

辽西白垩纪火山岩古地磁测定与陆内旋转运动

朱日祥^① 邵济安^② 潘永信^① 史瑞萍^① 施光海^① 李大明^③

(^①中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101; ^②北京大学地质系, 北京 100871; ^③中国地震局地质研究所, 北京 100029.

E-mail: rxzhu@mail.c-geas.ac.cn)

摘要 对辽宁义县和阜新地区 55 个白垩纪火山熔岩流进行的岩石磁学研究表明, 主要载磁矿物为假单畴钛磁铁矿. K-Ar 测年确定出火山岩喷发的时代为 133~93 Ma. 对所有样品进行的系统热退磁揭示出, 当加热温度达到 250℃ 时, 可分离出稳定的单一特征剩磁分量, 由 27 个(28 个)记录地球磁场正(负)极性熔岩流得出的平均方向: $D = 5.9^\circ$, $I = 58.8^\circ$, $\alpha_{95} = 2.9^\circ$ ($D = 179.2^\circ$, $I = -59.5^\circ$, $\alpha_{95} = 5.2^\circ$), 表明白垩纪以来义县和阜新地区相对于欧亚大陆没有发生明显的平移和旋转运动. 但朝鲜半岛相对于欧亚大陆在白垩纪发生了 33.9° 的顺时针旋转. 结合全球热点具有不同源区(核幔边界或上地幔)的特征, 我们认为朝鲜半岛在白垩纪相对欧亚大陆的顺时针旋转主要是由于中国东部地壳在白垩纪曾发生拉张所致, 与地壳拉张对应的地表过程是强烈的火山活动.

关键词 白垩纪 古地磁 地球动力学

中国东部经历了从古生代至早中生代近东西向构造格局到晚中生代北北东向构造格局的转化以及由挤压向伸展构造体制转折; 从地球深部动力学角度来说, 中国东部既发生了大陆深俯冲, 又发生了大陆岩石圈减薄过程^[1]. 同时, 中国华北东部大多数金属矿床和油气资源都与中生代以来的陆内构造演化过程密切相关. 因此, 认识中国东部独特的大陆构造背景, 对深化大陆动力学研究是至关重要的. 本文试图利用古地磁学研究手段来认识中国东部中生代构造体制转折过程中陆内地块的运动学特征.

1 区域地质与样品采集

中生代中晚期, 受西太平洋动力学体系和地球深部过程的复合控制, 我国东部地区经历了频繁而剧烈的火山活动, 成为环太平洋火山岩带的重要组成部分. 辽宁西部义县和阜新地区广泛发育白垩纪火山岩, 岩石组合为玄武岩、安山岩、粗面岩和流纹岩等. 这一特殊时期的义县组古湖相沉积中保存着著名的热河生物群, 包括多种早期鸟类化石和一些古老的花和哺乳类化石^[2,3]. 这些古生物化石的发现不仅引起了中外古生物学者的极大兴趣, 同时, 热河动物群生物的剧生剧灭记录也为人们研究该时期地球深部动力学过程和古环境变化提供了良好对象^[4~7]. 为探讨中国东部白垩纪地球深部动力学过程, 我们利用便携式古地磁钻机, 在辽宁义县砖城子和四合

屯剖面以及阜新呼拉哈达和务欢池剖面出露的 55 个火山熔岩流中采集定向岩芯 410 个. 在实验室内将每个岩芯切割成 3~5 个厚度为 1 cm 的样品用于岩石磁学和古地磁研究. 从地层关系上来说, 四合屯玄武岩剖面由覆盖于富含化石古湖沉积之上的熔岩流(编号为 sht1-2)和侵位于古湖沉积中的熔岩流(编号为 sht3)以及下伏于古湖沉积的熔岩流(编号为 sht13-20)组成; 义县砖城子玄武质和安山质火山岩剖面为义县组主要火山岩层段(编号 zcz1-20); 阜新呼拉哈达和务欢池火山岩剖面分别属于土呼噜组和大凌河组.

2 K-Ar 年龄测定

将新鲜的火山岩样品破碎并过筛取粒级为 0.20~0.28 mm 的部分, 再取其基质部分作为 K-Ar 年龄的测试对象. 一些矿物斑晶如橄榄石和长石, 因可能含有过剩 Ar 而被选除. 经过以上处理的样品再用水、乙醇及丙酮多次清洗后低温加热烘干.

在中国地震局地质研究所的 MM1200 质谱仪上通过同位素稀释法测 Ar, 利用纯度为 99.98% 的 ³⁸Ar 作为稀释剂. MM1200 质谱仪与全金属萃取系统及纯化系统连接, 双真空萃取系统采用电子轰击炉方式加热, 包括圣诞树的内真空系统与纯化系统和质谱仪相连通, 外真空系统用于电子轰击加热. K 含量用 HG-3 火焰光度计测量.

样品装入圣诞树形的样品管中, 在 200℃ 温度条

件下加热去气 12 h 以上, 然后分别送入装有钼坩锅
内衬的钼坩锅中. 样品在外真空系统的电子轰击下
加热到 1320℃, 利用补偿法精确控制温度, 误差为
± 5℃. 释放出的气体先通过冷阱除去水与 CO₂, 后
通过钛海绵体去掉其他活性气体, 最后通过 Zr-Al 吸
气剂做第 3 级纯化, 提纯的惰性气体被导入到质谱仪
测量 Ar 同位素. 辽宁义县和阜新等地 4 个火山岩剖

面的 K-Ar 年龄测定结果如表 1.
由表 1 可见, 辽西地区的白垩纪火山活动时间为
133~93 Ma. 保存大量早期鸟类和哺乳动物化石的古
湖, 在四合屯地区存在的时间间隔大约在 126~124 Ma
之间, 也就是说这些早期鸟类和哺乳动物在该地区具
有剧生剧灭的演化特征, 这可能与早白垩世该地区岩
浆大量喷发, 导致区域气候突变有关.

表 1 K-Ar 年龄测定结果

样品编号	K/%	样品质量 /mg	放射成因 ⁴⁰ Ar/%	放射成因 ⁴⁰ Ar/mol · g ⁻¹ (× 10 ⁻¹⁰)	³⁸ Ar/ mol(× 10 ⁻¹³)	⁴⁰ Ar/ ³⁸ Ar	³⁸ Ar/ ³⁶ Ar	表面年龄 /Ma
义县组四合屯剖面								
sht-1	2.17	43.40	96.75	4.837	1.906	113.84	74.34	124.16 ± 2.4
sht-3	2.185	51.20	96.44	4.881	1.908	135.83	56.03	124.42 ± 2.4
sht-11	2.10	38.75	98.42	4.710	1.904	97.41	180.00	124.91 ± 2.4
sht-13	1.57	57.75	91.77	3.557	1.9025	117.70	28.40	126.14 ± 2.6
sht-14	1.56	34.15	95.20	3.626	1.901	68.46	86.06	129.29 ± 2.5
sht-15	1.51	40.30	93.74	3.507	1.890	79.77	56.35	129.17 ± 2.6
sht-16	1.46	54.05	97.10	3.502	1.896	102.86	92.65	133.28 ± 2.6
sht-18	1.50	39.15	96.81	3.607	1.8855	77.38	113.72	133.59 ± 2.6
义县组砖城子剖面 ^[7]								
zcz1	1.85	33.00	95.66	4.011	1.945	71.13	91.40	120.87 ± 2.3
zcz4	2.52	42.50	97.52	5.531	1.948	123.72	88.92	122.31 ± 2.3
zcz7	2.26	38.55	97.35	4.882	1.943	99.47	105.18	120.44 ± 2.3
zcz11	2.14	39.45	97.81	4.644	1.940	96.58	131.17	120.99 ± 2.3
zcz-13	2.25	41.70	98.10	4.859	1.937	106.66	135.90	120.42 ± 2.3
zcz17	2.36	38.75	95.24	5.100	1.934	107.32	54.07	120.51 ± 2.3
zcz20	2.35	31.20	98.55	5.100	1.928	83.74	230.52	120.98 ± 2.4
呼啦哈达和碱锅火山岩								
jg-1	1.72	29.75	89.52	2.854	1.8603	50.999	53.637	93.32 ± 1.96
jg-9	3.09	39.40	98.23	6.060	1.8584	130.76	117.12	109.7 ± 1.0
fh-8	2.04	34.25	93.01	4.352	1.8575	86.268	46.469	119.0 ± 2.4

3 岩石磁学与古地磁结果

3.1 岩石磁学

为系统了解火山岩中所含磁性矿物的种类和粒度
等特征, 每个熔岩流至少选择两块样品进行详细的
岩石磁学性质分析. 全部实验是在中国科学院地质
与地球物理研究所古地磁实验室完成的. 等温剩磁

(IRM)获得曲线表明, 样品在外场强度小于或接近
300 mT 时已基本达到饱和, SIRM 的剩磁矫顽力大约
在 15~40 mT 之间. 可变梯度磁力仪(MicroMag AGM
2900)磁滞回线测量表明, 样品中顺磁性矿物很少.
由饱和磁化强度(*M_s*)与饱和剩磁强度(*M_r*)以及矫顽力
(*H_c*)与剩磁矫顽力(*H_{cr}*)比值的关系可知, 样品中载磁
矿物以假单畴(PSD)颗粒为主(图 1).

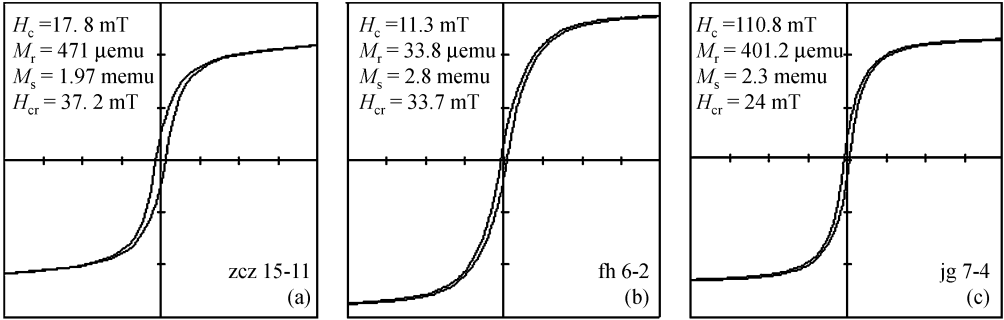


图 1 典型磁滞回线
样品 zcz15-11 (a)、fh6-2 (b) 和 jg7-4 (c) 分别采自砖城子、呼啦哈达和碱锅剖面

利用可变场磁天平(MMVFTB)测定剩磁(J)-温度(T)曲线结果表明, 火山岩样品中的磁性颗粒主要为含贫钛磁铁矿和富钛磁铁矿两种类型. 前者样品以义县组火山岩样品为代表, 居里温度为 $530\sim 580^{\circ}\text{C}$, 加热曲线和冷却曲线具有良好的可逆性. 后者主要出现在碱锅剖面上部, 居里温度多低于 300°C , 在加热过程中由于钛磁铁矿转变为钛铁矿和赤铁矿或磁赤铁矿, 导致了冷却曲线低于加热曲线(图 2).

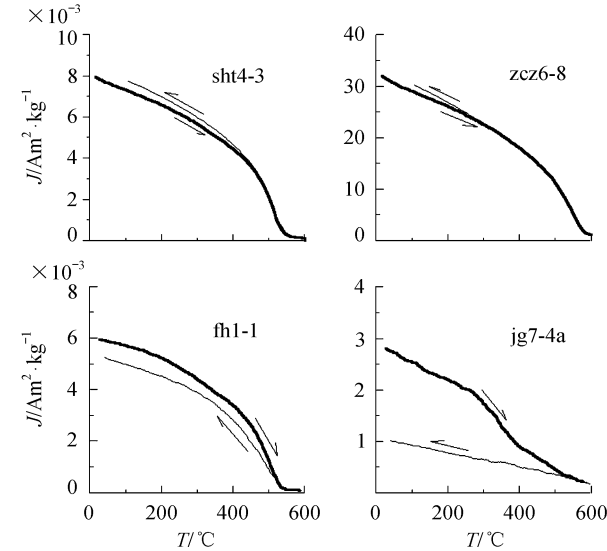


图 2 典型热磁曲线
粗线和细线分别表示加热和冷却曲线. 样品 sht4-3, zcz6-8, fh1-1 和 jg7-4a 分别采自四合屯、砖城子、呼啦哈达和碱锅剖面

3.2 古地磁结果

样品热退磁实验使用英国 Magnetic Measurements 公司生产的 MMTD60 型全自动热退磁仪, 剩磁测量是用美国 2G 公司生产的超导岩石磁力仪完成的, 全

部实验是在零磁空间中进行. 对所有样品进行的逐步热退磁(热退磁温度从室温至 585°C 共 13 步, 退磁间隔在 $25\sim 50^{\circ}\text{C}$ 之间)表明, 当退磁温度达到 250°C 时可分离出稳定的单一剩磁组分, 并在退磁投影图上趋于原点, 代表了火山岩喷发时的原生剩磁方向(图 3). 当加热温度高于 585°C 以后, 绝大多数样品的剩磁方向缺乏一致性.

根据主向量分析求得每一个标本的特征剩磁分量后, 以熔岩流为单位对特征剩磁分量进行 Fisher 统计平均, 然后再对各熔岩流的平均方向进行统计平均, 求得各剖面不同时代的平均剩磁方向(表 2). 表 2 对正负极性分别进行了统计平均, 其结果可通过倒转检验($f = 2.09 < F(2,14) = 4.74$).

4 讨论与结论

现有的古地磁资料表明, 中国华北、扬子以及朝鲜块体在晚侏罗世已完全拼合在一起^[8~11], 只是不同块体拼合之后还会发生陆内旋转运动. 如何确定块体之间相对旋转运动是古地磁学家近年来致力于开拓的研究领域. 为深化这一研究, 本文按照国际通用的古地磁数据可靠标准^[12,13], 对已发表的中国华北和朝鲜块体白垩纪以来的古地磁数据进行了整理(表 3). 由表 3 可见, 中国华北和朝鲜块体在白垩纪均已与现今纬度无明显差别. 由中国辽宁义县和阜新等地白垩纪火山岩(时代跨度为 $133\sim 93\text{ Ma}$, 见表 2)获得的古地磁结果表明, 该地区自早白垩纪以来, 相对于欧亚大陆既无明显的纬向运动, 也无显著构造旋转变运动(表 2, 3); 由中国内蒙古平庄凝灰岩得出的结果也有相同的特征. 朝鲜半岛相对于欧亚大陆自早第三纪以来同样是既无平移也无旋转运动^[10], 但在白

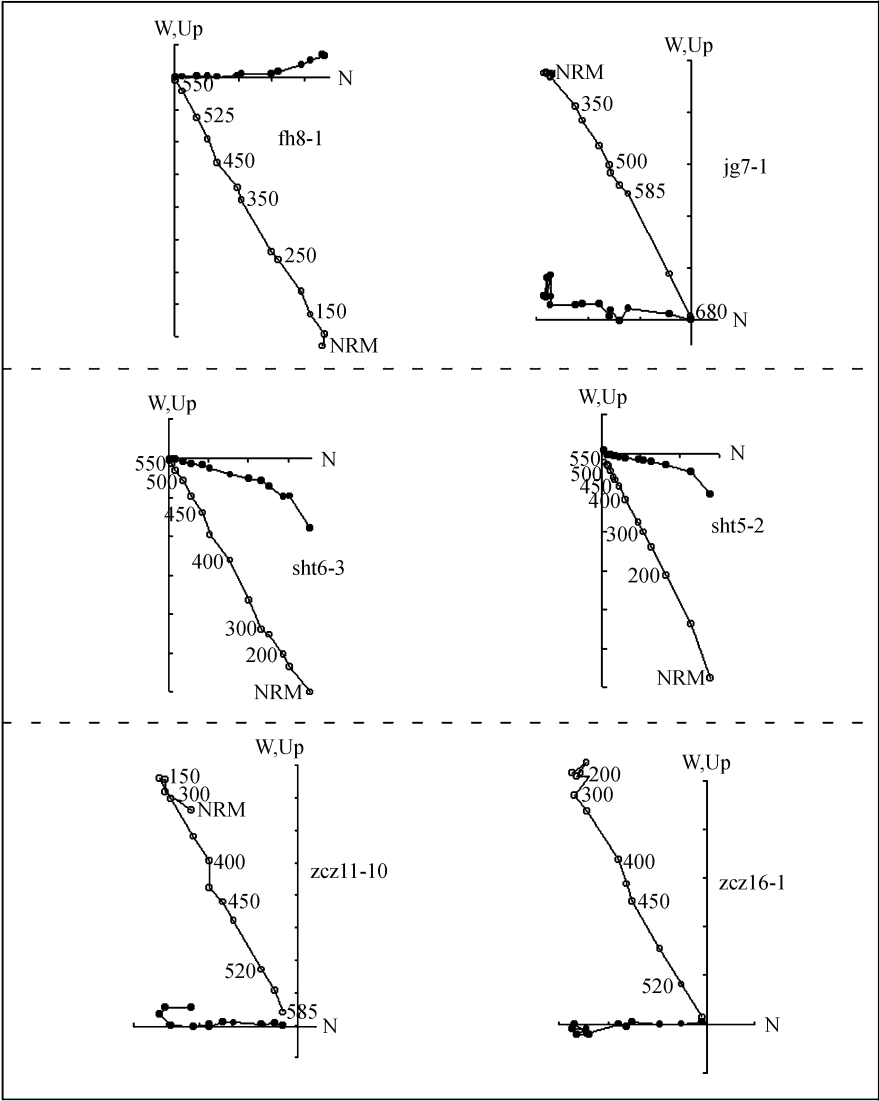


图 3 热退磁矢量图
实圈(空圈)分别代表在水平面(垂直面)的投影, W, Up 和 N 分别表示西、向上和北. 以 fh, jg, sht 和 zcz 编号的
样品分别采自呼啦哈达、碱锅、四合屯和砖城子剖面

圣纪朝鲜半岛(南北部具有相同的运动特征, 见表 3)相对于欧亚大陆则有 33.9° 的顺时针旋转^[10]. 那么促使朝鲜半岛在白垩纪发生顺时针旋转的地球内部动力是什么? 为探讨这一问题, 我们来看一看与中国辽宁西部和朝鲜半岛相关联的地区, 在白垩纪深部发生了什么过程: 辽西地区构造-火山活动频繁, 特别是早白垩世在断陷盆地内形成大量玄武岩浆的裂隙式喷溢, 火山机构发育, 火山喷发中心直接控制了爆发相和流溢相的分布^[16]. 通过对该区义县组和土呼噜组火山岩 Th, Ta 和 Hf 等强不相容元素的分析,

利用 Ta/Hf 和 Th/Hf 比值的差异值来判别玄武岩形成的大地构造环境(表 4 和图 4), 可以看出, 辽西玄武岩是在逐渐伸展的大陆裂谷环境下形成的. 而且随着时间演变, 从初始裂谷拉张环境发展成为典型的裂谷玄武岩^[17]. 综合上述实验和观测结果, 我们认为早白垩世朝鲜半岛 33.9° 的顺时针旋转主要是由于中国东部大陆边缘地壳拉张所致, 与地壳拉张对应的地表过程是大量玄武岩浆的喷发. 中国辽西以及内蒙古平庄等地可能受欧亚大陆主体的制约, 地壳的拉张对这些地区没有产生显著的影响.

表 2 古地磁结果^{a)}

采样剖面	熔岩流数	<i>n</i> / <i>N</i>	<i>D</i> (°)	<i>I</i> (°)	PLA(°)	PLO(°)	α_{95} (°)	年龄/Ma(2 σ)
JG-U	5	31/35	6	59.6	85.1	232.4	3.9	93.22 ± 1.96
JG-L	5	29/33	186.4	-58.2	-84.1	64.9	4.9	109.7 ± 1.0
FL	7	42/46	7.9	59.5	83.8	222.5	3.6	119.0 ± 2.40
zcz	20	136/140	174.9	-60.1	-86.1	205.9	2.3	120.93 ± 0.88
sht1-3	3	22/25	175.9	-60	-86.8	199.1	6.4	124.29 ± 1.69
sht5-11	7	52/58	4.9	59.3	86	231.1	3.6	124.91 ± 2.38
sht12-13	2	11/11	14.3	56.1	77.9	230.1	8.2	126.14 ± 2.55
sht14-15	2	18/19	-4.5	59.5	86.4	11.6	13.5	129.23 ± 1.79
sht16-19	4	30/33	6.2	58.2	84.5	238.5	5.5	133.43 ± 1.81
N-P	6-site		5.9	58.8	85.1	233.4	2.9	
R-P	3-site		179.2	-59.5	-88.6	146.3	5.2	
N&R	2-P		2.6	59.2	87.5	249.2		

a) *n*/*N*: 用于统计/实际测量样品数, *D*/*I*: 磁偏角/磁倾角, PLA/PLO:古地磁极纬度/经度, α_{95} : 精度参数/95%置信角, JG-U/JG-L: 碱锅剖面上部/下部, FL: 呼啦哈达剖面, zcz: 砖城子剖面, sht: 四合屯剖面, N-P/R-P: 正极性/负极性

表 3 中国华北地区和朝鲜半岛白垩纪古地磁结果

采样地点	采样位置	<i>D</i> (°)	<i>I</i> (°)	PLA/(°)	PLO/(°)	α_{95} /(°)	时代
中国辽西	41.6°N, 120.7°E	2.6	59.2	87.5	249.2		133.43~93.22 Ma
中国内蒙古平庄	42°N, 119.2°E	6.8	56.6	82.9	249.5	5.7	K ₁ ^[14]
朝鲜半岛北部	37°N, 128°E	37.5	61.3	60.9	195.5	8.2	K ^[15]
朝鲜半岛南部	35.9°N, 128.6°E	36.5	59.4	61.2	199.5	6.6	Aptian ^[10]

表 4 玄武岩的 Th/Hf 和 Ta/Hf 比值

标本号	Jg1	Jg2	Fh	Sht
时代	K ₁₋₂ 上部	K ₁₋₂ 下部	K ₁	K ₁
岩性	玄武岩	玄武安山岩	玄武岩	玄武岩
Th/Hf	1.06	0.77	1.01	1.15
Ta/Hf	0.73	0.19	0.19	0.13

尽管大多数火山活动发生在板块边界(诸如洋中脊和俯冲带),但在板块内部也形成一定规模的玄武质火山喷发. 譬如, Morgan^[18]提出热点是由于下地幔物质上涌到地表形成的, 热点在地表一般分布于拉张板块边界和长波大地水准面高的地区. 最近, Zhao^[19]利用地震层析成像研究方法,发现夏威夷、冰岛、南太平洋和东非等热点所对应的地幔柱起源于核幔边界(CMB). 还有一些热点起源于 410 或 660 km 不连续面(甚至是上地幔内部)的小尺度地幔柱. 东太平洋边缘地震波低速带对应的热点就是由起源于上地幔或 410/660 km 间断面小型地幔柱产生的^[19], 辽西地区所在的西太平洋边缘也是地震波低速带. 另外, 计算机模拟和实验研究表明, 尽管克拉通一般对应于巨厚的岩石圈,但在其边缘和大陆裂谷地区,由于温度和物性的变化会导致局部对流的产生^[20]. 从动力学角度来说,正是这种局部对流产生了大陆玄武岩喷发^[21~23]. 根据上述地震学和模拟实验研究结果,我们推测辽宁义县等地的玄武岩可能与源于上

地幔的小型地幔柱相联系,产生这类小型地幔柱的原因则是 410/660 km 间断面局部热物质上涌.

本文提供的基础事实是: (1) 早白垩世以来, 中国辽西义县和阜新地区相对于欧亚大陆没有发生明显的平移和旋转运动. 但朝鲜半岛相对于欧亚大陆在早白垩世发生了 33.9°的顺时针旋转. (2) 对中国辽西义县和阜新玄武岩进行的元素地球化学研究表明, 这些玄武岩是在逐渐伸展的大陆裂谷环境下形成的.

在肯定上述事实的同时, 一个尖锐问题摆在人们面前: 如何从运动学角度解释朝鲜半岛的 33.9°的顺时针旋转? 它与引起中国辽西,乃至中国东部早白垩世大陆伸展的深部作用, 例如起源于上地幔或 410/660 km 间断面小型地幔柱的对流有关? 还是与东亚大陆边缘中生代存在的剪切走滑有关? 地质研究多数结论认为中生代陆缘存在的是左旋剪切运动, 那么是什么力量促使朝鲜半岛的 33.9°的顺时针旋转? 要解决这些问题, 需要不同学科的学者共同探索.

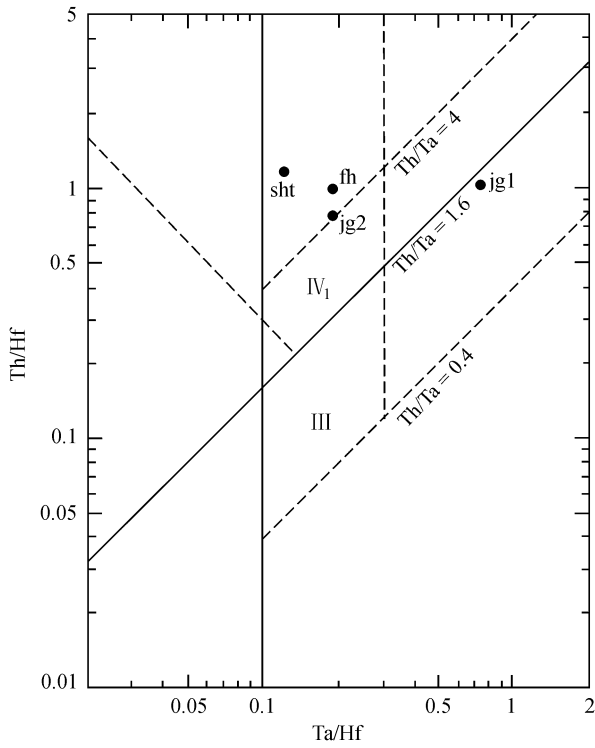


图 4 玄武岩大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 判别图
图中投影点代号 sht, fh 和 jg 分别表示采自四合屯、呼啦哈达和碱锅的样品

致谢 本工作受中国科学院知识创新工程项目(KZCX-2-114)资助。

参 考 文 献

1 Wang Q C, Cong B L, Zhu R X. Geodynamics of UHP-rock-bearing continental collision zone in central China. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Geodynamics, 1998, 27: 259~267

2 Hou L H, Zhou Z, Martin L, et al. A beaked bird from the Jurassic of China. *Nature*, 1995, 377: 616~618

3 Hu Y M, Wang Y Q, Luo Z X, et al. A new symmetrodont mammal from China and its implication for mammal evolution. *Nature*, 1997, 390: 137~142

4 王松山, 王元青, 胡华光, 等. 辽西四合屯脊椎动物生存时代锆石 U-Pb 年龄证据. *科学通报*, 2001, 46(4): 330~333

5 潘永信, 朱日祥, Shaw J, 等. 辽西四合屯含化石层古地磁极性年龄的初步确定. *科学通报*, 2001, 46(8): 680~683

6 Swisher III C C, 汪筱林, 周忠和, 等. 义县组同位素年代新证据及土城子组 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄测定. *科学通报*, 2001, 46(23): 2009~2012

7 Zhu R X, Pan Y X, Shaw J. Geomagnetic palaeointensity just prior to the Cretaceous Normal Superchron. *Phys Earth Planet Inter*, 2001, 128(1-4): 207~222

8 Gilder S, Courtillot V. Timing of the North-south China collision from new Middle to Late Mesozoic paleomagnetic data from the North China Block. *J Geophys Res*, 1997, 102: 17713~17723

9 朱日祥, 杨振宇, 吴汉宁, 等. 中国主要地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动. *中国科学, D 辑*, 1998, 28(增刊): 1~16

10 Zhao X, Coe R S, Chang K H, et al. Clockwise rotations recorded in early Cretaceous rocks of South Korea: Implications for tectonic affinity between Korean peninsula and North China. *Geophys J Int*, 1999, 139: 447~463

11 Zhu R X, Tschu K K. Studies on paleomagnetism and reversals of geomagnetic field in China. Beijing: Science Press, 2001. 168

12 Van der Voo R. Phanerozoic paleomagnetic poles from Europe and North America and comparisons with continental reconstructions. *Rev Geophys*, 1990, 15: 167~206

13 Beck M E. On the mechanism of crustal block rotations in the central Andes. *Tectonophysics*, 1998, 299: 75~92

14 Zhao X X, Coe R S, Zhou Y X, et al. New paleomagnetic results from North China: Collision and suturing with Siberia and Kazakstan. *Tectonophysics*, 1990, 181: 43~81

15 Sasajima S. Pre-Neogene paleomagnetism of Japanese Island and vicinities. In: McElhinny M W, Valencio D A, eds. *Paleoreconstruction of the Continent*. Washington: AGU, 1981. 115~128

16 郭胜哲, 张立东, 张长捷, 等. 辽西西部义县组研究新进展. *中国地质*, 2001, 28(8): 1~8

17 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别. *岩石学报*, 2001, 17(3): 413~421

18 Morgan W J. Deep mantle convection plumes and plate motions. *Geol Soc Amer Mem*, 1972, 132: 7~22

19 Zhao D. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 192: 251~265

20 King S D, Ritsema J. African hot spot volcanism: small-scale convection in the upper mantle beneath Cratons. *Science*, 2001, 290: 1137~1140

21 Anderson D L. In the Core Mantle Boundary Region. In: Gurnis M, et al, eds. Washington: AGU, 1998. 255~271

22 Holbrook W S, Kelemen P B. Large igneous province on the US Atlantic margin and implications for magmatism during continental breakup. *Nature*, 1993, 364(6436): 433~436

23 Larson R L. Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology*, 1991, 19: 547~550

(2002-04-02 收稿, 2002-06-17 收修改稿)