

# 大别山碰撞后镁铁-超镁铁岩的 U-Pb 同位素地球化学: 壳-幔相互作用及 LOMU 端元\*

黄 方 李曙光\*\*

(中国科学技术大学地球与空间科学系, 化学地球动力学研究实验室, 合肥 230026)

周红英 李惠民

(国土资源部天津地质矿产研究所, 天津 300170)

**摘要** 对大别山祝家铺辉石岩-辉长岩的 U, Pb 同位素研究表明, 大别山碰撞后镁铁-超镁铁岩的低 U, 高 Pb 含量及低 U/Pb 的特征, 可能是亏损软流圈地幔(DMM)或岩石圈地幔与下地壳之间相互作用的结果, 而与地幔热柱(plume)及深俯冲陆壳无关. 发现祝家铺辉石岩-辉长岩的高  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  样品具有 LOMU 端元的特点, Pb, Sr 和 Nd 同位素联合示踪显示祝家铺辉石岩-辉长岩的源区有古老富集岩石圈地幔(LOMU)、下地壳物质以及亏损软流圈地幔三端元混合的特征. 形成大别山碰撞后镁铁-超镁铁岩初始岩浆的壳幔相互作用过程可能为: 碰撞后增厚的岩石圈发生拆离, 引发亏损软流圈上涌, 使得上涌的软流圈及尚未拆离的古老富集岩石圈地幔发生部分熔融. 它们析出的熔体垫托在壳幔边界层, 并与下地壳相互作用, 从而使得这种熔体具有富集岩石圈地幔和下地壳的地球化学特征.

**关键词** 镁铁-超镁铁岩 壳幔相互作用 U-Pb 同位素地球化学 大别山 LOMU 端元

大别山北部的镁铁-超镁铁岩侵入体的年代学研究表明, 出露于北大别地体的辉石岩-辉长岩侵入体形成于 120~130 Ma, 属碰撞后岩浆岩<sup>[1~4]</sup>. 这些岩浆岩直接提供了该区上地幔的地球化学信息, 对研究碰撞造山带地区壳-幔的相互作用有重要意义. 但是关于大别山碰撞后镁铁-超镁铁岩的成因及壳幔相互作用的方式一直存在许多争议. 主要元素和痕量元素以及 Sr, Nd 同位素地球化学的研究认为该岩体的成因与洋壳俯冲无关, 并且排除了陆壳混染的可能性<sup>[5]</sup>. 李曙光等提出俯冲陆壳析出流体交代楔形上地幔的模型<sup>[6]</sup>, 这个模型可能成立的前提是北大别地体是仰冲壳楔. 但是近年来北大别地体中三叠纪榴辉岩的发现<sup>[7~9]</sup>说明南、北大别地体同属扬子俯冲板块, 所以这种模型的地质背景不存在; Jahn 等提出了俯冲的中性下地壳与亏损软流圈地幔的源混合模型<sup>[1]</sup>, 该模型认为俯冲的中性下地壳被软流圈地幔捕获, 并形成一种混杂岩, 然后在浅层次地幔热柱(plume)影响下部分熔融形成镁铁-超镁铁岩浆. 然而, 此说最大困难在于可以断离进入软流圈地幔的俯冲陆壳岩石只可能是比重大于地幔的基性榴辉岩, 而非中性片麻岩. 此外, 前人工作只是对北大别镁铁-超镁铁岩做了 Sr, Nd 同位素工作, 尚缺乏 U-Pb 同位素示踪研究. 为了进行 Sr, Nd, Pb 同位素联合示踪及弄清大别山碰撞后镁铁-超镁

2001-12-15 收稿, 2002-03-04 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 49873006)和国家重点基础研究发展规划项目(编号: G1999075503)及中国科学院知识创新工程项目(编号: KZCX2-107)

\*\* 联系人, e-mail: lsg@ustc.edu.cn

铁岩源区的性质, 本文对已进行过主要元素、痕量元素以及 Sr, Nd 同位素研究的祝家铺辉石岩-辉长岩进行了 U, Pb 同位素地球化学研究, 并与另文发表的北大别片麻岩(该岩体的围岩和捕虏体)和南大别超高压变质岩的 U, Pb 同位素数据<sup>[10]</sup>以及大别山花岗岩长石 Pb 同位素数据<sup>[11]</sup>进行对比, 从而对大别山镁铁-超镁铁岩石的成因提供重要制约, 获得对壳幔相互作用新的认识.

## 1 地质背景及样品简述

祝家铺岩体是北大别地体最大的辉石岩侵入体, 主要由堆晶成因的辉石岩及角闪辉石岩组成, 它未受到明显的构造变形和变质作用. 岩体内可观察到岩浆作用后期的伟晶状辉石闪长岩脉及填充型细粒黑云母辉石闪长岩脉. 岩体的围岩为浅色混合片麻岩和灰色斜长角闪片麻岩, 并可在岩体内见到黑云母角闪斜长片麻岩捕虏体. 镜下观察表明, 这些辉石岩-辉长岩主要由斜方辉石、单斜辉石、角闪石、斜长石和黑云母组成. 其中结晶最早的是斜方辉石和斜长石, 其次是单斜辉石, 角闪石部分交代辉石, 而黑云母部分交代角闪石.

## 2 同位素测试方法

测定样品均为以前测定过 Sr, Nd 同位素及主、微量元素组成样品<sup>[5,6]</sup>, 样品无污染破碎流程已在前文介绍<sup>[10]</sup>. 样品 Pb, U 同位素数据是在天津地质矿产研究所 VG354 型质谱仪测得, 使用同位素稀释法测得 Pb, U 含量. 铅稀释剂为 H208, 铀稀释剂为 H235. 称量约 0.20 g 全岩样品(含 Pb 量低的样品增至 0.40 g), 用 HF + HNO<sub>3</sub> 溶样. 用 HBr 提取样品, 并在阴离子交换树脂柱上, 分别用 HBr 和 HNO<sub>3</sub> 淋洗分离 Pb 和 U. 标准样 NBS981 多次平均测定值为  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.9376 \pm 0.0015(2\delta)$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.4939 \pm 0.0014(2\delta)$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.7219 \pm 0.0033(2\delta)$ .

每次测定均伴有空白实验, 实验的全流程 U 空白为 0~0.13 ng. 本文所测试的 3 个低 Pb 含量(0.4~1.1  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )样品, 在测试时采用了双瓶亚沸蒸馏低本底的试剂, 对应 Pb 的空白仅为 0.56 ng; 其他 5 个样品 Pb 含量为 1.8~3.6  $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 空白为 2.24 ng. 对每个样品的同位素比值和 Pb 的含量均用对应的空白值进行扣除. Pb 空白对 Pb 含量引入的误差对于大多数样品  $\leq 0.3\%$ , 对于低 Pb 含量的少数样品, 由于增加了溶样量, Pb 空白引入的误差  $< 0.2\%$ . 在扣除 Pb 空白后, 误差将大大小于 0.2%. 数据见表 1.

表 1 大别山镁铁-超镁铁岩石 U-Pb 同位素数据

样号	岩性	产地	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ( $t=130$ Ma)	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ( $t=130$ Ma)	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ ( $\mu$ )	Pb/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	U/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$
Dzh-89-1	辉石岩	祝家铺	17.242	16.936	15.576	15.561	37.998	15.0	0.4124	0.1034
Dzh-1	角闪辉长岩	祝家铺	16.839	16.761	15.560	15.556	38.058	3.8	2.3394	0.1449
Dzh-2	角闪辉长岩	祝家铺	17.189	17.132	15.637	15.634	38.143	2.8	3.6491	0.1645
Dzh-5	似斑状角闪单辉岩	祝家铺	17.079	16.969	15.633	15.628	38.007	5.4	0.9616	0.0850
Dzh-6	辉石角闪岩	祝家铺	16.715	16.597	15.582	15.576	37.865	5.8	2.3455	0.2225
Dzh-88-1	伟晶状辉石闪长岩	祝家铺	16.514	16.440	15.412	15.408	37.679	3.6	1.1553	0.0687
Dzh-88-3	辉石岩	祝家铺	16.159	16.115	15.340	15.338	38.009	2.2	1.7814	0.0630
Dzh-88-4	细粒黑云辉石闪长岩脉	祝家铺	17.081	16.956	15.577	15.571	38.190	6.1	2.3016	0.2275

## 3 结果

### 3.1 U-Pb 含量特征

图 1 为祝家铺辉石岩-辉长岩 U/Pb-Pb 和 Pb/U-U 图. 图中还包括源于地幔的主要玄武岩类

(分别以源于亏损软流圈地幔的 MORB 和源于地幔热柱的 OIB 代表), 陆下岩石圈地幔, 上、下地壳, 祝家铺辉石岩-辉长岩侵入体的片麻岩围岩和捕虏体(简称北大别片麻岩)以及代表深俯冲陆壳的南大别超高压岩石的数据。图 1 表明, 陆下岩石圈地幔与亏损软流圈地幔(DMM)有类似的 U-Pb 组成, 而北大别片麻岩的 U-Pb 组成比较接近于下地壳。祝家铺辉石岩-辉长岩的 U, Pb 含量及 U/Pb, Pb/U 大部分介于亏损软流圈地幔(或陆下岩石圈地幔)与下地壳(或北大别片麻岩)之间, 少数低 Pb 含量样品落入 MORB 区域。然而, OIB、南大别超高压岩石(深俯冲上陆壳<sup>[10]</sup>)及上地壳则因较高的 U 含量和高 U/Pb 在图 1 中远离祝家铺辉石岩-辉长岩, 并与其变化趋势不一致(见图 1(a), (b))。

### 3.2 Pb 同位素特征

图 2 为未进行年龄校正的  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图。图 2 显示北大别片麻岩的 Pb 同位素特征<sup>[10]</sup>与大别山中生代花岗岩长石 Pb 的同位素组成一致<sup>[11]</sup>。大别山中生代花岗岩侵入于具中地壳特征的角闪岩相片麻岩中, 因此其源区可能为更深的下地壳。这一推测与其低放射成因 Pb 特征是一致的<sup>[11]</sup>。从图 2(a)可以看出, 大别山碰撞后镁铁-超镁铁岩石的  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  组成形成二端元混合趋势, 其低  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  端元落在显示了下地壳特征的南北大别花岗岩长石铅<sup>[11]</sup>的区域; 祝家铺辉石岩的高  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  端元则指向一个富集  $^{207}\text{Pb}$  因而较富集  $^{235}\text{U}$  的端元。图 2(b)说明在具有相同  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  时, 大别山碰撞后镁铁-超镁铁岩石的  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  整体都比其片麻岩围岩及捕虏体要高, 显示其源区 Th/U 较高。

由于没有测量 Th 的含量, 本文只对  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  进行了年龄校正。在图 3 中, 年龄校正到 130Ma 的大别山碰撞后镁铁-超镁铁岩的低  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  端的 Pb 同位素特征仍然与大别山花岗岩长石 Pb 相同<sup>[11]</sup>, 也类似于 EMI 端元; 它的高  $^{207}\text{Pb}$  端元和西澳大利亚煌斑岩<sup>[15]</sup>以及来自南大西洋中脊的玄武岩玻璃 S18-60/1<sup>[16]</sup>类似, 在相同或相近的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  时, 其  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  大大高于大别山所有的地壳岩石(中生代花岗岩, 围岩片麻岩及超高压变质岩), 也高于亏损的软流圈地幔和 EMI。

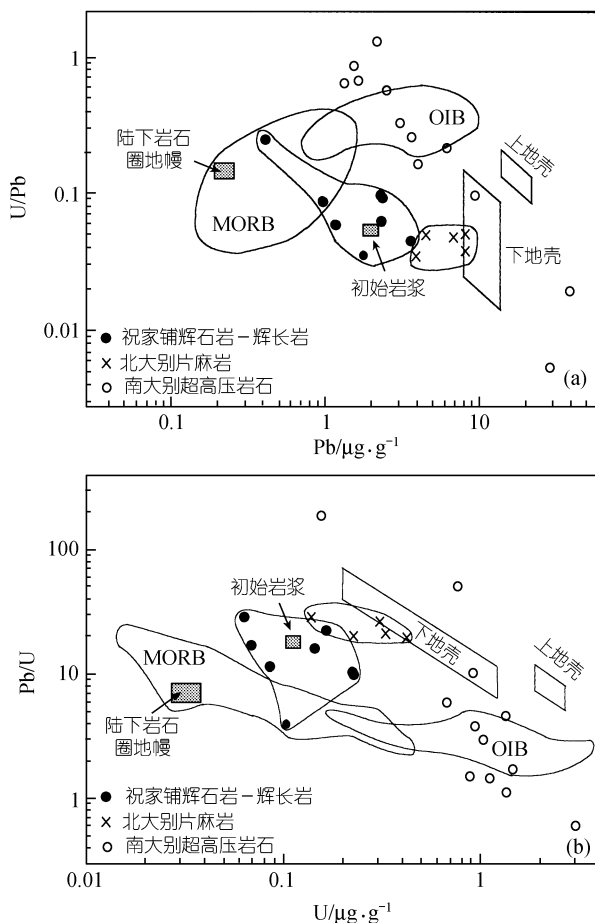


图 1 祝家铺辉石岩-辉长岩的 U/Pb-Pb(a)和 Pb/U-U(b)图  
初始岩浆数据详见正文, 北大别片麻岩及南大别超高压岩石数据来自文献[10], MORB, OIB 数据来自文献[12], 上下地壳数据来自文献[13], 陆下岩石圈地幔数据来自文献[14]

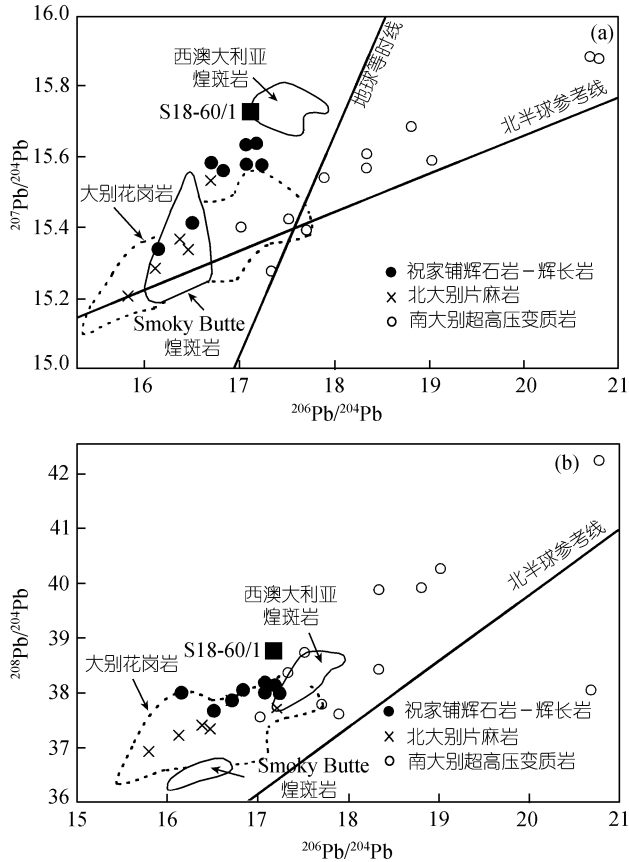


图 2 祝家铺辉石岩-辉长岩的  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (a)和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (b)图( $t = 0$ )  
南大别超高压岩石及北大别片麻岩的数据来自文献[10], 南北大别花岗岩长石 Pb 数据来自文献[11],  
西澳大利亚和 Smoky Butte 煌斑岩数据来自文献[15], S18-60/1 数据来自文献[16]

## 4 讨论

### 4.1 初始岩浆的 U-Pb 含量及其地质意义

由于祝家铺辉石岩( $\text{MgO} > 15.5\%$ )是堆晶岩, 而角闪辉长岩脉( $\text{MgO} < 11.5\%$ )为演化的岩浆, 它们的 U, Pb 含量受岩浆的结晶分离作用影响很大, 并不能直接代表初始岩浆的含量. 通过对祝家铺辉石岩-辉长岩的主要元素地球化学研究, 李曙光等已指出其母岩浆的组成应介于堆晶的辉石岩和演化的角闪辉长岩脉之间, 其  $\text{MgO}$  为  $12\% \sim 13\%$  [5]. 图 4 表明, 除样品 Dzh-6 外, 该岩石的 U, Pb 含量与  $\text{MgO}$  含量呈良好的负相关关系. 样品 Dzh-6 比较特殊, 它  $\text{MgO}$  含量较高, 但 U 含量仍然较高, 这主要是因为它的角闪石含量很高造成的. 前人研究表明祝家铺辉石岩-辉长岩中角闪石交代辉石的现象很普遍 [3,5], 但其 Ar-Ar 年龄与锆石 U-Pb 年龄一致 [2,18], 因此角闪石是岩浆演化到晚期辉石受到交代的产物, 所以 U 含量较高. 据此, 从 Pb-MgO 和 U-MgO 相关图上(图 4), 我们可推测其初始岩浆的  $\text{Pb} \approx 2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $\text{U} = 0.11 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ , 在图 1 中恰好落在亏损软流圈地幔或陆下岩石圈地幔与下地壳或北大别片麻岩之间.

已有研究表明, 大别山镁铁-超镁铁岩石的化学组成是幔源岩浆与地壳相互作用的结

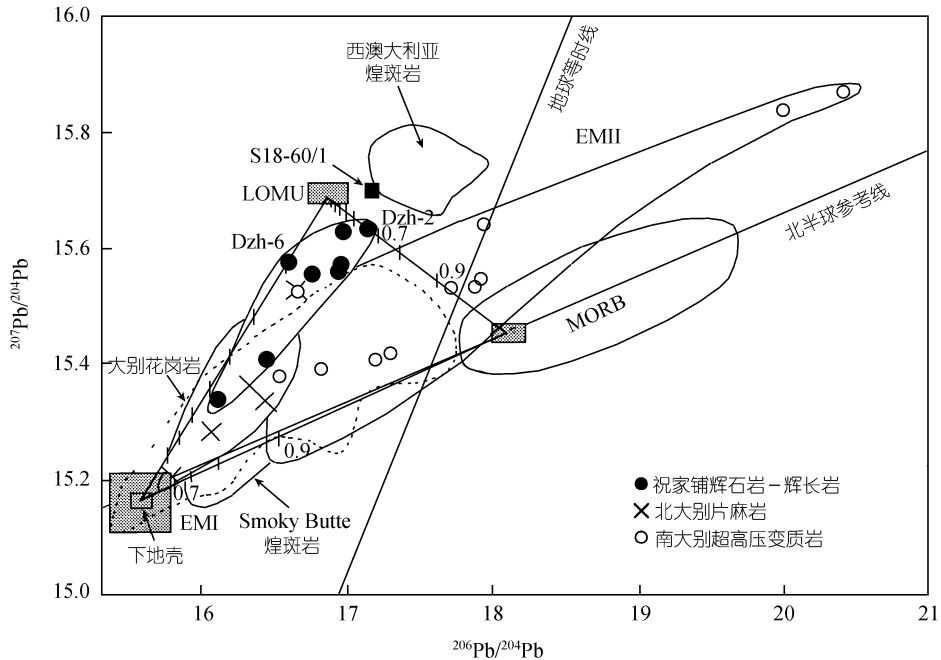


图 3 北大别碰撞后镁铁-超镁铁岩的初始  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图 ( $t = 130 \text{ Ma}$ )

下地壳熔融岩浆以大别花岗岩长石 Pb 与北大别片麻岩  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  最低点的平均值表示, EMI 和 EMII 来自文献[13], 西澳大利亚和 Smoky Butte 煌斑岩, S18-60/1 数据来源同图 2, MORB 数据来自文献[17]

果<sup>[1,4,6]</sup>, 该幔源岩浆有可能来自地幔热柱、亏损软流圈地幔或岩石圈地幔. 图 1 显示的镁铁-超镁铁岩石的 U/Pb-Pb 和 Pb/U-U 之间的关系说明祝家铺辉石岩-辉长岩的原始岩浆可能源于亏损的软流圈地幔或陆下岩石圈地幔, 与地幔热柱无关; 而地壳组分可能主要来自下地壳或被侵入的围岩, 与上地壳无关. 由于前人工作已排除围岩混染对该碰撞后辉石岩-辉长岩地球化学组成的影响<sup>[1,5,6]</sup>, 并证明这一岩浆事件与地幔上涌有关<sup>[2]</sup>. 因此, 大别山碰撞后镁铁-超镁铁岩石的 U-Pb 含量特征可能是亏损软流圈地幔析出熔体与岩石圈地幔及下地壳相互作用的结果.

事实上, 目前尚没有大别山地区三叠纪以来存在大规模的地幔热柱活动的报道. 此外, 南大别超高压岩石除了 2 个样品外, 绝大多数样品与 OIB 一样具有较高的 U 含量和 U/Pb. 已有研究表明 OIB 的高 U/Pb 与再循环进入地幔的榴辉岩相俯冲洋壳有关<sup>[19]</sup>. 因此, 如果祝家铺辉石岩-辉长岩的原始岩浆的来源和地幔热柱或深俯冲的扬子陆壳有关系, 应当有比现在高得多的 U 含量和 U/Pb. 显然, 本文数据不支持这种过程. 本文估计的祝家铺辉石岩初始岩浆 U/Pb 比值显著低于 OIB 的 U/Pb, 也略低于 MORB 以及陆下岩石圈地幔的平均 U/Pb. 因为部分熔融产生的熔体的 U/Pb 比值比源区高, 因此辉石岩的源区应该具有更低的 U/Pb 值和较低的  $\mu$  值. 图 1 显示祝家铺辉石岩的初始岩浆的 Pb 含量高于 MORB, 这说明它的低  $\mu$  特征是由于源区比亏损软流圈地幔更富集 Pb 造成的.

#### 4.2 岩浆源区的性质

如前已述, 祝家铺辉石岩-辉长岩的低  $^{207}\text{Pb}$  端元的 Pb 同位素特征和大别山花岗岩长石 Pb 以及 EMI 类似. 大别山造山带广泛发育的燕山期花岗岩被认为是来自部分熔融的大别山下地

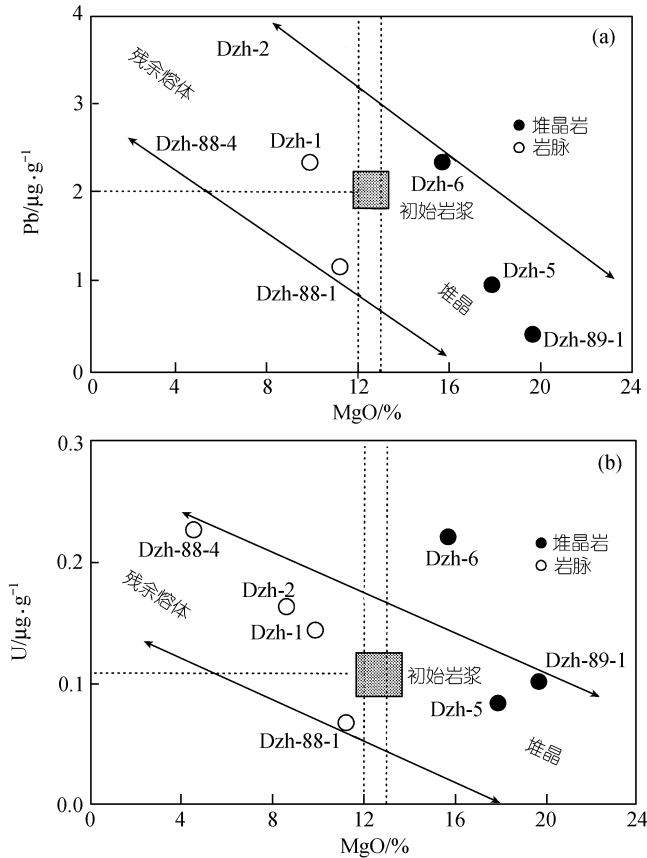


图 4 祝家铺辉石岩-辉长岩的 Pb-MgO(a)和 U-MgO(b)相关图  
MgO 数据来自文献[5]

壳, 其长石 Pb 同位素比值  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  都很低<sup>[11]</sup>。北大别道士冲辉长岩的锆石的稀土元素组成具有明显的地壳特征<sup>[4]</sup>, 此外, 汉诺坝玄武岩包体中早白垩纪的二辉麻粒岩包体的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值(-18)远低于源于岩石圈地幔的石榴辉石岩包体的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值(>-2.2), 它说明岩浆板低垫托成因的基性麻粒岩包体明显受下地壳的影响<sup>[20]</sup>。以上证据表明祝家铺辉石岩-辉长岩的低  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  端元与下地壳有关。与此相反, 大别山地区中生代基性岩石中, 还没有地幔 EMI 端元独立存在的证据。所以结合前人研究和大别山实际的地质背景, 我们认为, 大别山碰撞后镁铁-超镁铁岩石的低  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  端元可能是大别山深部下地壳, 而不是 EMI。

祝家铺辉石岩-辉长岩的高  $^{207}\text{Pb}$  端元落在地球等时线左侧, 因而不可能是亏损软流圈地幔或深部地幔热柱(图 3)。此外, 祝家铺辉石岩的 U-Pb 含量及 U/Pb 比与上地壳不同, 它的 Pb 同位素组成也与代表俯冲上地壳的南大别超高压岩石不同<sup>[10]</sup>。因此, 该高  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  端元也不是古老上地壳, 它最有可能代表古老富集岩石圈地幔端元, 该端元有较高的  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和相对较低的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ , 具有 LOMU 端元特征。

我国学者早就指出地幔中应该存在低  $\mu$  值地幔<sup>[21][2]</sup>. Douglass 等<sup>[23,24]</sup>在研究南大西洋中脊玄武岩玻璃时也提出了 LOMU(低 $\mu$ )端元, 并给出了 LOMU 端元的同位素特征为低  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  以及低  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值, 变化的  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和较高的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值, 它代表了拆离的分散在上部地幔中的陆下岩石圈地幔. 然而, 我们注意到, 低  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的 LOMU 端元(如 Smoky Butte 煌斑岩<sup>[15]</sup>和五大连池钾质玄武岩<sup>[21]</sup>)与 EMI 具有完全相同的 Sr, Nd 和 Pb 同位素特征, 彼此无法区分, 只有高  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.700$ )的 LOMU 端元(如西澳大利亚煌斑岩<sup>[15]</sup>)才具有完全不同于 EMI 和 EMII 的 Pb 同位素特征(图 3), 因此它可以被视为一具有特殊的 Pb 同位素特征的独立端元. 事实上, Douglass 等<sup>[23]</sup>在解释南大西洋中脊玄武岩玻璃的 Pb 同位素特征时, 用于模拟计算的 LOMU 端元的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.500$ , 而  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  高达 15.700. Kamenetsky 等<sup>[16]</sup>最近报道的具有典型 LOMU 特征的来自南大西洋洋中脊玄武岩玻璃样品(S18-60/1)也有较高的  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ( $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.701$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.188$ ). 因此, 本文报道的大别山碰撞后辉石岩-辉长岩源区的高  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、低  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的 LOMU 端元是一个不同于 EMI 和 EMII 的独立端元. 此外, 周泰禧等<sup>[25]</sup>报道的北淮阳王家河橄榄辉长岩的长石 Pb 同位素数据就有一个样品  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  高达 15.680 而  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  仅为 17.000, 也类似于 LOMU 端元. 这种 LOMU 端元需要在太古代早期具有高  $\mu$  值, 到太古代晚期或早元古代变为低  $\mu$  值的演化历史. 李曙光等<sup>3)</sup>通过综合中国东部华北和华南陆块的中生代镁铁质岩浆岩的 Sr-Nd 同位素数据, 指出北大别带深部岩石圈的地球化学特征与华北陆块岩石圈类似, 这说明北大别山带深部岩石圈的确存在具有太古代演化历史的古老的陆下岩石圈物质.

应当指出, 虽然镁铁-超镁铁岩的初始 Pb 同位素看起来象是下地壳和 LOMU 二端元混合的特征, 但是由于来自亏损软流圈地幔的岩浆(MORB 型)的 Pb 含量只有  $0.541 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[13]</sup>, 比岩石圈地幔和大别山下地壳部分熔融产生的岩浆的 Pb 含量(分别为  $3.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[26]</sup>和  $8.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ <sup>[10]</sup>)低得多, 以致于一定量软流圈物质的加入对初始岩浆的 Pb 同位素影响不大. 混合模拟估算(见图 3)表明亏损软流圈熔体的贡献甚至最大可以达到 60%~70%. 因此, 我们无法排除有亏损的软流圈地幔物质参与进行三端元混合的可能性. 此外, 如果祝家铺辉石岩-辉长岩的初始岩浆只是下地壳和古老富集岩石圈地幔的二端元混合, 没有来自软流圈地幔的熔体参与, 这就意味着软流圈地幔只能以热传导的方式提供巨大热量使得下地壳和岩石圈地幔发生部分熔融, 这是难以想象的; 如果是三端元混合, 下地壳和岩石圈地幔部分熔融所需的热量可随着软流圈物质的大量上涌而带入, 这个过程更容易发生. 事实上三端元混合的特征可在 Pb-Nd, Pb-Sr 同位素图上得到清楚的显示.

综合祝家铺辉石岩-辉长岩的同一组样品的 Sr, Nd 和 Pb 同位素数据, 我们可以对祝家铺辉石岩-辉长岩源区的进行 Sr-Nd-Pb 同位素联合示踪. 图 5 为该辉石岩-辉长岩体的  $\epsilon_{\text{Nd}}-^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}-^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图. 图 5 清楚地显示了这一组数据至少需要 3 个混合端元: 即具有中等的  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  比值及高  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值的亏损地幔端元, 低  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值及低  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值的下地壳端元和

1) Zhou X, Zhang J. LOMU-PM connection: A continental EMI debate. Abstracts of the 8th Int. Conf On Geochron, Cosmochron, and Isotope Geology, US, 1994, Geologica; Survey Circular 1107, 368, Berkeley, California, USA

2) Zhang M, Zhou X, Zhang J. Nature of the lithospheric mantle beneath NE China: Evidence from potassic volcanic rocks and mantle xenoliths. In: Flower M F, et al. ed. Mantle dynamics and plate interactions in East Asia, American Geophysical Union, Geodynamics Series, 1998, 27: 197~220, AGU, Washington D C, USA

3) 李曙光, 杨 蔚. 大别山华北与华南陆块深部地缝合线及俯冲大陆岩石圈拆离模型: 中国东部中生代幔源岩浆岩 Sr-Nd 同位素证据. 2001 年西安“大陆的俯冲、拆离和减薄作用学术研讨会”报告

低  $\epsilon_{Nd}$  值及高  $^{207}Pb/^{206}Pb$  比值的古老富集岩石圈地幔端元(LOMU). 这 3 个端元之间的相互作用可形成祝家铺辉石岩-辉长岩的 Sr-Nd-Pb 同位素特征.

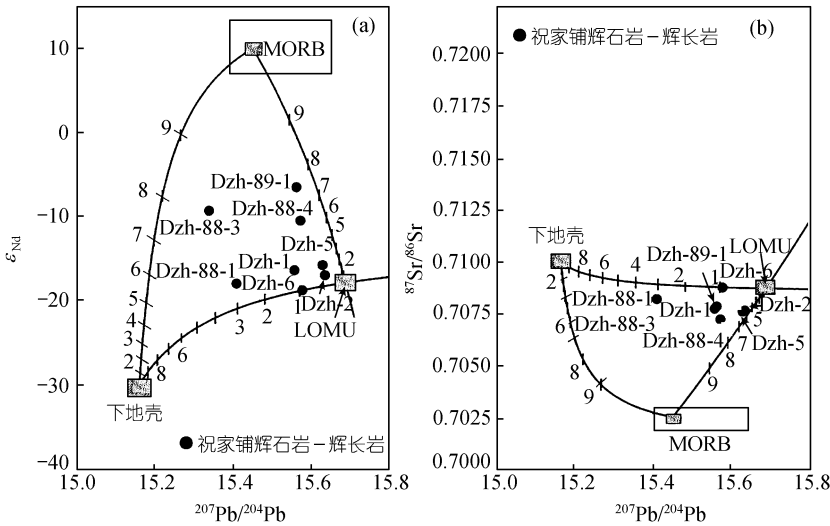


图 5 祝家铺辉石岩-辉长岩的 Sr, Nd 和 Pb 相关图  
数据来源同图 3

诚然, 亏损的地幔端元可以存在于不均一的岩石圈地幔之中, 也可以是来自软流圈的与 MORB 类似的玄武质岩浆. 考虑到岩石圈地幔和下地壳部分熔融所需的巨大热能的来源, 选择有来自亏损软流圈物质加入的三端元混合模型较易解释引发下地壳及岩石圈地幔部分熔融的热能来源. 毕竟, 我们没有任何证据可以排除软流圈物质的加入.

### 4.3 壳幔相互作用的方式

上述讨论表明大别山祝家铺镁铁-超镁铁岩石的源区具有明显的下地壳和古老富集岩石圈地幔(LOMU)端元及亏损软流圈地幔的三端元混合的特征. 由于扬子和华北板块发生陆-陆碰撞使得岩石圈增厚, 加厚的岩石圈可能在侏罗纪和早白垩纪发生拆离减薄, 导致中国东部软流圈大量上涌<sup>[2,27~29]</sup>, 从而引发燕山期大规模的岩浆作用. 三端元混合特征说明, 上涌软流圈地幔及富集岩石圈地幔部分熔融产生的熔体不是直接侵入中、上地壳, 而需要有一个岩浆板底垫托过程, 熔体从而可与下地壳充分相互作用, 使其性质得到部分或彻底改造. 这种早白垩纪的岩浆板底垫托过程已被汉诺坝基性麻粒岩包体的出色年代学研究所证实<sup>[30]</sup>. 有趣的是, 这些基性麻粒岩包体的 Sr, Nd 和 Pb 同位素特征<sup>[20]</sup>与大别山早白垩纪辉石岩-辉长岩非常类似<sup>[1,6]</sup>. 我们推测这些基性麻粒岩包体的低  $\epsilon_{Nd}$  值特征也是岩浆板底垫托时与下地壳相互作用的结果.

## 5 结论

本文所获得的主要结论可概括为:

(1) 大别山祝家铺辉石岩-辉长岩的 U-Pb 含量特征表明其源区具有岩石圈地幔或亏损软流圈地幔与下地壳混合的特征, 而和地幔热柱及深俯冲陆壳无关.



(2) Pb, Sr 和 Nd 同位素联合示踪揭示了祝家铺辉石岩-辉长岩的源区具有下地壳物质、亏损软流圈地幔和富  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  低  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的古老富集岩石圈地幔(LOMU)三端元混合的特征。它是幔源岩浆与下地壳相互作用的结果。

(3) 该壳幔相互作用过程可能与造山带碰撞后的岩石圈拆离及岩浆板底垫托有关。在这一过程中, 上涌的软流圈地幔及富集岩石圈地幔部分熔融产生的熔体垫托在壳幔边界层, 并与残留的古老富集岩石圈地幔和下地壳相互作用, 从而形成了大别山碰撞后镁铁-超镁铁岩的地球化学特征。

## 参 考 文 献

- 1 Bor-ming Jahn, Fuyuan Wu, Ching-Hua Lo, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chemical Geology*, 1999, 157: 119~146
- 2 李曙光, 洪吉安, 李惠民, 等. 大别山辉石岩-辉长岩体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *高校地质学报*, 1999, 5(3): 351~355
- 3 葛宁洁, 侯振辉, 李惠民, 等. 大别造山带岳西沙村镁铁-超镁铁岩体的锆石 U-Pb 年龄. *科学通报*, 1999, 42(19): 2110~2114
- 4 陈道公, 汪相, Deloué E, 等. 北大别辉石岩成因: 锆石微区年龄和化学组成. *科学通报*, 2001, 46(7): 586~590
- 5 李曙光, 聂永红, 郑双根, 等. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用——I. 大别山同碰撞镁铁-超镁铁岩的主要元素及痕量元素地球化学. *中国科学, D 辑*, 1997, 27(6): 488~493
- 6 李曙光, 聂永红, Hart S R, 等. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用——II. 大别山同碰撞镁铁-超镁铁岩的 Sr, Nd 同位素地球化学. *中国科学, D 辑*, 1998, 28(1): 18~22
- 7 徐树桐, 苏文, 刘贻灿, 等. 大别山北部榴辉岩的发现及其岩相学特征. *科学通报*, 2000, 44(13): 1452~1456
- 8 刘贻灿, 徐树桐, 李曙光, 等. 大别山北部榴辉岩的地球化学特征和 Sr, Nd 同位素组成及其大地构造意义. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(增刊): 99~107
- 9 刘贻灿, 李曙光, 徐树桐, 等. 大别山北部榴辉岩和英云闪长质片麻岩锆石 U-Pb 年龄及多期变质增生. *高校地质学报*, 2000, 6(3): 417~423
- 10 李曙光, 黄方, 周红英, 等. 大别山双河超高压变质岩及北部片麻岩的 U-Pb 同位素组成——对超高压岩石折返机制的制约. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(12): 977~984
- 11 张理刚. 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及其动力学. 北京: 科学出版社, 1995
- 12 Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, et al. Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 1986, 79: 33~45
- 13 Zindler A, Hart S R. Chemical Geodynamics. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1986, 14: 493~571
- 14 Zartman R E, Haines S M. The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs——A case for bi-directional transport. *Geochimica et Cosmologica Acta*, 1988, 52: 1327~1339
- 15 Fraser K J, Hawkesworth C J, Erlank A J, et al. Sr, Nd and Pb and minor element geochemistry of lamproites and kimberlites. *Earth and Planet Sci Lett*, 1985, 86: 57~70
- 16 Kamenetsky V, Mass R, Sushcheskaya N, et al. Remnants of Gondwanan Continental lithosphere in oceanic upper mantle: Evidence from the South Atlantic Ridge. *Geology*, 2001, 29(3): 243~246
- 17 Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313~345
- 18 Li S, Jagoutz E, Zhang Z, et al. Geochemical and geochronological constraints on the tectonic outline of the Dabie Mountains, central China: A continent-microcontinent-continent collision model. *Continental Dynamics*, 1998, 3: 14~31

- 19 Kogiso T, Tatsumi Y, Nakono S. Trace element transport during dehydration processes in the subducted oceanic crust: 1. Experiments and implications for the origin of ocean island basalts. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 148: 193~205
- 20 张国辉, 周新华, 孙 敏, 等. 河北汉诺坝玄武岩中麻粒岩类和辉石岩类捕虏体 Sr, Nd, Pb 同位素特征及其地址意义. *岩石学报*, 1998, 14(2): 190~197
- 21 刘北玲, 朱炳泉, 陈毓蔚. 低  $\mu$  值地幔的存在及其意义. *科学通报*, 1988, (15): 1164~1167
- 22 Douglass J, Schilling J G, Denis F. Plume-ridge interactions of the Discovery and Shona mantle plumes with the southern Mid-Atlantic Ridge (40°~55°S). *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(B2): 2941~2962
- 23 Douglass J, Schilling J G. Systematics of three-component, pseudo-binary mixing lines in 2D isotope ratio space representations and implications for mantle plume-ridge interaction. *Chemical Geology*, 2000, 163: 1~23
- 24 Douglass J, Schilling J G, Denis F. The Discovery and Shona mantle plumes and the LO-MU component: An inexorable connection? *EOS Trans, AGU*, 1996, 77(46): Fall meet, Suppl, F827
- 25 周泰禧, 李学明, 张 巽, 等. 北淮阳富碱侵入岩带 Pb 同位素研究. *中国科学技术大学学报*, 1995, 25(4): 467~473
- 26 Tatsumoto M, Basu A R, Wankang Huang, et al. Sr, Nd and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of Eastern China: enriched components EMI and EMII in subcontinental lithosphere. *Earth Planet Sci Lett*, 1992, 113: 107~128
- 27 李曙光, 黄 方, 李 晖. 大别-苏鲁造山带碰撞后的岩石圈拆离. *科学通报*, 2001, 46(17): 1487~1491
- 28 吴福元, 孙德有. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄. *长春科技大学学报*, 1999, 29(4): 313~318
- 29 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质. *高校地质学报*, 2000, 6(3): 379~388
- 30 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(2): 133~137