据的精细分析,也进一步证实了朝鲜半岛及辽东地区早白垩中、晚期的旋转运动与

太平洋板块俯冲引起的中国东北岩石圈减薄和伸展作用相关. 显然,由多个块体拼合而成的中国东北地区是进一步探索中国东部及俄罗斯远东地区差异性陆内旋转的时空分布规律及形成机制的焦点.

前人研究表明,牡丹江断裂东北侧的佳木斯地块早白垩世以来相对于稳定的华北-华南板块发生了约 50° 的逆时针旋转^[13],且与俄罗斯远东锡霍特-阿林地区的构造旋转样式一致. 为了在更广泛的时空范围内研究牡丹江断裂周边块体晚中生代以来的陆内旋转样式,本文报道黑龙江省东部地区的白垩纪和古近纪岩石的古地磁学研究结果,试图通过对牡丹江断裂两侧块体的旋转样式的进一步厘定,探讨中国东部及俄罗斯远东地区差异性陆内旋转的机制.

2 研究区概况和样品采集

2.1 区域构造背景

黑龙江省东部主要由松嫩、佳木斯、布列亚、兴凯及那丹哈达岭地块组成;这些块体与俄罗斯远东地区的锡霍特-阿林地块一起,夹持在西伯利亚、华北和太平洋板块之间,构成了中国东北及俄罗斯远东地区拼贴块体群的主体(图 1a). 佳木斯地块与其西侧的松嫩地块以沿牡丹江断裂带展布的嘉荫-牡丹江缝合带拼合于早-中侏罗世^[14]. 那丹哈达岭-锡霍特-阿林地块在晚侏罗世中期沿着大和镇断裂拼贴到东北块体群上^[15, 16],拼合后的黑龙江东部块体群分别在三叠纪末和晚侏罗-早白垩世与华北地块和西伯利亚板块碰撞拼合^[17~19].

研究区内分布有四条大型断裂带,分别是郯庐断裂北延到东北地区的两条分支(NE 向的敦密断裂和依兰-伊通断裂)、近南北向的牡丹江断裂和 NNE 向的大和镇断裂(图 1a). 其中,牡丹江断裂是研究区内成生最早、活动时间最长的一条断裂,沿断裂分布着佳木斯地块和松嫩地块拼合时的深大俯冲带,对区内构造发展起着控制作用. 同时,研究区内分布着多个中生代大规模岩浆带,表明其深部作用活动强烈. 总之,黑龙江东部地区横向和垂向作用

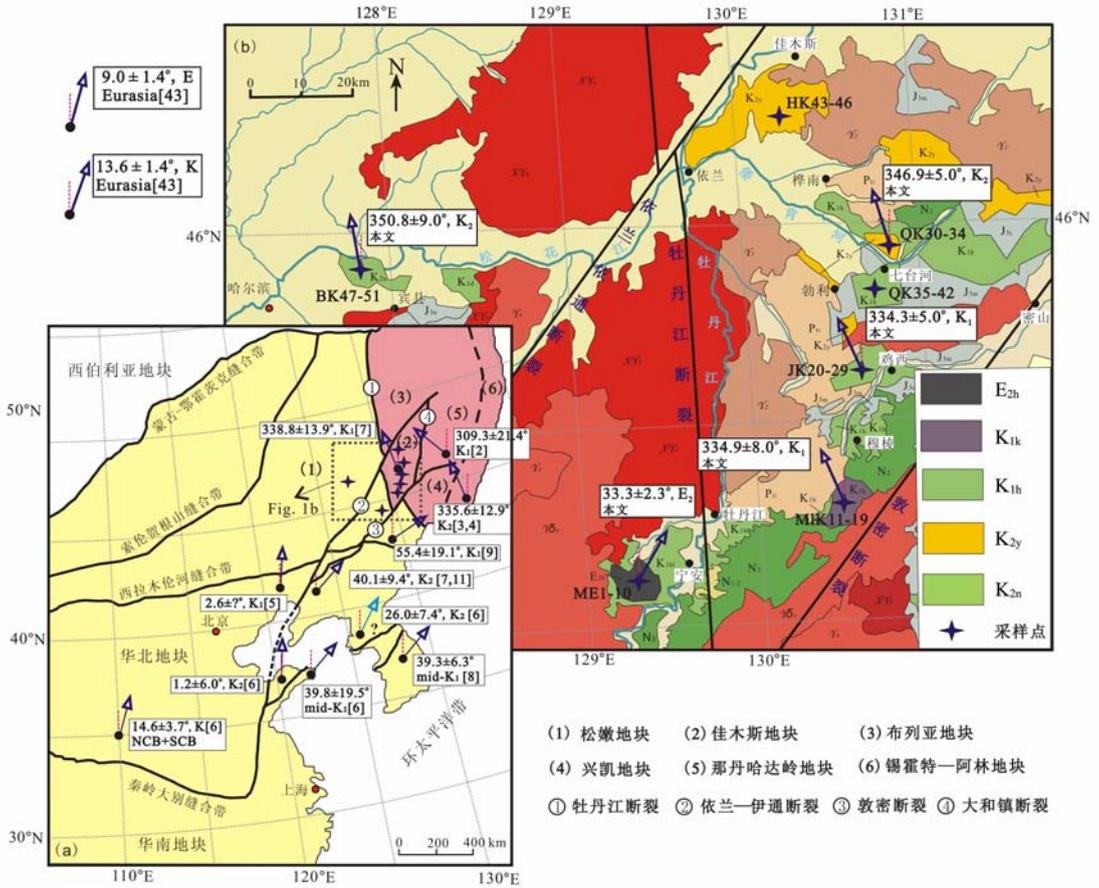


图 1 (a) 中国东部及俄罗斯远东地区大地构造简图及白垩纪古磁偏角分布;

(b) 黑龙江东部地区地质简图及古地磁采样点分布

Fig. 1 (a) Schematic map showing tectonic framework and distribution of Cretaceous paleomagnetic declinations in Eastern China and Far East Russia; (b) Simplified geologic map of the eastern Heilongjiang province showing distribution of paleomagnetic sampling sites

都很强烈,是研究块体旋转和岩石圈演化的理想地区。

2.2 采样地层概述和样品采集

根据黑龙江省东部地区白垩纪及古近纪地层分布和出露情况,本次研究在宁安、穆棱、鸡西、七台河、桦南、及宾县地区选择了 6 条采样剖面,共布置 51 个采点采集 510 块定向岩芯样品,其中始新世 10 个采点,早白垩世 27 个采点,晚白垩世 14 个采点(图 1b、表 1)。在空间分布上,宾县和宁安地区的 2 条采样剖面隶属于牡丹江断裂西侧的松嫩地块,但分别位于依兰—伊通断裂西侧和东侧;佳木斯地块上共布置 4 条采样剖面,分别为穆棱、鸡西、七台河和桦南地区采样剖面,均位于牡丹江断裂东侧和敦密断裂西侧(图 1b)。

宁安地区选择零星出露于宁安县西海浪镇处的一套黑灰色玄武岩。黑龙江省地质局 1976 年的地质调查报告将该套玄武岩划为古新世黄花组的上

段^[20]。但地球化学证据指出,该区玄武岩的年龄为 45 Ma 左右^[21~23],应为始新世的一套地层。

穆棱地区早白垩世康吉组(K_{1k})为一套中性火山岩,夹有中基性火山岩及凝灰岩薄层,常见有安山玢岩、玄武安山玢岩、玄武岩夹凝灰岩。康吉组中的植物化石披针苏铁杉在国内最晚出现于早白垩世,并且考虑到其与下伏下城子组时代间隔不大,故该组时代应为早白垩世^[24]。

鸡西和七台河地区早白垩世猴石沟组(K_{1h})是一套河湖相黄褐色中粒砂岩、泥岩夹细粒砂岩互层,产状平缓。猴石沟组属于上白垩统桦山群,平行不整合于鸡西群杂色碎屑岩系之上;并常被海浪组所覆盖,Sha 等^[25, 26]依据最新的古生物资料将该组归于早白垩世晚期。

七台河和桦南地区的晚白垩世伊林组(K_{2y})以中酸性熔岩及凝灰岩为主,不整合于猴石沟组之上,主要岩性有安山玢岩、凝灰岩夹凝灰砂岩及中粗粒

含砾硬砂质长石砂岩. 9 个采样点分布在凝灰岩岩层中, 共采集 92 块定向样品.

宾县地区被第四系和次森林广泛覆盖, 岩层出露较差. 采样点位于宾县乌河屯北的松花江边上, 主要为乌河组的一套紫红色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩. 乌河组各段在区域上可与泉头组、青山口组和姚家组进行对比^[27], 岩性对比发现, 采样剖面对应于上白垩统青山口组, 两套地层中均含有 *Maedlerisphaera binxianensis*, *Triangulicypris torsuosus*, *Triangulicypris torsuosus var. nota* 等特征化石, 指示其为上白垩统.

综上, 除宁安地区采样地层为始新世玄武岩外, 其他采样剖面均为白垩纪地层; 采样岩性除早白垩世的猴石沟组和晚白垩世乌河组为砂岩、泥岩外, 其余均为火山岩. 每个采点由便携式汽油钻采集不少于 8 块的定向岩芯样品. 除部分沉积岩采用磁罗盘定向外, 所有样品均采用太阳罗盘定向.

3 岩石磁学研究

为了鉴定样品中的磁性矿物, 在每个采样点中选取 1~2 块代表性样品 (共 58 块), 按照岩性分别进行了饱和等温剩磁 (SIRM) 获得曲线及反向场退磁、磁滞回线、 $J-T$ 曲线和 $\kappa-T$ 曲线的测量. SIRM 获得曲线及反向场退磁曲线、磁滞回线和 $J-T$ 曲线利用 VFTB 测量. $\kappa-T$ 曲线利用 KLY-3S 磁化率仪

和 CS-3 温度控制系统在空气环境下完成, 该系统温控精度为 $\pm 2^\circ\text{C}$, 数据采集的温度间隔为 2°C 左右, 升降温速率为 $9^\circ\text{C}/\text{min}$. 所有岩石磁学及退磁和剩磁测量均在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进行.

SIRM 获得曲线及其反向场退磁特征是识别磁性矿物种类及其磁性矿物颗粒分布的重要参数^[28]. 宁安 (ME1-10)、桦南 (HK43-46) 和穆棱 (MLK11-15、18-19) 三个地区样品的 SIRM 获得曲线和反向场退磁曲线结果显示, 样品在 300 mT 场强下呈饱和状态, 剩磁矫顽力位于 20~25 mT 之间 (图 2a); 磁滞回线结果显示, 样品在 200 mT 左右均形成闭合的磁滞回线 (图 2b); 样品的 $J-T$ 曲线显示: 磁化强度在 500~600 $^\circ\text{C}$ 之间迅速降低 (图 2c). 综上, 低矫顽力的亚铁磁性矿物主导了样品的磁性特征, 主要载磁矿物很可能为贫钛磁铁矿或磁铁矿; 样品加热过程中钛磁铁矿至钛铁矿和磁铁矿的转变, 很可能是造成 $J-T$ 曲线不可逆的主要原因.

七台河 (QK30-42) 和穆棱地区 (MLK16-17) 样品的 SIRM 获得曲线和反向场退磁曲线显示, 样品在 1T 仍然没有达到饱和 (图 2d); 磁滞回线结果显示, 样品在 400 mT 左右形成闭合的磁滞回线 (图 2e); $J-T$ 曲线表明样品的解阻温度为 580~600 $^\circ\text{C}$, 加热曲线明显高于冷却曲线 (图 2f). 综合等温剩磁的获得曲线及其反向场退磁特征, 以及磁滞回线和

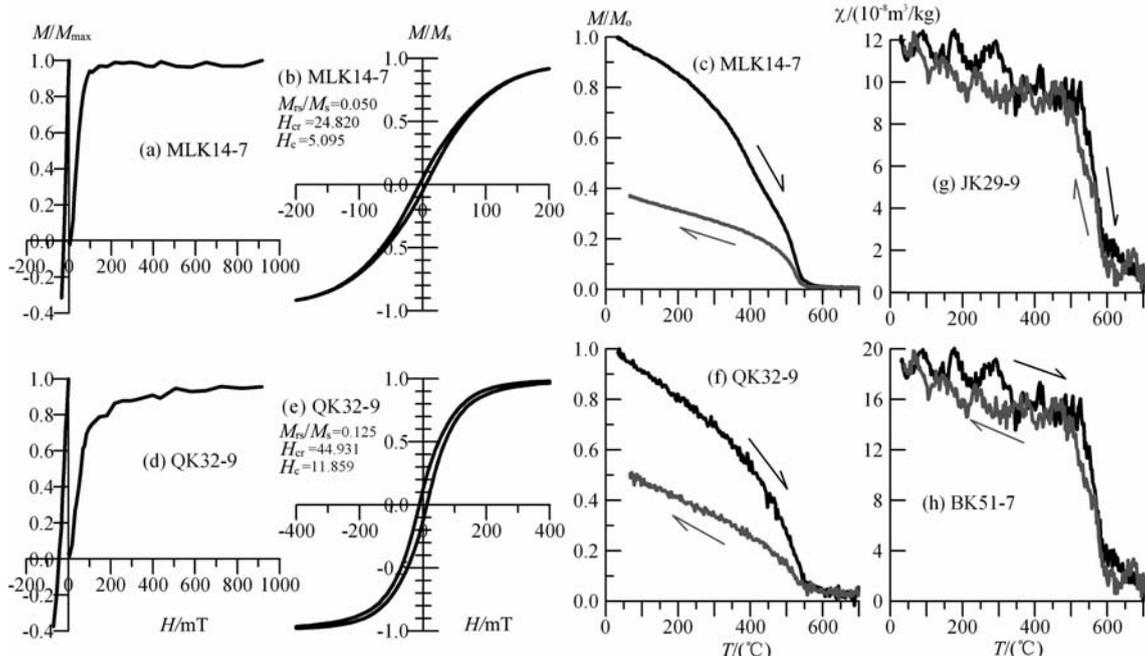


图 2 典型样品的等温剩磁获得曲线 (a, d)、磁滞回线 (b, e)、 $J-T$ 曲线 (c, f) 和 $\kappa-T$ 曲线 (g, h)

Fig. 2 Behaviors of acquisition of isothermal remanent magnetization (IRM) (a, d), hysteresis loop (b, e), $J-T$ (c, f) and $\kappa-T$ (g, h) curves for pilot samples from the eastern areas of Heilongjiang province

$J-T$ 曲线,可知主导样品磁学特征的是低矫顽力的磁铁矿,但样品加热过程中可能存在钛磁铁矿向钛铁矿和磁铁矿的转变。

宾县(BK47-51)和鸡西地区(JK20-29)的泥岩和砂岩样品的 $\kappa-T$ 曲线表现出相似的行为(图 2 (g~h)):冷却曲线和升温曲线基本重合,且在 550~580℃ 温度区间内和 ~680℃ 附近磁化率均有显著下降;表明这些砂岩和泥岩样品的主要载磁矿物为磁铁矿和赤铁矿。

4 古地磁结果分析

样品的退磁实验使用 TD-48 热退磁炉,热退磁的温度间隔在低温阶段选择 50~100℃,高温阶段为 10~30℃,剩磁测量在 2G-755R 低温超导磁力仪上完成。剩磁组分的分离主要采用主成分分析法^[29],部分样品使用重磁化大圆弧法^[30];剩磁方向的统计平均采用球面单位矢量的 Fisher 统计平均^[31]或单位矢量和重磁化大圆弧的混合平均^[32]。样品的退磁和测量均在中心小于 300 nT 的磁屏蔽空间中进行。

4.1 宁安地区始新世黄花组(E_{2h})

宁安地区始新世黄花组玄武岩样品(ME1-10)

经系统热退磁后,在 250℃ 以下分离得到低温剩磁分量;高温特征剩磁分量(ChRM)通常出现在 300℃ 以上,阻挡温度分布在 580℃ 左右(图 3(a, b))。从各采样点分析统计可以发现低温剩磁分量($D/I=352^\circ/58^\circ, \alpha_{95}=4.3^\circ$)非常接近于现代地磁场方向($D/I=352^\circ/61^\circ$),应为近代地磁场的黏滞剩磁。在总计 101 块样品的系统退磁中,83 块样品分离出稳定特征剩磁,其中 6 个采点(ME1-6)为反极性。产状校正前后高温 ChRM 的平均方向分别为: $D_g=0.9^\circ, I_g=58.1^\circ, \kappa=32, \alpha_{95}=4.3^\circ$ 和 $D_s=33.3^\circ, I_s=60.0^\circ, \kappa=451, \alpha_{95}=2.3^\circ$ (图 4a)。高温 ChRM 在 95% 置信水平上通过了褶皱检验^[33,34]和 A 级倒转检验^[35](表 1),表明该组分应为原生剩磁。层面坐标下的 ChRM 对应的极位置为:65.4°N, 215.1°E, $K/A_{95}=278.4/2.9^\circ$ 。

4.2 穆棱地区早白垩世康吉组(K_{1k})

穆棱地区早白垩世康吉组火山岩样品(MLK11-19)经系统热退磁后,多数样品在 400℃ 以下分离得到低温剩磁分量,少数在 250℃ 以下得到;高温特征剩磁分量(ChRM)通常出现在 430℃ 以上,少数出现在 300℃ 以上,阻挡温度分布在 580~620℃ 之间不等(图 3c),其中 MLK16-17 两采点样

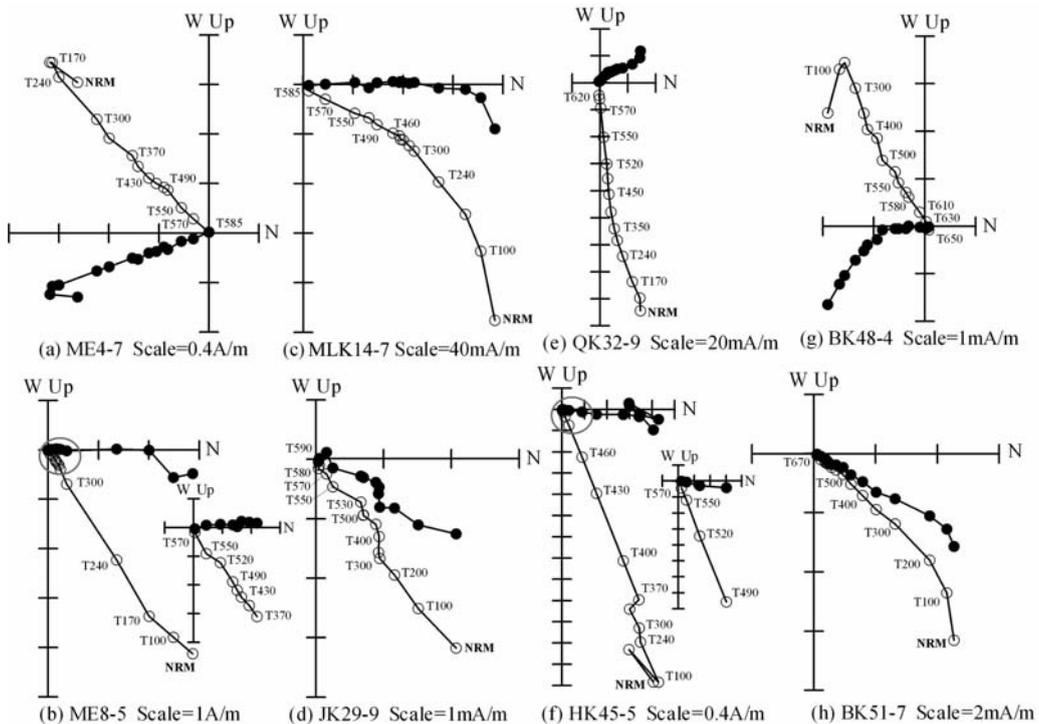


图 3 代表样品倾斜校正前的系统热退磁结果的正交矢量图;

实心圆和空心圆分别代表剩磁方向在水平面和铅垂面上的投影

Fig. 3 Orthogonal vector plots of progressive thermal demagnetization for representative specimens in-situ. Solid and open circles indicate vector endpoints projected onto the horizontal and vertical planes, respectively

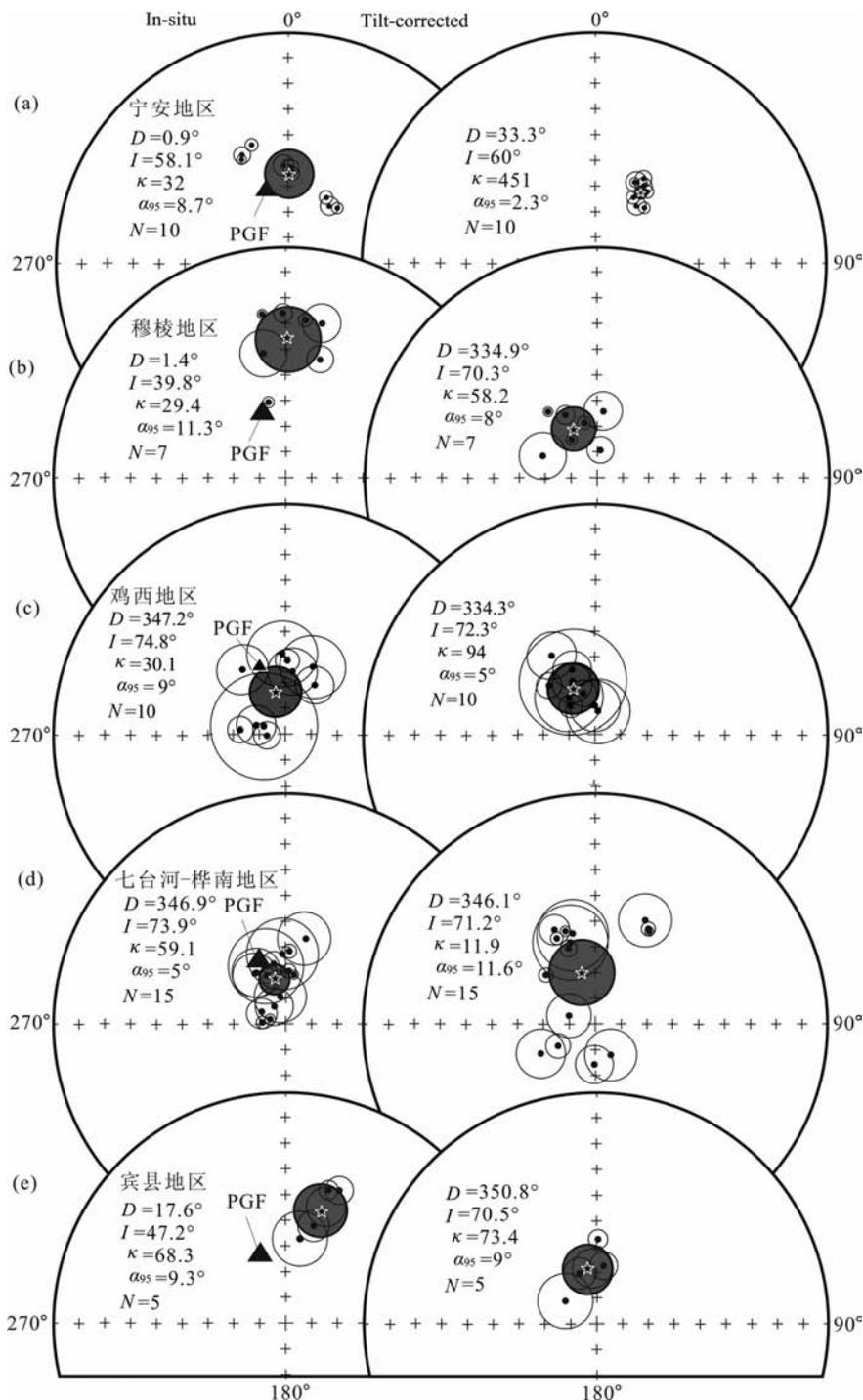


图4 黑龙江东部地区古近纪-白垩纪样品的特征剩磁方向及采点平均方向的95%置信椭圆的等面积投影图,

左侧为倾斜校正前,右侧为倾斜校正后;三角形为现代地磁场的方向

Fig. 4 Equal-area projections of directions of characteristic remanences isolated from Cretaceous and Paleogene rocks from the eastern areas of Heilongjiang before (left) and after (right) tilt-correction; triangles represent the direction of the present geomagnetic field

品在 670°C 磁清洗仍不完全,说明样品中存在高矫顽力的赤铁矿.从各采样点分析统计可以发现低温剩磁分量在地层坐标下完全发散;地理坐标下的平均方向($D/I=355^{\circ}/57^{\circ}$, $\alpha_{95}=4.2^{\circ}$)非常接近于现代地磁场方向($D/I=352^{\circ}/61^{\circ}$),故应为近代地磁场的

黏滞剩磁.在81块可以分离出高温 ChRM 的样品中,采点 MLK16 和 MLK17 的 ChRM 与其他采点明显偏离(表1),故被舍弃.其余7个采点的高温 ChRM 的平均方向产状校正前为: $D_g=1.4^{\circ}$, $I_g=39.8^{\circ}$, $\kappa=29.4$, $\alpha_{95}=11.3^{\circ}$;产状校正后为: $D_s=$

表 1 黑龙江东部地区白垩-古近纪古地磁采样及特征剩磁分量数据表
 Table 1 Summary of paleomagnetic sampling details and site-mean characteristic remanences
 for Cretaceous-Paleogene rocks from the East of Heilongjiang Province

采点	采样位置		岩性	层位	倾向(°)/ 倾角(°)	n/N	D _g (°)	I _g (°)	D _s (°)	I _s (°)	κ	α ₉₅ (°)
	纬度(°N)	经度(°E)										
ME1	44.303	129.169	玄武岩	E _{2h}	0/0	7/10	215.8	-64.9	215.8	-64.9	356.6	3.2
ME2	44.304	129.169	玄武岩	E _{2h}	0/0	8/10	222.5	-63.7	222.5	-63.7	850.1	1.9
ME3	44.303	129.168	玄武岩	E _{2h}	0/0	7/10	209.9	-63.0	209.9	-63.0	633.1	2.4
ME4	44.300	129.239	玄武岩	E _{2h}	110/38	8/10	157.3	-47.5	211.0	-59.5	392.1	2.8
ME5	44.300	129.239	玄武岩	E _{2h}	110/38	8/10	156.3	-49.3	213.3	-61.0	1061.5	1.7
ME6	44.300	129.239	玄武岩	E _{2h}	110/38	8/9	163.0	-45.2	210.0	-55.0	580.5	2.3
ME7	44.287	129.081	玄武岩	E _{2h}	110/20	9/10	1.8	55.8	32.5	56.9	392.8	2.6
ME8	44.287	129.081	玄武岩	E _{2h}	110/20	9/11	357.3	54.9	27.7	57.6	194.5	3.7
ME9	44.287	129.081	玄武岩	E _{2h}	110/20	9/10	3.4	58.1	36.3	58.1	601.5	2.1
ME10	44.287	129.080	玄武岩	E _{2h}	110/20	10/11	1.2	58.8	35.5	59.4	1926.2	1.1
采点平均						(10/10)	0.9	58.1	33.3	60.0	32.0	8.7
											451.0	2.3
McElhiny 褶皱检验 ^[33] : N=10, κ _s /κ _g =14.16>F(18,18)=2.22, 表明其在 95%置信区间内通过了褶皱检验;												
McFadden 褶皱检验 ^[34] : N=10, 地理坐标下 ξ ₂ =4.711, 层面坐标下 ξ ₂ =1.527, 95%临界值 ξ=3.685, 褶皱检验结果为正;												
倒转检验 ^[35] : N ₁ =6, R ₁ =6.0, N ₂ =4, R ₂ =4.0, r ₀ =2°<r _c =4.5°, 表明其通过了 A 级倒转检验.												
MLK11	44.602	130.353	玄武岩	K _{1k}	200/40	10/11	351.9	29.1	324.0	60.2	1190.0	1.4
MLK12	44.603	130.353	玄武岩	K _{1k}	200/40	8/9	359.1	29.9	334.1	64.5	237.6	3.6
MLK13	44.603	130.353	玄武岩	K _{1k}	200/40	9/10	7.0	31.8	347.1	69.4	364.3	2.7
MLK14	44.604	130.353	安山玢岩	K _{1k}	200/40	8/10	349.9	44.6	293.3	69.0	47.7	8.1
MLK15	44.594	130.341	凝灰岩	K _{1k}	195/13	9/10	347.2	62.7	327.4	73.2	818.2	1.8
* MLK16	44.607	130.359	安山玢岩	K _{1k}	213/33	9/10	314.6	68.9	251.2	55.3	1177.5	1.5
* MLK17	44.607	130.359	安山玢岩	K _{1k}	212/40	10/11	325.5	66.5	250.0	53.6	1618.9	1.2
MLK18	44.615	130.413	安山玢岩	K _{1k}	200/34	8/10	16.3	45.8	5.7	79.5	134.1	4.8
MLK19	44.615	130.412	安山玢岩	K _{1k}	200/34	10/11	12.8	32.1	5.1	65.6	51.4	6.8
采点平均						(7/9)	1.4	39.8	334.9	70.3	29.4	11.3
											58.2	8.0
McElhiny 褶皱检验 ^[33] : N=7, κ _s /κ _g =1.98<F(12,12)=2.69, 在 95%置信区间内无意义;												
McFadden 褶皱检验 ^[34] : N=7, 地理坐标下 ξ ₂ =3.439, 层面坐标下 ξ ₂ =2.447, 95%临界值 ξ=3.086, 褶皱检验结果为正.												
JK20	45.265	130.940	砂岩	K _{1h}	359/16	4/9	289.9	82.0	336.9	69.8	24.8	18.8
JK21	45.265	130.940	砂岩	K _{1h}	359/16	8/11	275.3	74.2	316.4	66.4	152.4	4.5
JK22	45.265	130.940	砂岩	K _{1h}	9/15	8/11	286.4	79.4	335.7	70.6	65.4	6.9
JK23	45.265	130.940	砂岩	K _{1h}	9/15	7/10	265.0	83.6	343.9	75.2	165.8	4.7
JK24	45.277	130.810	砂岩	K _{1h}	209/18	5/11	22.3	64.3	7.9	81.9	46.8	11.3
JK25	45.277	130.809	砂岩	K _{1h}	209/18	7/10	357.8	61.4	324.5	74.1	26.3	12.0
JK26	45.276	130.810	砂岩	K _{1h}	211/19	8/11	1.7	64.0	318.8	77.0	183.4	4.1
JK27	45.298	130.855	砂岩	K _{1h}	130/20	8/10	326.5	62.6	359.7	80.1	39.7	8.9
JK28	45.281	130.809	砂岩	K _{1h}	286/20	8/10	6.6	67.8	330.9	58.1	43.4	8.5
JK29	45.281	130.809	砂岩	K _{1h}	286/20	9/10	31.0	69.9	340.4	65.9	60.0	6.7
采点平均						(10/10)	347.2	74.8	334.3	72.3	30.1	9.0
											94.0	5.0
McElhiny 褶皱检验 ^[33] : N=10, κ _s /κ _g =3.12>F(18,18)=2.22, 在 95%置信区间内通过了褶皱检验;												
McFadden 褶皱检验 ^[34] : N=10, 地理坐标下 ξ ₂ =8.846, 层面坐标下 ξ ₂ =6.270, 99%临界值 ξ=5.120, 褶皱检验结果不确定.												

续表 1

采点	采样位置		岩性	层位	倾向(°)/ 倾角(°)	n/N	D _g (°)	I _g (°)	D _s (°)	I _s (°)	κ	α ₉₅ (°)
	纬度(°N)	经度(°E)										
QK30	45.880	130.884	凝灰岩	K _{2y}	343/10	7/9	339.5	71.6	340.7	61.6	434.0	2.9
QK31	45.880	130.884	凝灰岩	K _{2y}	246/22	9/10	3.4	64.1	314.8	65.4	460.8	2.4
QK32	45.936	130.795	凝灰岩	K _{2y}	351/32	9/10	287.5	84.6	342.5	55.3	734.5	1.9
QK33	45.936	130.795	凝灰岩	K _{2y}	349/31	10/11	272.6	82.6	335.9	56.6	320.9	2.7
QK34	45.936	130.795	凝灰岩	K _{2y}	349/31	8/10	294.1	81.0	336.7	53.2	106.1	5.4
QK35	45.695	130.872	砂岩	K _{1h}	197/31	5/10	330.8	68.9	241.2	68.1	78.3	8.7
QK36	45.695	130.872	砂岩	K _{1h}	197/31	7/10	349.1	68.1	238.8	74.8	189.1	4.4
QK37	45.694	130.872	砂岩	K _{1h}	172/14	8/9	326.0	69.9	287.7	80.4	45.5	8.3
QK38	45.694	130.872	砂岩	K _{1h}	170/21	8/10	328.6	82.7	180.7	75.6	69.3	6.7
QK39	45.694	130.872	砂岩	K _{1h}	161/22	9/11	350.6	80.2	153.4	77.6	32.3	9.2
QK40	45.977	130.732	砂岩	K _{1h}	312/10	6/8	357.5	64.9	345.9	57.2	28.3	12.8
* QK41	45.977	130.733	砂岩	K _{1h}	318/14	6/8	77.7	74.8	22.6	75.5	2.9	47.5
* QK42	45.977	130.733	砂岩	K _{1h}	305/10	6/10	8.5	21.7	5.3	17.0	5.9	30.1
HK43	46.480	130.308	凝灰岩	K _{2y}	346/9	5/10	341.7	68.5	343.0	59.5	35.1	13.1
HK44	46.481	130.308	凝灰岩	K _{2y}	64/14	8/11	12.4	58.4	25.9	48.4	34.9	9.5
HK45	46.554	130.353	凝灰岩	K _{2y}	52/24	9/10	3.8	71.2	29.5	51.0	392.8	2.6
HK46	46.554	130.353	凝灰岩	K _{2y}	48/23	10/11	10.1	72.3	30.5	51.6	911.5	1.6
	采点平均					(15/17)	346.9	73.9	346.1	71.2	59.1	5.0
											11.9	11.6
McElhiny 褶皱检验 ^[33] : N=15, κ _g /κ _s =4.97>F(28,28)=1.88, 在 95%置信区间褶皱检验结果为负;												
McFadden 褶皱检验 ^[34] : N=15, 地理坐标下 ξ ₂ =1.501, 层面坐标下 ξ ₂ =14.169, 95%临界值 ξ=4.510, 褶皱检验结果为负.												
BK47	45.919	127.389	泥岩	K _{2n}	224/25	8/9	18.0	39.1	1.1	60.0	251.3	3.5
BK48	45.919	127.389	泥岩	K _{2n}	225/24	8/12	195.7	-53.8	161.2	-71.2	98.8	5.6
BK49	45.919	127.389	泥岩	K _{2n}	218/28	8/9	18.9	45.6	355.3	70.3	65.4	6.9
BK50	45.919	127.389	泥岩	K _{2n}	218/28	8/10	190.4	-59.5	126.2	-76.4	32.9	9.8
BK51	45.919	127.389	泥岩	K _{2n}	213/33	7/8	21.9	37.6	7.5	69.3	135.7	5.2
	采点平均					(5/5)	17.6	47.2	350.8	70.5	68.3	9.3
											73.4	9.0
	样品平均					(38/48)	17.4	45.6	351.3	69.2	47.5	3.4
											48.6	3.4
Watson and Enkin 褶皱检验: ChRM 的最大集中程度在产状展平至 68±39% 时获得;												
McElhiny 褶皱检验 ^[33] : N=5, κ _s /κ _g =1.02<F(8,8)=3.44, 在 95%置信区间无意义;												
McFadden 褶皱检验 ^[34] : N=5, 地理坐标下 ξ ₂ =0.628, 层面坐标下 ξ ₂ =0.617, 95%临界值 ξ=2.609, 检验结果不确定.												

注: n/N, 参加统计的样品数和参加退磁的样品数(圆括号内为参加统计的采点数/系统退磁的采点数); D_g, I_g: 分别代表地理坐标下的剩磁偏角和倾角; D_s, I_s: 分别代表层面坐标下的剩磁偏角和倾角; κ: Fisher 统计精度参数; α₉₅: 95%置信圆锥半顶角。*注: 被舍弃的采样点。

334.9°, I_s=70.3°, κ=58.2, α₉₅=8°(图 4b)。如表 1, 高温 ChRM 通过了 McFadden 褶皱检验^[34], 且逐步倾斜校正表明其最大集中程度在产状展平至(108±7)% 时获得, 同样指示该组分应为原生剩磁。层面坐标下 ChRM 对应极位置为: 71.1°N, 82.4°E, K/A₉₅=22.1/13.1°。

4.3 鸡西地区早白垩世猴石沟组(K_{1h})

鸡西地区早白垩世猴石沟组砂岩样品(JK20-29)经系统热退磁后, 低温剩磁分量在 300°C 以下分离得到; 72 块可分离出高温稳定 ChRM 的样品中, ChRM 通常出现在 350°C 以上, 阻挡温度分布在 570°C 左右(图 3d)。尽管绝大多数样品的 ChRM 均

可用主成分分析法获得,但部分样品退磁矢量在高温阶段显示出重磁化大圆弧的特征,对这些样品采用重磁化大圆弧法进行分析.低温剩磁分量在地理坐标系下的集中程度明显高于层面坐标系($\kappa_g/\kappa_s=32.2/19$),平均方向($D_g=2^\circ, I_g=58^\circ, \alpha_{95}=3.9^\circ$)与现代地磁场方向($D/I=352^\circ/61^\circ$)接近,表明其同样为近代场的重磁化分量. ChRM 平均方向经 Fisher 统计平均后,校正前后的平均方向分别为: $D_g=347.2^\circ, I_g=74.8^\circ, \kappa=30.1, \alpha_{95}=9.0^\circ$ 和 $D_s=334.3^\circ, I_s=72.3^\circ, \kappa=94.0, \alpha_{95}=5.0^\circ$ (图 4c). 同样,高温 ChRM 通过了褶皱检验^[33](表 1). 层面坐标下的 ChRM 对应的极位置为: $69.8^\circ\text{N}, 90.4^\circ\text{E}, K/A_{95}=37.6/8.0^\circ$.

4.4 七台河及桦南地区早白垩世猴石沟组(K_{1h})和晚白垩世伊林组(K_{2y})

七台河和桦南地区晚白垩世伊林组凝灰岩样品(QK30-34, HK43-46)和七台河地区早白垩世猴石沟组砂岩样品(QK35-42)的系统热退磁显示,在 250°C 以下分离得到低温剩磁分量;高温 ChRM 通常出现在 300°C 以上,阻挡温度分布在 $550\sim 600^\circ\text{C}$ 之间不等(图 3(e, f)). 低温剩磁分量在产状校正后集中程度略有下降($\kappa_s/\kappa_g=10.3/13.8$),地理坐标系下的平均方向($D/I=0.1^\circ/61^\circ, \alpha_{95}=7.3^\circ$)与现代地磁场方向($D/I=351^\circ/62^\circ$)没有显著差别,说明该分量同样为近代场的重磁化. 采点 QK41 和 QK42 的高温 ChRM 点内离散度很大,故被舍弃. 其余采点的 ChRM 经 Fisher 统计平均后,地理和层面坐标下的平均方向分别为: $D_g=346.9^\circ, I_g=73.9^\circ, \kappa=59.1, \alpha_{95}=5^\circ$ 和 $D_s=346.1^\circ, I_s=71.2^\circ, \kappa=11.9, \alpha_{95}=11.6^\circ$ (图 4d). 如表 1, 高温 ChRM 褶皱检验^[33]结果均为负,逐步倾斜校正^[35]表明其最大集中程度在产状展平至 $(9.0\pm 4.8)\%$ 时获得,表明该组分很可能为褶皱末期获得的重磁化分量. 该组分地理坐标系下的平均方向对应的极位置为: $72.7^\circ\text{N}, 107.2^\circ\text{E}, K/A_{95}=20.9/8.6^\circ$.

侏罗纪以来,中国东部一直处于太平洋板块的俯冲作用下,特别是晚白垩世晚期太平洋板块的碰撞、俯冲作用使得中国东部处于 SE-NW 向挤压和 NE-SW 向伸展环境下,造成了该时期大规模的岩浆活动、盆地形成和郯庐断裂北延部分的逆冲和左行走滑,形成了大规模的逆冲推覆和区域褶皱^[1, 36~42]. 晚白垩世末研究区发生了强烈的嫩江运动,引起了区内广泛的构造反转和桦南隆起的再次隆升^[42]. 褶皱检验结果表明上述重磁化分量在褶皱末期获得,且

同时出现在早白垩和晚白垩世地层中,故推测其为晚白垩末获得的磁化组分.

4.5 宾县地区晚白垩世乌河组(K_{2n})

宾县地区晚白垩世乌河组泥岩样品经系统热退磁后,39 块样品可分离出稳定的 ChRM. 高温 ChRM 通常出现在 300°C 以上,阻挡温度主要分布在 $650\sim 670^\circ\text{C}$ 之间(图 3g, h),个别样品的 ChRM 在 580°C 左右解阻;部分样品的高温退磁路径呈重磁化大圆弧分布,对这些样品使用重磁化大圆弧法进行分析. ChRM 以正极性为主,但采点 BK48 和 BK50 为反极性. 产状校正前,ChRM 的平均方向为: $D_g=17.6^\circ, I_g=47.2^\circ, \kappa=68.3, \alpha_{95}=9.3^\circ$;校正后为: $D_s=350.8^\circ, I_s=70.5^\circ, \kappa=73.4, \alpha_{95}=9^\circ$ (图 4e). 由于采样剖面为单斜地层,ChRM 的褶皱检验结果不确定(表 1),但无论是在采点水平上还是在样品水平上,地层产状校正后,ChRM 的集中程度均有一定程度提高,且逐步倾斜校正分析表明其最大集中程度出现在 $(68\pm 39)\%$ 的倾斜校正水平上,表明其可能为岩石形成时期或接近岩石形成时期获得的磁化. 该组分层面坐标下的平均方向对应的极位置为: $78.5^\circ\text{N}, 95.7^\circ\text{E}, K/A_{95}=28.2/14.7^\circ$.

5 讨论与结论

对黑龙江省东部宁安等地区白垩纪和古近纪样品的研究表明,51 个古地磁采样点中有 4 个采点或未能分离出有统计意义的 ChRM,或平均方向显著偏离采样剖面内的其他采点,故被舍弃;其余 47 个采点的 ChRM 中,七台河及桦南地区早白垩世猴石沟组和晚白垩世伊林组的 ChRM 褶皱检验结果为负,且逐步倾斜校正分析表明其为褶皱末期获得的重磁化分量;进一步对该区区域构造环境分析表明其很可能是晚白垩世末获得的重磁化;宁安、穆林和鸡西 3 条剖面的 ChRM 组分均具有正的褶皱检验结果,宁安地区始新世玄武岩样品中的 ChRM 还具有双极性特征,且在 95% 置信水平上通过了 A 级倒转检验. 为此,这些剖面的 ChRM 均可解释为岩石形成时期或接近岩石形成时期获得的原生剩磁. 松嫩地块宾县地区采样剖面为单斜地层,褶皱检验^[33, 34]结果不显著,我们仅根据逐步倾斜校正结果将其解释为原生剩磁.

首先,如图 1 所示,宾县采样剖面位于依兰伊通断裂西侧,晚白垩世以来相对于稳定的华南、华北及欧亚大陆发生了约 25° 的逆时针旋转(表 2);结合辽

表 2 黑龙江东部地区相对于西伯利亚、华北—华南、欧亚块体白垩纪以来的旋转

Table 2 Summary of computed post-Cretaceous rotations of the eastern areas of Heilongjiang province relative to the Siberia, North-South China Block and Eurasia

块体 ^a	时代 (Ma)	参考极位置			资料 来源 文献	采样剖面			时代 (Ma)	观测极位置				$R \pm \Delta R$
		纬度(°N)	经度(°E)	A_{95} (°)		剖面	纬度(°N)	经度(°E)		纬度(°N)	经度(°E)	K	A_{95} (°)	
K-S	40	72.0	202.6	6.5	[45]									7.8 ± 7.5
EUR	E ₂	80.9	160.8	1.8	[43]	宁安地区	44.3	129.2	E ₂	65.4	215.1	278.4	2.9	25.7 ± 3.5
NCB+SCB	E	87.4	216.0	5.0	[46]									29.8 ± 5.9
SIB	75	82.2	188.5	6.1	[44]									-21.1 ± 20.1
EUR	K	80.1	193.7	2.1	[43]	宾县地区	45.9	127.4	K ₂	78.5	95.7	28.2	14.7	-24.5 ± 19.1
NCB+SCB	K	77.7	206.6	3.1	[6]									-28.4 ± 19.2
SIB	75	82.2	188.5	6.1	[44]									-34.8 ± 18.0
SIB	120	72.3	186.4	6.0	[44]	穆稜地区	44.6	130.4	K ₁	71.1	82.4	22.1	13.1	-49.1 ± 18.2
EUR	K	80.1	193.7	2.1	[43]									-38.1 ± 16.9
NCB+SCB	K	77.7	206.6	3.1	[6]									-42.2 ± 17.1
SIB	75	82.2	188.5	6.1	[44]									-35.4 ± 13.1
SIB	120	72.3	186.4	6.0	[44]	鸡西地区	45.3	130.9	K ₁	69.8	90.4	37.6	8.0	-49.9 ± 13.4
EUR	K	80.1	193.7	2.1	[43]									-38.8 ± 11.5
NCB+SCB	K	77.7	206.6	3.1	[6]									-43.0 ± 11.7
SIB	75	82.2	188.5	6.1	[44]									-24.5 ± 14.8
EUR	K	80.1	193.7	2.1	[43]	七台河—桦南地区	46.0	130.7	K ₂	72.7	107.2	20.9	8.6	-28.0 ± 13.3
NCB+SCB	K	77.7	206.6	3.1	[6]									-32.1 ± 13.5
SIB	75	82.2	188.5	6.1	[44]									-30.5 ± 10.1
EUR	K	80.1	193.7	2.1	[43]	佳木斯地块 ^b	45.5	130.7	K	71.7	95.9	25.1	5.2	-34.0 ± 7.8
NCB+SCB	K	77.7	206.6	3.1	[6]									-38.1 ± 8.1

注: K , 统计的精度参数; A_{95} , 古地磁极 95% 置信圆锥半顶角; $R \pm \Delta R$, 相对于各块体的旋转量(±, CW/CCW). ^a 各参考块体: EUR-欧亚板块, SIB-西伯利亚板块, NCB-华北块体, SCB-华南块体, K-S-Khaton-Sudal. ^b 佳木斯地块是穆稜、鸡西、七台河三个地区采样点的综合统计.

西地区早白垩世地层中所观测到的较小量逆时针相对旋转^[5], 华北东部和东北地区似乎以东北向的郯庐—依兰伊通断裂为界, 白垩纪以来发生了相对旋转样式完全不同的陆内变形. 但是, 宾县地区和辽西地区所观测到的白垩纪以来的逆时针相对旋转^[5] 是否表明郯庐—依兰伊通断裂带西侧的华北东部及东北大部分地区均发生了一定量的逆时针相对旋转还有待于进一步研究.

其次, 位于依兰伊通断裂之东侧、牡丹江断裂西南侧的宁安地区始新世以来相对于稳定的华南、华北地块和欧亚大陆发生了约 25°~30°的顺时针旋转; 其旋转样式不仅与其东南方向上的延边地区早白垩世地层中所观测到的相对旋转^[9] 一致, 而且与郯庐断裂东侧的华北东部地区(胶东、辽东及朝鲜半岛)白垩纪以来的陆内旋转样式一致(图 1). 这进一步表明郯庐—依兰伊通断裂带东侧的华北东部及东北大部分地区, 白垩纪以来相对于稳定的华南、华北地块发生了显著顺时针旋转; 但由于局部次一级断裂的影响以及这些陆内相对旋转在旋转发生的时间上可能存在的显著差异, 这些白垩纪以来的顺时针相对旋转在旋转量上存在显著差异. 因此, 郯庐—依

兰伊通断裂带东侧的华北东部及东北大部分地区, 尽管白垩纪以来的总体运动趋势一致, 但不具有刚性或准刚性块体的整体运动特征.

以相对稳定的华南、华北及欧亚大陆为参考^[6, 43~46], 牡丹江断裂东侧的各采样剖面均发生了 30°~40°的逆时针旋转(图 1, 图 5 及表 2). 由于七台河及桦南地区的特征剩磁为晚白垩世末获得的次生剩磁, 且与佳木斯地块上其他白垩纪剖面上所观测到的逆时针相对旋转量相当, 这表明一方面佳木斯地块在白垩纪相对于稳定欧亚大陆未发生显著的构造旋转; 另一方面晚白垩世末以来佳木斯地块仍具有准刚性块体的特征, 整体发生了约 30°~40°的逆时针旋转. 该逆时针相对旋转与俄罗斯远东的锡霍特—阿林地区所观测到的白垩纪以来的逆时针相对旋转大致相当^[2, 3], 进一步验证了中国东部至俄罗斯远东地区大致以牡丹江断裂为界, 白垩纪以来发生了显著的镜像相对旋转(即相对旋转样式完全相反)^[6].

晚侏罗世中期, 黑龙江东部各块体基本拼合完毕^[15, 16, 47], 牡丹江断裂为布列亚—佳木斯—兴凯地块与松嫩地块的碰撞缝合带. 晚侏罗—早白垩世, 鄂

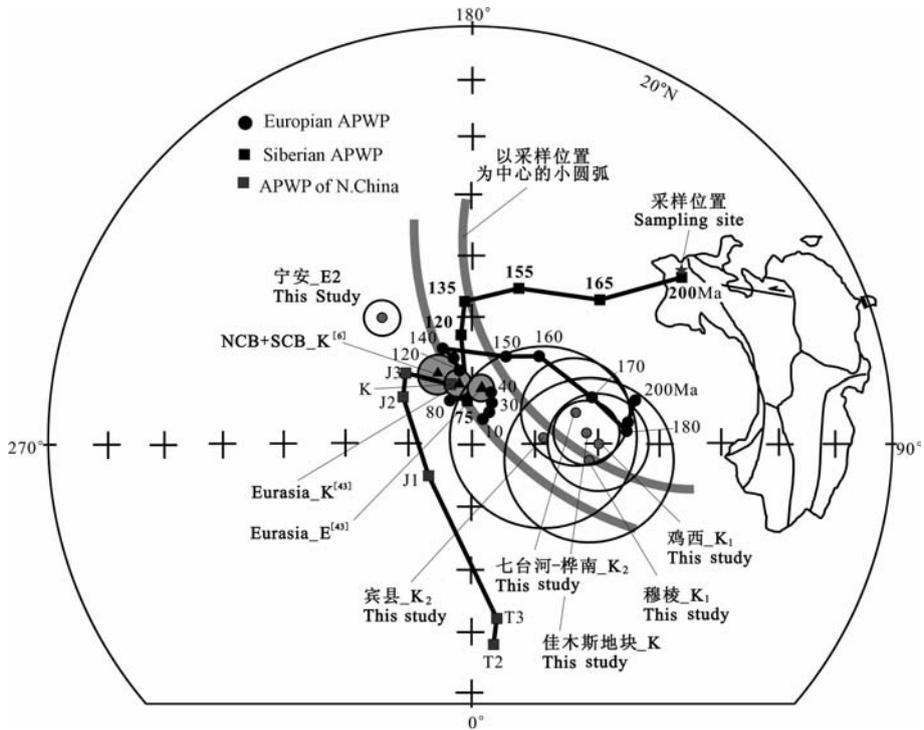


图 5 欧亚、西伯利亚和华北地块中、新生代视极移曲线及各采样剖面古地磁极的等面积投影图(北半球面投影)

Fig. 5 Equal-area projection of post Mesozoic apparent polar wander paths for Eurasia, Siberia, North China as well as paleomagnetic poles obtained from each sampling section in the eastern areas of Heilongjiang province; all the data are plotted onto the Northern Hemisphere

霍次克海的闭合碰撞和 Izanagi 板块的俯冲碰撞使得黑龙江东部地区先后处于挤压和挤压后伸展的应力下,并造成了该区强烈的软流圈上隆和大量岩浆上涌^[37, 48~55],沿牡丹江断裂展布的大型深俯冲带既是构造薄弱带,也是岩浆上涌的通道和热流聚集地带.高热流岩浆的长期底侵加热,最终软化和弱化了俯冲带,为牡丹江断裂带的再次活动创造了前提条件.白垩纪以来,太平洋板块对中国东部的碰撞俯冲及俯冲方向的变化^[37~39]使得牡丹江断裂两侧的块体在该断裂带重新活化的基础上发生了显著的镜像相对旋转(图 1).

总之,本次研究所获古地磁结果表明,黑龙江东部牡丹江断裂东侧的佳木斯地块晚白垩世以来相对于稳定的华南、华北地块及欧亚大陆发生了约 30°~40°的逆时针旋转,与俄罗斯远东锡霍特—阿林地区的逆时针旋转一致;同时,现有古地磁结果仍支持华北东部至俄罗斯远东地区大致以牡丹江断裂为界,白垩世以来发生了显著的镜像相对旋转的观点.该镜像相对旋转的主要动力主要与太平洋板块白垩纪以来的强烈俯冲作用和作为布列亚—佳木斯—兴凯地块俯冲碰撞边界的牡丹江断裂的重新活化有关.然而,郯庐—依兰伊通断裂西侧的华北东部是否发生了显著的相对旋转,以及华北地块东部及东北大部分地区白垩纪以来的陆内相对旋转在空间上是否具有以郯庐—依兰伊通断裂为中心的“弥散式扇状”分布特征^[56]仍有待于进一步研究.

致 谢 感谢庄忠海先生和两位审稿人所提供的帮助和很多有益的讨论.

参考文献(References)

- [1] 万天丰, 朱 鸿. 中国大陆及邻区中生代—新生代大地构造与环境变迁. 现代地质, 2002, **16**(2): 107~120
Wan T F, Zhu H. Tectonics and environment change of Meso-Cenozoic in China continent and its adjacent areas. *Geoscience* (in Chinese), 2002, **16**(2): 107~120
- [2] Otofujii Y I, Miura D, Takaba K, et al. Counter-clockwise rotation of the eastern part of the Mongolia block: Early Cretaceous palaeomagnetic results from Bikin, Far Eastern Russia. *Geophysical Journal International*, 2006, **164**(1): 15~24
- [3] Otofujii Y I, Matsuda T, Enami R, et al. Late Cretaceous palaeomagnetic results from Sikhote Alin, Far Eastern Russia: tectonic implications for the eastern margin of the Mongolia Block. *Geophysical Journal International*, 2003, **152**(1): 202~214
- [4] Uno K, Otofujii Y, Matsuda T, et al. Late Cretaceous

- paleomagnetic results from Northeast Asian continental margin: The Sikhote Alin mountain range, eastern Russia. *Geophysical Research Letters*, 1999, **26**(5): 553~556
- [5] Zhu R X, Shao J A, Pan Y X, et al. Paleomagnetic data from early Cretaceous volcanic rocks of west Liaoning: Evidence for intracontinental rotation. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(21): 1832~1837
- [6] Huang B C, Piper J D A, Zhang C X, et al. Paleomagnetism of Cretaceous rocks in the Jiaodong Peninsula, eastern China: Insight into block rotations and neotectonic deformation in eastern Asia. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2007, **112**(B3): doi:10.1029/2006JB004462
- [7] Uchimura H, Kono M, Tsunakawa H, et al. Paleomagnetism of late Mesozoic rocks from northeastern China: The role of the Tan-Lu fault in the north China block. *Tectonophysics*, 1996, **262**(1-4): 301~319
- [8] Park Y H, Doh S J, Ryu I C, et al. A synthesis of Cretaceous palaeomagnetic data from South Korea: tectonic implications in East Asia. *Geophysical Journal International*, 2005, **162**(3): 709~724
- [9] 黄宝春, 朱 鸿, 谭承泽. 吉林省东部地区古地磁结果的大地构造意义. 地球物理学报, 1994, **37**(增刊. II): 304~315
Huang B C, Zhu H, Tan C Z. Tectonic implications of paleomagnetic data from eastern area of Jilin province, China. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 1994, **37**(Supp. II): 304~315
- [10] 裴军令, 杨振宇, 赵 越等. 中国东北及邻区白垩纪古地磁分析与块体旋转运动动力学背景. 地质学报, 2009, **83**(5): 617~627
Pei J L, Yang Z Y, Zhao Y, et al. Cretaceous paleomagnetism of the Northeast China and adjacent regions and the geodynamic setting of block rotations. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2009, **83**(5): 617~627
- [11] Lin W, Chen Y, Faure M, et al. Tectonic implications of new Late Cretaceous paleomagnetic constraints from Eastern Liaoning Peninsula, NE China. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2003, **108**(B6): doi:10.1029/2002JB002169
- [12] Liu J, Davis G A, Lin Z, et al. The Liaonan metamorphic core complex, Southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of Eastern Liaoning, Korea and contiguous areas. *Tectonophysics*, 2005, **407**(1~2): 65~80
- [13] 张世红, 杨惠心. 佳木斯地体晚侏罗世—白垩纪古地磁研究及其构造意义. 长春地质学院学报, 1996, **26**(2): 206~210
Zhang S H, Yang H X. Paleomagnetism of the Jiamusi terrane in the Late Jurassic epoch and Cretaceous period and its tectonic significance, NE China. *Journal of Changchun University of Earth Sciences* (in Chinese), 1996, **26**(2): 206~210
- [14] 叶惠文, 张兴洲, 周裕文. 牡丹江地区蓝片岩中脉状青铝闪石⁴⁰Ar—³⁹Ar 年龄及其地质意义. 长春地质学院学报,

- 1994, **24**(4): 369~372
- Ye H W, Zhang X Z, Zhou Y W. ^{40}Ar - ^{39}Ar age and its geologic significance of vein crossite in glaucophane—schist, Mudanjiang area. *Journal of Changchun University of Earth Sciences* (in Chinese), 1994, **24**(4): 369~372
- [15] 赵春荆,何国琦,段瑞焱. 俄远东、中国东北的构造特点及岩石圈深部的不均一性. *辽宁地质*, 1996, (4): 241~255
- Zhao C J, He G Q, Duan R Y. Features of tectonics and inhomogeneity of deep lithosphere in Far East Russian and Northeast China. *Liaoning Geology* (in Chinese), 1996, (4): 241~255
- [16] 邵济安,唐克东,詹立培等. 一个古大陆边缘的再造及其大地构造意义——延边地质研究新进展. *中国科学:B辑*, 1995, **25**(5): 548~555
- Sao J A, Tang K D, Zhan L P, et al. Rebuilding of an ancient continental margin and its tectonic significance—Progress in Yanbian geological study. *Science in China, Ser B* (in Chinese), 1995, **25**(5): 548~555
- [17] 杨惠心,李朋武,禹惠明. 中国东北主要地体古地磁学研究. *长春科技大学学报*, 1998, **28**(2): 203~205
- Yang H X, Li P W, Yu H M. Palaeomagnetic study of the main terranes, Northeast area, China. *Journal of Changchun University of Sciences and Technology* (in Chinese), 1998, **28**(2): 203~205
- [18] Zhao X X, Coe R X, Zhou Y X, et al. New paleomagnetic results from northern China; collision and suturing with Siberia and Kazakhstan. *Tectonophysics*, 1990, **181**(1~4): 43~81
- [19] 马醒华,杨振宇. 中国三大板块的碰撞拼合与古欧亚大陆的重建. *地球物理学报*, 1993, **36**(4): 476~481
- Ma X H, Yang Z Y. The collision of China's three major tectonic plates and the reconstruction of ancient Eurasia. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1993, **36**(4): 476~481
- [20] 黑龙江省地质局第一区域地质测量队. 牡丹江市幅 1:20 万区域地质调查报告, 1976. 52~56
- Heilongjiang Provincial Geological Bureau F R G S T. The regional geological investigation report (1:200,000) of the Mudanjiang City, 1976. 52~56
- [21] 秦秀峰,徐义刚,张辉煌等. 大陆亚碱性火山岩的成因多样性:以敦化—密山和东宁火山岩带为例. *岩石学报*, 2008, **24**(11): 2501~2514
- Qing X F, Xu Y G, Zhang H H, et al. Petrogenetic diversity of continental subalkaline volcanic rocks: An example from the Dunhua-Mishan-Dongning volcanic belt. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2008, **24**(11): 2501~2514
- [22] 刘嘉麒. 中国东北地区新生代火山岩的年代学研究. *岩石学报*, 1987, **3**(4): 1~10
- Liu J Q. Study on geochronology of the Cenozoic volcanic rocks in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 1987, **3**(4): 1~10
- [23] 王慧芬,杨学昌,朱炳泉等. 中国东部新生代火山岩 K-Ar 年代学及其演化. *地球化学*, 1988, **17**(1): 1~12
- Wang H F, Yang X C, Zhu B Q, et al. K-Ar geochronology and evolution of Cenozoic volcanic rocks in Eastern China. *Geochimica* (in Chinese), 1988, **17**(1): 1~12
- [24] 黑龙江省地质局第一区域地质测量队. 穆棱镇公社幅 1:20 万区域地质调查报告, 1979. 64~66
- Heilongjiang Provincial Geological Bureau F R G S T. The regional geological investigation report (1:200000) of the Muling Town, 1979. 64~66
- [25] Sha J G. Cretaceous stratigraphy of northeast China: non-marine and marine correlation. *Cretaceous Research*, 2007, **28**(2): 146~170
- [26] Sha J G, Cai H W, He C Q, et al. Studies on the Early Cretaceous Longzhaogou and Jixi Groups of eastern Heilongjiang, northeast China, and their bearing on the age of supposedly Jurassic strata in eastern Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, **20**(2): 141~150
- [27] 贾军涛,王璞珺,张 斌等. 哈尔滨东宾县凹陷白垩纪地层层序及其与松辽盆地的对比. *地质通报*, 2006, **25**(9-10): 1143~1151
- Jia J T, Wang P J, Zhang B, et al. Cretaceous stratigraphic sequence of the Binxian subbasin east of Harbin, Heilongjiang, China and its correlation with that in the Songliao basin. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2006, **25**(9-10): 1143~1151
- [28] Dankers P. Relationship between median destructive field and remanent coercive forces for dispersed natural Magnetite, Titanomagnetite and Hematite. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1981, **64**(2): 447~461
- [29] Kirschvink J L. The least-squares line and plane and the analysis of paleomagnetic data. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1980, **62**(3): 699~718
- [30] Halls H C. Use of converging remagnetization circles in paleomagnetism. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1978, **16**(1): 1~11
- [31] Fisher R A. Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, 1953, **217**: 295~305
- [32] McFadden P L, McElhinny M W. The combined analysis of remagnetisation circles and direct observations in paleomagnetism. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, **87**: 161~172
- [33] McElhinny M W. Statistical significance of the fold test in paleomagnetism. *Geophys J R Astron Soc*, 1964, **8**: 338~340
- [34] McFadden P L. A new fold test for paleomagnetic studies. *Geophysical Journal International*, 1990, **103**(1): 163~169
- [35] McFadden P L, McElhinny M W. Classification of the reversal test in paleomagnetism. *Geophysical Journal International*, 1990, **103**(3): 725~729
- [36] 葛肖虹,马文璞. 东北亚南区中—新生代大地构造轮廓. *中国地质*, 2007, **34**(2): 212~228
- Ge X H, Ma W P. Mesozoic-Cenozoic tectonic framework of southern Northeast Asia. *Geology in China* (in Chinese),

- 2007, **34**(2):212~228
- [37] 万天丰,朱 鸿. 中国白垩纪-始新世早期构造应力场. 地质学报, 1989, **63**(1):14~25
Wan T F, Zhu H. The tectonic stress field of the Cretaceous-Eocene in China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 1989, **63**(1):14~25
- [38] 万天丰. 中国大地构造学纲要. 北京:地质出版社, 2004. 218~221
Wan T F. Outline of Chinese Geotectonics (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2004. 218~221
- [39] 车自成,刘 良,罗金海. 中国及其邻区区域大地构造学. 北京:科学出版社, 2002. 477~481
Che Z C, Liu L, Luo J H. Geotectonics in China and its adjacent areas (in Chinese). Beijing: Science Press, 2002. 477~481
- [40] 张庆龙,王良书,解国爱等. 郯庐断裂带北延及中生代构造体制转换问题的探讨. 高校地质学报, 2005, **11**(4): 577~584
Zhang Q L, Wang L S, Jie G A, et al. Discussion on northward extension of the Tanlu fault zone and its tectonic regime transformation. *Geological Journal of China Universities* (in Chinese), 2005, **11**(4):577~584
- [41] 孙晓猛,龙胜祥,张梅生等. 佳木斯-伊通断裂带大型逆冲构造带的发现及形成时代. 石油与天然气地质, 2006, **27**(5):637~643
Sun X M, Long S X, Zhang M S, et al. Discovery and timing of major thrust belt in Jiamusi-Yitong fault zone. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 2006, **27**(5):637~643
- [42] 葛荣峰,张庆龙,王良书等. 松辽盆地构造演化与中国东部构造体制转换. 地质评论, 2010, **56**(2):180~195
Ge R F, Zhang Q L, Wang L S, et al. The Late Mesozoic tectonic activation in the Eastern Chinese Continent and its evolution process. *Geological Review* (in Chinese), 2010, **56**(2):180~195
- [43] Besse J, Courtillot V. Apparent and true polar wander and the geometry of the geomagnetic field over the last 200 Myr. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2002, **107**(B11): 10.1029/2000JB000050
- [44] Metelkin D V, Vernikovskiy V A, Kazansky A Y, et al. Late Mesozoic tectonics of Central Asia based on paleomagnetic evidence. *Gondwana Research*, 2010, **12**(8):doi:10.1016/j.gr
- [45] Hankard F, Cogne J P, Kravchinsky V A, et al. New Tertiary paleomagnetic poles from Mongolia and Siberia at 40, 30, 20, and 13 Ma: Clues on the inclination shallowing problem in central Asia. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2007, **112**(B2): doi:10.1029/2006JB004488
- [46] 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
Huang B C, Zhou Y X, Zhu R X. Discussions on Phanerozoic evolution and formation of continental China, based on paleomagnetic studies. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2008, **15**(3): 348~359
- [47] Kojima S. Mesozoic terrane accretion in Northeast China, Sikhote-Alin and Japan regions. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1989, **69**(3-4):213~232
- [48] 邵济安,张履桥. 华北东部中生代构造格局转换过程中的深部作用与浅部响应. 地质论评, 2000, **46**(1):32~40
Shao J A, Zhang L Q. Deep geological process and its shallow response during Mesozoic transfer of tectonic frameworks in eastern north China. *Geological Review* (in Chinese), 2000, **46**(1):32~40
- [49] 翟明国,孟庆任,刘建明等. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨. 地学前缘, 2004, **11**(3):285~297
Zhai M G, Meng Q R, Liu J M, et al. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in Eastern North China and implication for geodynamics. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2004, **11**(3): 285~297
- [50] 路凤香,郑建平,邵济安等. 华北东部中生代晚期-新生代软流圈上涌与岩石圈减薄. 地学前缘, 2006, **13**(2):86~92
Lu F X, Zheng J P, Shao J A, et al. Asthenospheric upwelling and lithospheric thinning in late Cretaceous-Cenozoic in eastern North China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2006, **13**(2): 86~92
- [51] 赵 越,徐 刚,张拴宏等. 燕山运动与东亚构造体制的转变. 地学前缘, 2004, **11**(3): 319~326
Zhao Y, Xu G, Zhang S H, et al. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2004, **11**(3): 319~326
- [52] Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, et al. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 2003, **67**(3-4):191~204
- [53] Wu F Y, Han R H, Yang J H, et al. Initial constraints on the timing of granitic magmatism in North Korea using U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 2007, **238**(3-4): 232~248
- [54] Wu F Y, Sun D Y, Li H, et al. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 2002, **187**(1-2):143~173
- [55] 吴福元,孙德有,林 强. 东北地区显生宙花岗岩的成因与地壳增生. 岩石学报, 1999, **15**(2):181~191
Wu F Y, Sun D Y, Lin Q. Petrogenesis of the Phanerozoic granites and crustal growth in Northeast China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 1999, **15**(2):181~191
- [56] 黄宝春,朱日祥,孙丽莎. 华北地块晚中生代大规模陆内旋转与克拉通破坏. 见:金翔龙,秦蕴珊,朱日祥等编. 中国地质地球物理研究进展. 北京:海洋出版社, 2008. 44~53
Huang B C, Zhu R X, Sun L S. Late Mesozoic large-scale intra-continental rotation and cratonic destruction of the North China Block. In: Jin X L, Qin W S, Zhu R X, et al. eds. Progress in Geology and Geodynamics in China (in Chinese). Beijing: Ocean Publishing House, 2008. 44~53