

# 汉诺坝玄武岩中麻粒岩和辉石岩捕虏体 $Sr-Nd-Pb$ 同位素五维空间特征 及其地质意义

张国辉<sup>①</sup> 周新华<sup>①</sup> 陈绍海<sup>①</sup> 孙敏<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>中国科学院地质研究所, 北京 100029; <sup>②</sup>香港大学地球科学系, 香港)

**摘要** 研究了汉诺坝玄武岩中麻粒岩和辉石岩捕虏体在  $Sr-Nd-Pb$  同位素五维空间中的特征, 结合捕虏体的空间分布相对位置, 认为层离作用可较好地解释不同类型捕虏体同位素之间的相互关系。

**关键词** 层离作用 捕虏体 多维空间特征  $Sr-Nd-Pb$  同位素

同位素多维空间拓扑结构分析方法首先由 Allegre<sup>[1]</sup> 提出。这种分析方法是将一组同位素数据置于一个多维空间中, 通过对数据的几何结构、分布特征和相对位置的分析判别, 找出它们的内在联系和相互制约关系。具体地说, 就是在由地球化学数据所组成的一个多维向量组中, 找出一些能反映更多信息的新向量, 使地球化学数据在这些新向量上的投影尽可能地分开, 从而更特征化地展示它们之间的关系。这种方法对于探讨受多因素控制的复杂地球化学体系的成因具有重要意义, 能揭示出比二维图解更丰富的信息。找出的这些新向量表示了一组地球化学数据多维空间特征, 代表的是多维同位素的综合信息, 与实际地球化学指标(如  $Sr-Nd-Pb$  同位素比值)具有不同的意义。因此, 这些向量与实际地球化学轴一般不重合。

位于华北克拉通北缘的汉诺坝玄武岩含大量的深源捕虏体。它们被认为是下地壳和上地幔物质的代表。对该地多类型捕虏体的  $Sr-Nd-Pb$  同位素进行系统分析测试, 并利用同位素多维空间拓扑结构分析方法对已取得的数据进行综合分析, 可较好地研究不同捕虏体在多维空间中的相互关系, 并讨论其原因。

## 1 捕虏体种类及其空间产出位置

汉诺坝玄武岩中麻粒岩和辉石岩捕虏体依据其矿物组合, 前者可分为长英质麻粒岩和二辉麻粒岩; 后者包括二辉石岩、尖晶石辉石岩和石榴石辉石岩。受矿物组合限制, 所研究的样品仅得到少量压力估算值。但根据该区大量(比本文样品数大得多的本区捕虏体数据)<sup>[2] 1)</sup> 温压估算结果所得的地温线推测, 汉诺坝地区的下地壳主要由二辉麻粒岩组成, 长英质麻粒岩也可能是下地壳的组成岩石。岩石学壳幔边界约位于 32~42 km 处, 与地震界面吻合, 构成一个岩石学意义上的壳幔过渡层。在该界面以下, 二辉麻粒岩类岩石消失, 尖晶石二辉橄榄岩成为占主要地位的岩石, 尖晶石辉石岩主要集中于 42~45 km 这一层位内, 与尖晶石二辉橄榄岩共同构成了 42~55 km 处的上地幔。石榴石辉石岩则主要集中于 55~65 km 这一层位。二辉石岩的分布范围较宽, 既可位于下地壳, 也可位于上地幔。

1) 陈绍海. 华北克拉通北缘下地壳-上地幔的组成与结构及壳幔相互作用——汉诺坝玄武岩中深源岩石捕虏体成因岩石学研究. 中国科学院地质研究所博士学位论文, 1996

## 2 分析结果及多维空间特征计算

根据同位素反演地质作用过程需要考虑时间因素,以初始值探讨其成因. 据研究<sup>1)</sup>,长英质麻粒岩的成因复杂,其形成时代难以确切制约,但比二辉麻粒岩和辉石岩捕虏体形成时代早. 二辉麻粒岩和辉石岩的形成时代较新(100~140 Ma),并经历了混合作用. 它们的<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr比值很低,现今<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr观测值与其形成时的初始值应较接近. Nd同位素因时间较短,其现代值与初始值变化亦较小. 因此,以这两类捕虏体的现今观测值近似代替其初始值,这也是目前国际学术界的习惯近似处理方法. 在计算中,只考虑这两类捕虏体的比值. 另外,在求得包括这两类捕虏体信息的惯量矩阵的特征向量后,可将长英质麻粒岩及汉诺坝玄武岩附近的地球同位素比值投影到这些特征向量上. 在这种情况下,它们的投影是有意义的,因为长英质麻粒岩在下地壳的滞留时间很长,有可能成为二辉麻粒岩的混合端元;目前地表所见麻

表1 同位素分析结果<sup>a)</sup>

岩性	样号	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb
	90DA1	0.708 628	0.511 910	16.717	15.260	37.104
	90DA2	0.707 397	0.511 699	16.967	15.334	37.265
	90DA5	0.707 114	0.511 892	16.853	15.285	36.900
	95DA6	0.707 066	0.511 796	17.164	15.423	37.434
	90DA10	0.707 015	0.511 874	17.285	15.400	37.305
	91DA3	0.707 300	0.511 969	16.869	15.234	36.848
二辉麻粒岩	95DA14P	0.706 814	0.512 046	17.421	15.418	37.860
	95DA14G	0.707 049	0.511 798	17.700	15.501	38.003
	95DA15	0.707 407	0.511 777	17.859	15.653	38.336
	95DA16	0.707 148	0.511 899	17.665	15.475	37.761
	95DA17	0.707 951	0.512 153	17.380	15.374	37.610
	95DA30	0.706 445	0.511 950	17.555	15.400	37.500
	95DA40	0.705 913	0.511 866	16.500	15.244	36.484
	95SQ1	0.707 485	0.511 756	16.740	15.298	36.893
	95DA4	0.707 233	0.511 857	17.716	15.477	37.892
二辉石岩	95DA36	0.709 258	0.511 504	17.754	15.410	37.540
	95JSB2	0.707 580	0.511 909	18.237	15.578	38.274
尖晶石	95DA28	0.706 057	0.512 379	17.845	15.559	38.697
辉石岩	95JSB1	0.704 329	0.513 155	17.989	15.625	38.162
	90DA7	0.706 773	0.512 076	17.295	15.270	36.759
	90DA8	0.707 732	0.512 358	16.626	15.269	36.992
石榴石	90DA11	0.707 214	0.513 149	17.442	15.452	37.474
辉石岩	90DA12	0.707 086	0.512 501	17.889	15.509	38.099
	91DA7	0.706 589	0.512 030	17.349	15.395	37.334
	95SQ9	0.707 536	0.513 187	17.934	15.552	38.000

a) Sr同位素采用<sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr=0.1194进行标准化, NBS607测定结果为<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=1.200 000±30(2σ); Nd同位素采用<sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.7219进行标准化, BCR-1测定结果为<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.512 640±10(2σ); Pb同位素测定: NBS981多次测定平均值为<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=16.966, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=15.514, <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=36.730, 误差小于0.1%. 实验全流程本底Sr为n×10<sup>-9</sup>g, Nd为n×10<sup>-10</sup>g

1) 张国辉. 河北汉诺坝玄武岩中麻粒岩和辉石岩类捕虏体地球化学研究——兼论壳幔相互作用. 中国科学院地质研究所博士学位论文, 1997

粒岩相地体是由中下地壳经构造作用抬升上来的,一部分与麻粒岩相地体同成因、同组成的地质体有可能仍然滞留于下地壳,因此也就可能成为后期形成的二辉麻粒岩的围岩。

本文计算多维空间特征向量时考虑样品共25个(表1),其中二辉麻粒岩14个,辉石岩11个。每个样品考虑Sr, Nd, Pb同位素共5个比值,分别为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 。具体计算过程见张国辉<sup>1)</sup>。在多维空间中,欧氏距离是有意义的,即所有变量在各个坐标轴上是等价的,而且在解释上有相同的权重。然而,不同同位素比值的变化范围及绝对值存在很大差别,如 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值在各样品之间的差异一般不超过0.002,而Pb同位素比值差异则远大于此。因此,原始数据标准化是必要的,这样就使各个同位素比值反映的信息权重大致在同一数量级别上。目前该法尚无统一的标准化方案,且对于不同的研究对象采用统一的标准也是不适合的。根据样品的实际情况,取其对BSE(Bulk silicate earth)值的偏差。BSE的Sr, Nd, Pb同位素比值分别取: $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7045$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512638$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.8$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.6$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.0$ 。标准化方法为 $\text{Nd}=10000 \times [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样}} - 0.512638]$ ,  $\text{Sr}=1000 \times [(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{样}} - 0.7045]$ ,  $\text{Pb}=10 \times [(\text{Pb})_{\text{样}} - \text{Pb}_{\text{BSE}}]$ 。计算结果投影于图1。同时投影的还有部分地幔端元及前人对汉诺坝玄武岩及其中捕虏体的研究结果。

### 3 多维空间投影图特征及其地质意义

在图1中,二辉麻粒岩有较明显的线性趋势,比 $\text{Sr-Nd}$ ,  $\text{Pb-Sr}$ 及 $\text{Pb-Nd}$ 二元同位素图解<sup>1)</sup>提供了更详细的样品之间关系信息。这种线性趋势的一端为EM II端元,另一端为DM与汉诺坝附近地体之间的某点(即图例11所示)。另外,一部分二辉麻粒岩样品具向DM延伸的趋势。二辉麻粒岩的这种分布趋势表明EM II端元可能是其一个端元,另一个端元可能是DM和类地体组分的混合产物,类似于PREMA的形成(有人认为PREMA可能是DM与BSE的混合<sup>7)</sup>)。根据二辉麻粒岩的这种分布趋势还可推测在二辉麻粒岩形成前其源区可能已发生过DM端元与类似地体成分的物质混合,并形成了一广泛的混合源区。该源区对二辉麻粒岩的形成起重要控制作用,即二辉麻粒岩的形成可能具多阶段演化历史。在 $1/\text{Sr}-^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图中也存在类似现象<sup>1)</sup>。

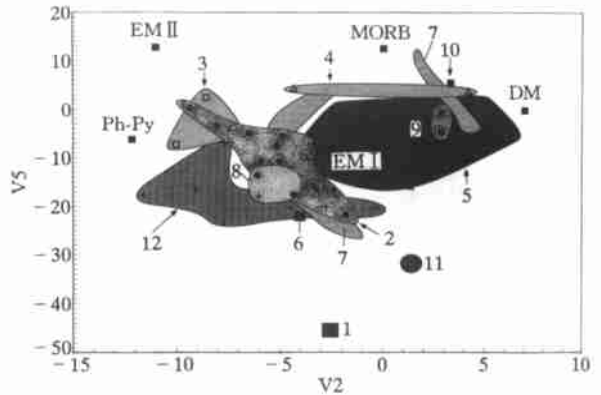


图1 V2-V5图

- 1——汉诺坝玄武岩附近地体(本文), 2——二辉麻粒岩(本文),
- 3——二辉石岩(本文), 4——尖晶石辉石岩(本文), 5——石榴石辉石岩(本文), 6——麻粒岩捕虏体<sup>[3]</sup>, 7——辉石岩捕虏体<sup>[3]</sup>,
- 8——辉长岩捕虏体<sup>[4]</sup>, 9——玄武岩<sup>[5]</sup>, 10——二辉橄榄岩<sup>[6]</sup>,
- 11——可能的中间混合端元组分, 12——长英质麻粒岩(作者),
- Ph-Py——金云母辉石岩<sup>[6]</sup>

1) 见前页脚注

图1中的另一个重要特点是辉石岩与二辉麻粒岩在五维空间中显示了密切的联系,即二辉麻粒岩是三类具不同矿物组成的辉石岩的共同端点.二辉石岩主要位于二辉麻粒岩的近EMII端.尖晶石辉石岩一端向二辉麻粒岩的EMII端元延伸,另一端向DM端元延伸.石榴石辉石岩的分布趋势是一端向二辉麻粒岩中部(二辉麻粒岩的中部具向右上方DM端元延伸的趋势)延伸,另一端指向DM端元.

综合图1中各类捕虏体及地体的多维空间特征及由它们的温度、压力所决定的空间分布相对位置(见前述该地岩石学剖面),可以认为二辉麻粒岩的层离作用(delamination,又译拆沉作用)可以较好地解释它们之间的相互关系.二辉麻粒岩层离到不同深度能影响处于不同深度的辉石岩的组成.二辉麻粒岩中的长英质麻粒岩夹层也可能共同发生层离作用,对辉石岩的组成产生影响.因此,受二辉麻粒岩层离作用影响的不同辉石岩组成都存在这一共同端点.二辉麻粒岩的空间位置较浅,受地体和EMII端元的影响较大.尖晶石辉石岩和石榴石辉石岩空间位置相对较深,DM端元的影响较明显.这些与Tatsumoto等人<sup>[6]</sup>认为的中国东部岩石圈化学端元垂向分布特点吻合.

Chen等人<sup>[4]</sup>的辉长岩捕虏体基本位于本文二辉麻粒岩的分布范围内,可能与二辉麻粒岩为同成因,与陈道公等人<sup>[3]</sup>的观点一致.陈道公等人<sup>[3]</sup>的辉石岩捕虏体来自较大的深度范围,矿物组合也存在差异.在图1中,它们可分为两类,一类的分布呈弧形,另一类则位于MORB与DM之间.弧形的下部与二辉麻粒岩的延伸趋势相近,而上部则自二辉麻粒岩中部向外延伸.它们可能揭示了一种多元混合作用过程.二辉麻粒岩仍是呈弧形分布的辉石岩的共同端,说明二辉麻粒岩对这些辉石岩成分的控制作用,与前面所述特点一致.这种弧形分布也可能表明其源区受到类似富含金云母的辉石岩地幔(即图1中之Ph-Py)的影响.而靠近DM与MORB的辉石岩表明其所受外界影响较小(样品为相对较深的橄榄二辉岩和单辉岩).

研究区处于华北克拉通北缘.不同块体之间的相对运动易使岩石圈物质产生倾斜或垂向上的运动.这可能为层离作用的一种机制.另外,新生代汉诺坝玄武岩的大量喷发反映了该区地幔热流在此前存在大规模扰动.热扰动可能是层离作用发生的另一种可能动力.樊祺诚等人<sup>[8]</sup>及Zhou等人<sup>[9]</sup>的汉诺坝玄武岩中麻粒岩捕虏体的锆石分析结果也揭示了本区的中生代构造运动.这也提供了本区壳幔或壳内物质长期循环的一个佐证.但目前对于层离作用的机制尚缺乏深入了解,可能与中国东部中生代以来岩石圈减薄机制属同一作用范畴,需要进行综合研究.

致谢 野外工作期间得到了刘若新研究员和冯家麟教授的指导和帮助,作者深表感谢.本工作为国家自然科学基金(批准号:49272097)资助项目.

## 参 考 文 献

- 1 Allegre C J. Topology in isotopic multispace and origin of mantle chemical heterogeneity. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 81: 319~ 339
- 2 Chen S, O' Reilly S, Zhou X, et al. Xenolith Information on the Lower Crust and Upper Mantle Structure Beneath Hannuoba, Sino-Korean Craton, China. 1997, Submitted to *Lithos*
- 3 陈道公,支霞臣,李彬贤,等. 汉诺坝玄武岩中辉石岩类包体 Sr, Nd, Pb 同位素及其成因信息. *地球化学*, 1997, 26 ( 1): 1~ 12

- 4 Chen D, Zhi X, Li B, et al. Chemical and isotopic characteristics of gabbroic xenoliths from Hannuoba, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1995, 14(3): 276~ 287
- 5 Song Y, Frey F A, Zhi X. Isotopic characteristics of Hannuoba basalts, eastern China: Implications for their petrogenesis and the composition of subcontinental mantle. *Chemical Geology*, 1990, 88: 35~ 52
- 6 Tatsumoto M, Basu A R, Huang W, et al. Sr, Nd and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of Eastern China: enriched compositions EM I and EM II in subcontinental lithosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 113: 107~ 128
- 7 Zindler A, Hart S. Chemical geodynamics. *Ann Rev Earth and Planet Science Letters*, 1986, 14: 493~ 571
- 8 樊祺诚, 刘若新, 李惠民, 等. 汉诺坝捕虏体麻粒岩锆石年代学与稀土元素地球化学. *科学通报*, 1998, 43(3): 133~ 137
- 9 Zhou X, Sun M, Wilde S A. "In Situ" comparative study of granulite xenoliths vs granulite terrains in Hannuoba region, north China: isotopic constraints. *Chinese Science Bulletin*, 1998(supp): 164

(1998\_01\_20 收稿, 1998-04-20 收修改稿)

# 长白山望天鹅双峰式火山岩 K-Ar 年龄意义

樊祺诚 刘若新 李大明 李 齐

(国家地震局地质研究所, 北京 100029)

**摘要** 根据火山岩的野外产状、岩石学和 K-Ar 年龄测定结果, 推测望天鹅火山经历了造盾和造锥两个发展阶段, 火山活动从早到晚可分为 3 期: 长白期(? ~ 2.87 Ma)、望天鹅期(2.69~ 2.41 Ma) 和 红头山期(2.12 Ma)。火山岩岩性变化从粗面玄武岩 → 玄武质粗安岩、粗面岩 → 碱性流纹岩, 具有与天池火山相似但又有别的双峰式火山岩组合之特点。

**关键词** 望天鹅火山 双峰式火山岩 K-Ar 年龄

## 1 望天鹅火山及火山岩

长白山天池火山是著名的中心式火山口, 但对长白山之南近在咫尺, 与天池火山相距仅 32 km 的一座巨大的望天鹅火山却鲜为人知, 它是长白山地区唯一可与天池火山媲美的中心式火山口, 位于破火山口东南缘的望天鹅主峰为海拔 2 051.4 m 的火山锥。望天鹅火山锥东侧约 5 km 有一穹状熔岩锥——红头山, 海拔 2 010.2 m。望天鹅火山位于长白县西南, 是长白县与抚松县的分界, 也是漫江上游与长白十五道沟至十九道沟水系的分水岭。围绕望天鹅火山口, 四周水系成放射状分布。望天鹅火山锥体的外围是大面积长白期玄武质熔岩环绕望天鹅火山锥体成盾状台地(图 1), 其熔岩流南抵鸭绿江边, 西至临江东, 东越鸭绿江入朝, 北面进入抚松县境内。火山岩在我国境内东西长约 100 km, 南北宽近 50 km, 分布面积近 4 000 km<sup>2</sup>, 是形成长白山南坡火山岩的主要喷发中心。望天鹅火山南面的十三道沟和十九道沟之间由于后期水系切割, 可见柱状节理发育极好的长白期粗面玄武岩, 形成孤立的塔林沿水系两侧分布。长白期下部为富含斜长石斑晶(占体积 20%~ 30%)粗面玄武岩, 向上过度为少斑或无斑致密块状粗面玄武岩, 顶部为气孔状粗面玄武岩。在长松(长白县-松江河)公路约 40 km 处出露具瓦片状风化特点的望天鹅期粗面岩(CB19-10), 56 km 处为玄武质粗安岩(CB19-12 和 CB19-13), 它们都属于望天鹅期下部(或早期)的火山岩。进入抚松县境内在长松公路 65 km