收稿日期: 2008-10-18

中国大陆新生代上地幔铅同位素特征

路凤香¹,李方林¹,韩吟文¹,侯青叶²

1. 中国地质大学地球科学学院,湖北武汉 430074
 2. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083

摘要:收集了新生代(含少量晚中生代)301 件幔源玄武岩的 Pb 同位素数据,编制了系统的 Pb 同位素变化趋势(等值线)图 件,现仅提供"中国大陆新生代上地幔的²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 比值变化趋势图".图件显示,Pb 同位素在南北方向的差异比较显著,南 北的界线大体从合肥-郑州-银川-汗腾格里峰,结合 Nd 同位素的资料,以²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 比值为 18~18.5 作为分界,以北小 于 18~18.5;以南大于该值.此外初步辨认出该时期存在 3 种类型的地幔:造山带地幔、裂谷型地幔及"非典型地幔".与依据 不同时代、各种类型的样品铅同位素的比值,统一编制的"中国大陆岩石圈²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 比值变化趋势图"进行比较,显示出在东 北的西北部的²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 比值、南北向东经 104°附近的高²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 比值区是否存在、渤海周边 Pb 异常区的强度以及华南 DUPAL 异常区问题等方面都有区别,表明晚中生代-新生代时期,中国大陆进入了一个新的软流圈地幔对流体系,近代地幔 并没有完全继承老地幔的全部特征而是被注入了新的软流圈物质.此外,两张趋势图都显示了南北分块的特征,而东西向的 系统变化,仅在近代 Pb 比值趋势图中华南块体的东南沿海地区出现,暗示太平洋板块俯冲对中国大陆的影响处于次要地位. 关键词:幔源玄武岩;Pb 同位素;²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 比值变化趋势.

中图分类号: P591; P597 **文章编号:** 1000-2383(2009)01-0011-06

Characteristics of Pb Isotopic Composition in Upper Mantle Cenozoic for China Continent

LU Feng-xiang¹, LI Fang-lin¹, HAN Yin-wen¹, HOU Qing-ye²

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: 301 Pb isotopic data of mantle-derived basalts for Cenozoic (contain few Late Mesozoic samples) were collected in this work. The variety trend (contour) maps of mantle Pb isotopic in China continent for Cenozoic were draw up systematically and the "variety trend of ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb ratio of Cenozoic basalts derived from mantle in continent of China" is submitted in this paper only. The result shows that there is a difference between North China and South China on ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb ratio. The geographic boundary between two regions is from Hefei-Zhengzhou-Yinchuan-Hantenggeli peak and the ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb ratio boundary is believed to 18–18, 5 approximately. The ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb ratios in North China are <(18-18, 5) and vice versa. Combining with Nd isotopic data, three mantle types can be identified, they are: mantle of orogenic belt; mantle of continental rifting; and mantle of non-typical region. The map of "variety trend of ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb ratio of lithosphere in continental of China" is also showed in this paper. This is a comprehensive map, and compiled by the Pb isotopic data of samples which collected from different periods and different type of rocks. By comparison to these two maps, some differences and problems can be found such as: The values for ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb ratio in northwestern of Northeast China; the intensity of Pb isotopic-anomaly in "Bohai basin"; whether the high-value area of Pb isotopic appears in 104°E and adjacent or not; a problem about DUPAL anomaly in South China. Based on the differences, the compositions of mantle at present-day did not inherit the total characteristics of lithosphere before and injects the new asthenospheric material. It is referred that a new mantle convection system appears in China conti-

nent for Late-Mesozoic-Cenozoic. However, the difference of ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb ratio between North and South China still exist in both maps implying that the effect of subduction from Pacific slab for China continent is not very important. **Key words**: matle-derived basalt; Pb isotop; variety trend of ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb.

0 引言

中国大陆是由众多小陆块自显生宙以来逐步拼 合形成,并依次处于古亚洲洋、特提斯一古太平洋和 印度洋一太平洋3大动力学体系的影响范围.这一 特点在很大程度上制约着中国大陆岩石圈结构、演 化与层圈相互作用等方面所具有的独特性.近十多 年来地质、地球物理和地球化学研究已初步揭示:主 要组成中国大陆的中朝、扬子一华南、塔里木等陆块 长期位于南、北半球或者冈瓦纳大陆和劳亚大陆交 接的过渡带,而且各陆块的壳和幔具有不同的化学 组成特征(壳幔间具耦合性)与演化历史,有的类似 冈瓦纳大陆壳幔的特征,有的类似劳亚大陆壳幔的 特征.深入研究这些陆块原始归属与演化历史,对理 解中国大地构造发展及全球大陆运动历史均应具有 重要意义.

理论分析与实际应用都表明,与锶、钕同位素体 系相比,铅同位素体系更为适用于区域性、大面积的 地球化学示踪.铅在不同块体之间的差异大于前者, 而且铅同位素在不同的块体中,地壳与地幔具有明 显的同步变化(张理刚等,1995;朱炳泉,2001;张本 仁等,2002).所以如果通过玄武岩对地幔进行了 Pb 同位素填图,那么一定程度上与地壳的总体效应不 会有很大的矛盾.

与前人不同的是:本文单独收集了新生代(含少 量晚中生代)幔源玄武岩的 Pb 同位素组成,结合 Sr、Nd 同位素的资料,反演讨论了中国大陆新生代 上地幔的²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 地球化学场特征,此外还与编 制的新生代之前中国大陆岩石圈的²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 地球 化学场进行了初步对比,以便展示部分演化特征及 深部软流圈的更新.有关新生代之前中国大陆岩石 圈的 Pb 同位素特征的系统成果将另文发表.

1 中国大陆新生代上地幔 Pb 同位素 填图

基于上述认识,此次工作收集了 301 件近年来 (20 世纪 80 年代末至 2004 年)在国内外杂志上发 表的幔源玄武岩的 Pb 同位素资料,为了保证这些 玄武岩为地幔来源,它们要符合下面两个条件之一: (1)其中含有地幔捕虏体或高压巨晶;(2)通过微量 元素及同位素示踪该玄武岩确属幔源岩浆结晶产 物.这样所获得的成果能清楚地反映新生代上地幔 的特征,而不受地壳和壳一幔过渡带组成的干扰.所 收集的玄武岩的时代,除个别地区为中生代喷发(如 新疆托云盆地,辽宁阜新等)外,均为新生代时期.因 此基本上可以代表新生代地幔铅同位素化学场,需 要强调的是,文中和标题中提到的"新生代地幔"实 际上就包含了晚中生代的样品.

在填图工作中除应用了n(²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb)、n(²⁰⁷ Pb/²⁰⁴ Pb)、n(²⁰⁸ Pb/²⁰⁴ Pb)3 个常用的同位素比 值外,还应用了n(²⁰⁷ Pb/²⁰⁶ Pb)和n(²⁰⁸ Pb/²⁰⁶ Pb)两 项比值进行比较,从中选择最佳的数值显示地球化 学场特征.依据这些资料,共编制了4张图件,本文 发表的是²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 比值变化趋势图(图1),为保 持图面清晰,图1中的每个"点"代表的是位置接近 的几个样品的平均值,其中的空白区为无数据或数 据不配套地区.由图1可知:

(1)中国大陆具有比较明显的南北向铅同位素 的差异,这一点前人已经有报道(周新华和朱炳泉, 1992).依据目前已有资料点的控制,粗略划分的南 北界限是:从合肥一郑州一银川一汗腾格里峰,分界 线以北的²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb<18,以南²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb>18;以 北²⁰⁷ Pb/²⁰⁶ Pb>0.86,以南²⁰⁷ Pb/²⁰⁶ Pb<0.86.

(2)渤海周边地区显示了与华北地区不同的 Pb 同位素组成,他们的²⁰⁶ Pb /²⁰⁴ Pb、²⁰⁸ Pb /²⁰⁴ Pb及 ²⁰⁸ Pb /²⁰⁶ Pb 均高于华北地区,²⁰⁷ Pb /²⁰⁶ Pb 则相应低 于华北地区,异常区的范围向北影响到辽西,向南影 响到山东境内.

前人曾认为辽东一徐淮一朝鲜北部具有共同的 地质构造及演化特征,而与华北地台有很大差别,建 议划分出"渤海地块"(唐克东和邵济安,2001),张理 刚等(1995)对花岗岩铅同位素的研究指出,鲁西、徐 淮和辽东地区的基底岩石与朝鲜北部一致,而与华 北有很大差别,朱炳泉(2001)据全国地球化学填图 工作的成果,划分出了"辽胶渤地体",并认为是与华 北地台不同的独立块体.从笔者的资料可以看出,在 晚中生代一新生代"渤海周边地区"地幔铅同位素所 显示出的与华北块体的差异比其他时期更为显著,



图 1 中国大陆新生代玄武岩²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 比值变化趋势图 Fig. 1 Variety trend of ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb ratio of late Mesozoic-Cenozoic basalts derived from mantle in China Continent

推测近代可能有更深部的物质上涌,因而强化了该 块体的特征.

(3)西藏及其周边地区²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 显著高于其 他地区,具有独立块体的特征.

(4)东南沿海地区的²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 比值有不明显 的自大陆边缘向内陆(自东向西)逐渐降低的趋势, 可能与新生代玄武岩源区特征有关.

2 有关归属的讨论

地幔和地壳地球化学研究已经揭示出,全球地 幔的地球化学和同位素的不均一性具有一定的区域 性规律(Hart, 1984, 1988). 根据迄今已积累的资 料,在全球大陆范围内,可划分出:(1)北太平洋型陆 块省. 铅同位素具有 NHRL 特征,分布于北美西部 以及亚洲的西伯利亚与华北之间;(2)东冈瓦纳型陆 块省. 具有较高的²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 和 DUPAL 异常特征, 范围包括澳洲西部、南部非洲、印度、印度支那和华 夏(华南);(3) 西冈瓦纳型陆块省. 具有高²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb和高 μ 值特征,范围包括非洲中部、南美、南极 和澳洲东部;(4)劳亚或北大西洋型陆块省. 具有 低²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 和近于原始地幔的低 μ 值特征,范围 包括欧洲、格陵兰、北美东部、西伯利亚、华北和塔里 木(朱炳泉等,1998). 中国东部,开展的大尺度铅(结 合部分 Nd、Sr 数据)同位素填图,已证明华南、扬 子、华北等陆块的幔、壳具有不同的 Pb 同位素组 成,并据之划分了相应的 Pb 同位素省和亚省(朱炳 泉,1993;张理刚等,1993,1995),以及通过世界范围 的对比,将华南和华北分别归属于东冈瓦纳型陆块 省和劳亚或北大西洋型陆块省(周新华和朱炳泉, 1992; Zhu, 1994;朱炳泉等,1998).

2.1 Pb、Nd 同位素示踪及地幔类型

本文依据 ε_{Nd}和²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 所做的图解(图 2) 中显示出了 5 个地幔地球化学省:五大连池、东北 (除五大连池以外的其他地区)、华北(包括河北、山 西、山东、河南)、华南及青藏周边(包括苏鄂皖赣、闽 浙、新疆托云盆地、于田、甘肃玉门、礼县、云南腾冲、 马关、青海囊谦等地)及西藏.其中五大连池和西藏



图 2 中国大陆晚中生代-新生代玄武岩 ε_{Nd}-²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 图解

Fig. 2 The diagram for $\varepsilon_{Nd}-{}^{206}\,Pb/{}^{204}\,Pb$ of Late Mesozoic-Cenozoic basalts derived from mantle in continent of China



1. 五大连池; 2. 东北; 3. 华北; 4. 苏鄂皖赣; 5. 闽浙; 6. 青藏周边; 7. 西藏

- 图 3 中国大陆晚中生代 新生代玄武岩 Pb△8/4 ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 图解
- Fig. 3 The diagram for Pb△8/4—²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb of Late Mesozoic-Cenozoic basalts derived from mantle in Continent of China

 $\Delta 8/4 = (^{208} Pb/^{204} Pb - ^{208} Pb/^{204} Pb_{NHRL}) \times 100$; 1. 五大连池; 2. 东 北; 3. 华北; 4. 苏鄂皖赣; 5. 闽浙; 6. 青藏周边; 7. 西藏

的 Pb-Nd 块体特征最为显著. 前者以低 ϵ_{Nd} 和低 ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 为特征;后者以低 ϵ_{Nd} 和高²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 为 特征,除一个五大连池的投点落入东北区外,这两个 块体与其他地区基本上没有重叠. 这两个地区的共 同特征是 ϵ_{Nd} 值低,不同的是五大连池投点区靠近 EM1 区,而西藏则靠近 EM2. 据已有的资料,可以 初步辨认出 3 种不同类型的地幔,他们是:

(1)以西藏为代表的造山带地幔, ε_{Nd} 为负值.

(2)以华北、东北和华南大部为代表的大陆裂谷 型地幔,主要显示了亏损地幔的特征, ℯм 偏高, ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb **有一定的变化范围**.

(3)非典型地幔,如五大连池的火山岩与绝大多数新生代火山岩相比, €№ 低,反映源区有其特殊性,可能其源区以古老的地幔残留物为主(Zhang, 1998),也可能是发育了更新的大陆裂谷(邵济安, 2008,个人交流);又如,苏鄂皖赣地区,投点分散难以集中成区;青藏周边地区在图2中与华南地区同属一个投点区,但其中部分地点又与西藏共同具有高△Sr的特征,这些地区的归属还需要进一步工作,暂定名为非典型地幔区.

图 2 还显示,华南与青藏周边地区 Pb 同位素 具有相同 Pb-Nd 块体的特征,他们与华北、东北之间 的界线大致在²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 比值为 18~18.5 处,但有 部分重叠.这一界限范围比图 1 所确定的南北分界线 (²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 比值为 18)略宽,可能将²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb比值 为 18~18.5 作为南北陆块的分界带比较合理.

2.2 关于 DUPAL 异常

Hart (1984)提出将△8/4>60,△Sr>50 作为 DUPAL 异常的重要辨别标志,如用上述两数值衡 量(图 3),中国现今的大陆上地幔普遍具有高△8/4 的特征,绝大多数的投影点都大于 60,表明中国大 陆新生代玄武岩具有高 Th/Pb 比值并富集放射性 成因的²⁰⁸ Pb. 其原因难以用地壳物质的加入来解 释,是否带有区域性的特征还有待进一步研究.

结合本文此次收集的△Sr 的数据,该值大于 50 的仅限于西藏及青藏周边囊谦、玉门、于田、康苏拉 克、腾冲等地区,除个别地区(如山东济阳第三纪玄 武岩,广东珠江口盆地)具有△8/4>60,△Sr>50 外,现今广大的华南陆块并未显示典型的 DUPAL 异常区的特征,因此现今的华南陆块与典型的东冈 瓦纳型陆块省的特征还有所差别.

3 中国大陆岩石圈铅同位素比值与新 生代地幔铅同位素比值变化趋势的对比

本文所展示的"中国大陆岩石圈²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 比 值变化趋势图"(图 4,引自韩吟文,2007^①)即收集了 不同时代,不同类型的样品铅同位素比值后进行统 一编图.此次工作的样品包括不同时代的各类岩浆 岩,特别是花岗岩和玄武岩、变质岩、沉积岩、矿石以 及麻粒岩的样品,但没有采用原油和沥青等有机物

①韩吟文,2007.中国大陆岩石圈铅同位素组成特征.见:李廷栋主 编,中国岩石圈三维结构,第四篇,第四章.



图 4 中国大陆岩石圈²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 比值变化趋势图 Fig. 4 Variety trend of ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb ratio of lithosphere in China Continent

的同位素数据.这些综合信息全面地反映了中国大陆岩石圈铅同位素地球化学场总体的面貌.与上述新生代的上地幔铅同位素的地球化学场(图1)对比,可以看出两者有差别,暗示新生代地幔发生了变化,两者的相同点为:在南北存在差异的特征方面是耦合的.而不同点为:

(1)在大陆岩石圈铅地球化学场的图件中显示 出东经 104°附近存在南北向的高²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 比值 带,但在图 1 没有出现.

(2)近代上地幔铅同位素比值在华南地区的东 南沿海地带东西方向存在系统差异,华北和东北地 区并不明显,然而在大陆岩石圈铅的地球化学场的 图件中没有显示.

(3)在近代上地幔铅比值的系列图中,"渤海周 边地区"的铅比值异常区比大陆岩石圈铅比值图件 中要更为明显.

(4)东北地区西北部在图4"中国岩石圈
²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 铅比值变化趋势图"中,为高值区
(>18),可以向西与古生代兴蒙造山带相连,而在新
生代地幔²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 铅比值图中,东北总体属于低

值区(图1),显示出新生代地幔铅比值没有遭受兴 蒙造山带岩石圈物质的混染.

(5)Hart(1988)、Zhu(1994)、Zhu *et al*.(1998) 曾经从总体的 Pb 同位素资料的角度,将华南归属 于东冈瓦纳型陆块省,而后者具有较高的 ²⁰⁶ Pb/²⁰⁴ Pb 和 DUPAL 异常特征,但据此次提供的 新生代地幔资料,华南不具有明显的 DUPAL 异常.

对比结果说明,新生代地幔与中国大陆岩石圈 Pb 同位素特征有一定程度的差别,前者没有完全继 承老地慢的全部特征.

4 结论

(1)中国大陆铅同位素地球化学场的一级分区 是南北分块,而东西分带处于次要地位,表明中国大 陆受东侧太平洋板块俯冲的影响较小.

(2)依据新生代上地幔 Pb 及 Nd 同位素资料, 可以辨认出有 3 种类型的地幔;造山带地幔、裂谷型 地幔和非典型地幔. (3)新生代上地幔具有 DUPAL 异常的地区仅 限于青藏及其周边地区,被前人划归东冈瓦纳块体 的华南地区,在新生代的图中 DUPAL 异常并不 显著.

(4)根据所总结的近代地幔 Pb 同位素比值变 化趋势(图 1)与大陆岩石圈 Pb 同位素比值变化趋 势(图 4)所显示的差别,表明近代地幔并没有完全 继承老地幔的全部特征而是被注入了新的软流圈物 质,证实晚中生代一新生代,中国大陆进入了一个新 的软流圈地幔对流系统.

(5)今后需要进行中国大陆不同时代、不同岩类 的 Pb 比值变化趋势研究,然后再综合归纳做出相 应的图件,这样可以获得更为详尽的成果,来探讨大 陆岩石圈的演化及块体归属.

致谢:在工作过程中得到了张本仁院士的指导, 周新华研究员对本文进行了审阅,并提出了宝贵的 意见,特此表示衷心的感谢!

References

- Hart, S. R., 1984. A large-scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle. *Nature*, 309:753-757.
- Hart, S. R., 1988. Heterogeneous mantle domains: Signatures, genesis and mixing chronologies. *Earth Planet Sci. Lett.*, 90:273-296.
- Tang, K. D., Shao, J. A., 2001. The discussion about "Bohai block", EXTENDED ABSTRACTS with programs. The third conference on geological sciences for Chinese from two sides of strait, three regions and the world, Hong Kong, 259-263
- Zhang, B. R., Gao, S., Zhang, H. F., et al., 2002. Geochemistry in Qinling orogenic belt. Science Press, Beijing, 1-187 (in Chinese).
- Zhang, L. G., Liu, J. X., Wang, K. F., et al., 1995. Lithospheric block geology in East Asia—Geochemistry of upper mantle, basement and granite and lead isotopic as well as geodynamic. Science Press, Beijing, 1-252 (in Chinese).
- Zhang, L. G., Wang, K. F., Chen, Z. S., et al., 1993. Composition of lead isotopic in feldspars of granites and division for lead isotopic province in eastern China. *Science Bulletin*, 38(3):254-257 (in Chinese).
- Zhang, M., Zhou, X. H., Zhang, J. B., 1998. Nature of the lithospheric mantle beneath NE China: Evidence from potassic volcanic rocks and mantle xenoliths. In: Mar-

tin, F. L. F., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., Mantle dynamics and plate interactions in East Asia, Geodynamics Series, 27, American Geophysical Union Washington, D. C., 197–22.

- Zhou, X. H., Zhu, B. Q., 1992. Isotopic system of Cenozoic basalts in eastern China and mantle division on geochemistry. In: Liu, R. X., ed., Chronology and geochemistry for Cenozoic volcanic rocks in China. Seismological Press, Beijing, 366-391 (in Chinese).
- Zhu, B. Q., 1994. Geochemical evidence for the southern China block being a part of Gondwana. *Journal of Southeast Asia Earth Science*, 9(4):319-324.
- Zhu, B. Q., 1993. Topological diagrams of three dimension for ore Pb isotopic applying to division for geological province and ore species. *Geochemica*, 3: 209-216 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, B. Q., 2001. Geological province and sharp zone of geochemistry. Science Press, Beijing, 1-252 (in Chinese).
- Zhu, B. Q., Chang, X. Y., Qiu, H. N., et al., 1998. Characteristics of Proterozoic basement and the relationship to supperlarge ore deposits. *Science in China* (Ser. D), 4 (Suppl.):63-70 (in Chinese).

附中文参考文献

- 唐克东,邵济安,2001.关于"渤海地块"的讨论,第三届海峡 两岸三地及世界华人地质科学研讨会文集.香港, 259-263.
- 张本仁,高山,张宏飞,等,2002.秦岭造山带地球化学.北京: 科学出版社,1-187.
- 张理刚,刘敬秀,王可法,等,1995.东亚岩石圈块体地质—— 上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学与铅同位素地 球化学及其地球动力学.北京:科学出版社,1-252.
- 张理刚,王可法,陈振胜,等,1993.中国东部中生代花岗岩长 石铅同位素组成与铅同位素省划分.科学通报,38(3): 254-257.
- 周新华,朱炳泉,1992.中国东部新生代玄武岩同位素体系和 地幔地球化学.见:刘若新主编,中国新生代火山岩年 代学和地球化学.北京:地震出版社,366-391.

朱炳泉,1993. 矿石 Pb 同位素三维空间拓扑图解用于地球化 学省与矿种区划. 地球化学,3: 209-216.

- 朱炳泉,2001. 地球化学省与地球化学急变带. 北京:科学出 版社,1-118.
- 朱炳泉,常向阳,邱华宁,等,1998. 地球化学急变带的元古宙 基底特征及其与超大型矿床产出的关系. 中国科学(D 辑),4(增刊): 63-70.