

# 郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩 Nd、Sr、Pb 同位素特征及源区性质探讨<sup>\*</sup>

阎国翰<sup>1</sup>    蔡剑辉<sup>1,2</sup>    任康绪<sup>1,3</sup>    牟保磊<sup>1</sup>    李凤棠<sup>1</sup>    储著银<sup>4</sup>  
YAN GuoHan<sup>1</sup>, CAI JianHui<sup>1,2</sup>, REN KangXu<sup>1,3</sup>, MU BaoLei<sup>1</sup>, LI FengTang<sup>1</sup>, CHU ZhuYin<sup>4</sup>

1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871
  2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037
  3. 塔里木油田勘探开发研究院油藏评价所, 新疆库尔勒 841000
  4. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029
1. *School of Earth and Space Sciences, the Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China*
2. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*
3. *Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China*
4. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2007-00-00 收稿, 2008-00-00 改回.

**Yan GH, Cai JH, Ren KX, Mu BL, Li FT and Chu ZY. 2008. Nd, Sr and Pb isotopic geochemistry of late-Mesozoic alkaline-rich intrusions from the Tanlu Fault zone: evidence of the magma source. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1223 – 1236**

**Abstract**      Tanlu Fault Zone, a large deep fault zone in eastern China, cuts four tectonic units (the North China Craton, the Yangtz Craton, the Hinggan-Inner Mongolia-Jilin-Heilongjiang orogenic belt and the Sulu-Dabie orogenic belt) straight. It is well known that there is a nearly 2000 kilometer-long alkali-rich intrusive rock belt composed of many late-Mesozoic alkaline-rich intrusions in this zone. Based on the pioneers' research, a systematic and thorough geochemical study on their Nd, Sr and Pb isotope is presented in this paper for the first time. The distinct different Nd, Sr and Pb isotopic characteristics of the alkali-rich intrusive rocks in the four tectonic units indicates their different source regions: the late-Mesozoic alkaline intrusions from the Hinggan-Inner Mongolia-Jilin-Heilongjiang orogenic belt are derived from the young crust related to depleted mantle, but the others from the North China Craton, the Yangtz Craton and the Sulu-Dabie orogenic belt are mainly originated from the EMI-type enriched mantle. Farther more, the enrichment degree of the lithospheric mantle from the latter three units is obviously different from each other: the lithospheric mantle from the Sulu-Dabie orogenic belt has the highest enrichment (average  $\epsilon_{Nd}(t)$  value is  $-17.06$ ), that from the North China Craton (average  $\epsilon_{Nd}(t)$  value is  $-10.03$ ) takes second place, and the enrichment of the mantle in the Yangtz Craton (average  $\epsilon_{Nd}(t)$  value is  $-6.41$ ) is the lowest. It is suggested in this paper that the most enriched lithospheric mantle from the Sulu-Dabie orogenic belt results from the releasing of pressure in the subduction-exhumation in early Mesozoic era in the Sulu-Dabie orogenic, which conduces to the formation, precipitation and metasomatism of melt/fluids, and then reconstructs the lithospheric mantle from the North China Craton.

**Key words**      Nd, Sr and Pb isotopic characteristics; Nature of the magma source; Late Mesozoic; Alkaline-rich intrusive rocks; Tan-Lu Fault zone

**摘 要**      郯庐断裂带是中国东部一条巨大的深大断裂带,它纵切华北克拉通、扬子克拉通、兴蒙-吉黑造山带和大别-苏鲁造山带四个大地构造单元,特别是在该断裂带出露许多晚中生代富碱侵入岩体,构成一条长达近 2000km 的富碱侵入岩带。本文是在前人研究基础上首次从大尺度对整个郯庐断裂带富碱侵入岩的 Nd、Sr、Pb 同位素做了比较系统深入的研究,发现四个大地构造单元的富碱侵入岩具有明显不同的 Nd、Sr、Pb 同位素特征,暗示四大构造单元富碱侵入岩的源区性质差别较大:

<sup>\*</sup> 本文得到国家自然科学基金(项目编号: 40072024,49373170)的资助  
第一作者简介: 阎国翰,男,1939 年生,教授,博士生导师,主要从事岩浆岩、特别是碱性岩方面的研究, E-mail: caijh\_cags@163.com

兴蒙-吉黑造山带晚中生代富碱侵入岩源于和亏损地幔有成因联系的年青地壳( $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为正,平均值+2.25);华北克拉通、扬子克拉通和大别-苏鲁造山带三大构造单元晚中生代富碱侵入岩都主要源于EMI型富集地幔( $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为负值)。但是这三大构造单元岩石圈地幔富集程度差别较大。大别-苏鲁造山带岩石圈地幔相对富集程度最高( $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 平均值为-17.06);华北克拉通次之( $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 平均值为-10.03);扬子克拉通岩石圈地幔富集程度最低( $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 平均值为-6.41)。本文认为大别-苏鲁造山带岩石圈地幔相对最富集的原因可能是在早中生代扬子克拉通陆壳向华北克拉通深俯冲之后的折返过程中,因压力释放有利于熔/流体的形成、析出和向上交代并改造华北岩石圈地幔使之成为富集地幔。

**关键词** Nd、Sr、Pb 同位素特征; 源区性质; 晚中生代; 富碱侵入岩; 郯庐断裂带

**中图法分类号** P597.3; P588.121

## 1 引言

郯庐断裂带是中国东部一条巨大的活动历史复杂的深大断裂带(徐嘉伟和马国峰,1992;万天丰等,1996;朱光等,2004)。一般认为,该断裂带南起长江北岸的黄梅,经安徽的庐江、山东的郯城、渤海,过沈阳后分东西两支:东支为密山-抚顺断裂带,西支为依兰-伊通断裂带,总体呈NNE走向。该断裂带纵切华北克拉通、扬子克拉通、兴蒙-吉黑造山带和大别-苏鲁造山带四大构造单元(图1),在该断裂带出露许多晚中生代富碱侵入岩,构成一条长达近2000km的富碱侵入岩带(阎国翰等,1989;Zhao *et al.*, 2003)。

富碱侵入岩的概念最早由涂光炽等(1984)提出,主要包括碱性岩和碱性花岗岩,两者常常共生在一起,有共同的地质背景和形成条件。富碱侵入岩形成于岩石圈拉张环境,空间上常常构成线状延伸带,物质来源较深,与幔源物质作用关系密切,当上地幔部分熔融产生的富碱岩浆顺大断裂上升,硅铝层混染较少时形成碱性岩,混染较多时形成碱性花岗岩(涂光炽,1989;邱家骧等,1993)。

十几年来,许多学者(章邦桐等,1985;孙冶东等,1991;杨荣勇等,1993;周泰禧等,1995;张理刚等,1995;王德滋和王德滋,1996;邱检生等,1997;翟建平,1999;牛漫兰等,2003;Wu *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2005)分别对该带中一个或几个富碱侵入岩体的Nd、Sr、Pb同位素作过一些研究,工作多集中在南段开展,北段研究较少。

本文作者是在前人研究基础上,从大尺度首次对整个郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩的Nd、Sr、Pb同位素做了比较系统深入的研究,这对揭示华北克拉通、扬子克拉通、兴蒙-吉黑造山带和大别-苏鲁造山带四个大地构造单元在晚中生代时岩石圈地幔的组成、性质及壳-幔相互作用都有重要理论意义。

## 2 地质概况

### 2.1 区域地质

郯庐断裂带纵切华北克拉通、扬子克拉通、兴蒙-吉黑造山带和大别-苏鲁造山带四个大地构造单元。华北克拉通主体位于我国华北地区,其轮廓大致成三角形,基底是由大小

不等的深变质的太古宙古陆块拼合而成,这些陆块中太古宙岩系都是成孤立的块体展布,各自有不同的地质特征和演化历史,经古元古代末的吕梁运动(19~18亿年)形成统一的克拉通基底。从中元古代-三叠纪为华北克拉通盖层稳定发展阶段。中-新生代为活化阶段。

扬子克拉通包括从川滇东部到江浙沿海的长江中下游广大地区,基底是由变质较深的古元古界-太古宇(主要是古元古界)岩系和浅变质的中、新元古界三套岩系组成。其发展的基本模式是:以太古宙-古元古代川中微陆块(和江汉、南黄海微陆块)为核心,先后通过其周围的中、晚元古代优地槽和冒地槽(或海沟、岛弧、弧后盆地系统)的构造演化向外扩大增生。前震旦纪末晋宁运动基本形成统一的克拉通基底。从新元古代的震旦纪-三叠纪为该克拉通盖层稳定发展阶段。中-新生代为克拉通活化阶段。

兴蒙-吉黑造山带是在华北克拉通基本形成之后在其北缘形成的大地构造单元,其发展经历了中-新元古代(主要是新元古代)的地槽沉降阶段,即古亚洲洋扩张形成阶段,后经加里东和海西运动形成了近东西走向的兴蒙-吉黑造山带。并与华北克拉通一起成为欧亚板块的重要组成部分。

大别-苏鲁造山带位于华北克拉通和扬子克拉通之间,是在三叠纪早期扬子克拉通向华北克拉通下深俯冲、陆-陆碰撞发生高压-超高压变质作用,后经折返退变质作用而形成的一个造山带,并使中国东部成为统一的大陆。

### 2.2 富碱侵入体的时空分布

郯庐断裂带富碱侵入岩体主要沿郯庐断裂带的主断裂和次一级断裂的东西两侧分布。该富碱侵入岩带北起吉林永吉双合镇和敦化二合店,向南经辽东、越渤海进入山东,向西南经苏北和安徽大别山东段直达长江北岸的庐枞地区,纵跨吉林、辽宁、山东、江苏、安徽五省,长达近2000km(图1)。从富碱侵入岩体的空间分布状况来看,该带富碱侵入岩浆活动明显受郯庐断裂带的控制。

在郯庐断裂带出露许多富碱侵入岩体,但迄今为止做过同位素年代学研究的仅有22个(表1)。由表1可清楚地看出:郯庐断裂带富碱侵入岩体形成年龄的变化范围较宽,最老的为庐枞巴家滩辉石二长岩体,其Rb-Sr等时线年龄为150Ma,应属晚侏罗世;最年轻的是辽宁新宾纪家堡子石英二长岩体,其锆石U-Pb年龄为99Ma,为早白垩世末。但该

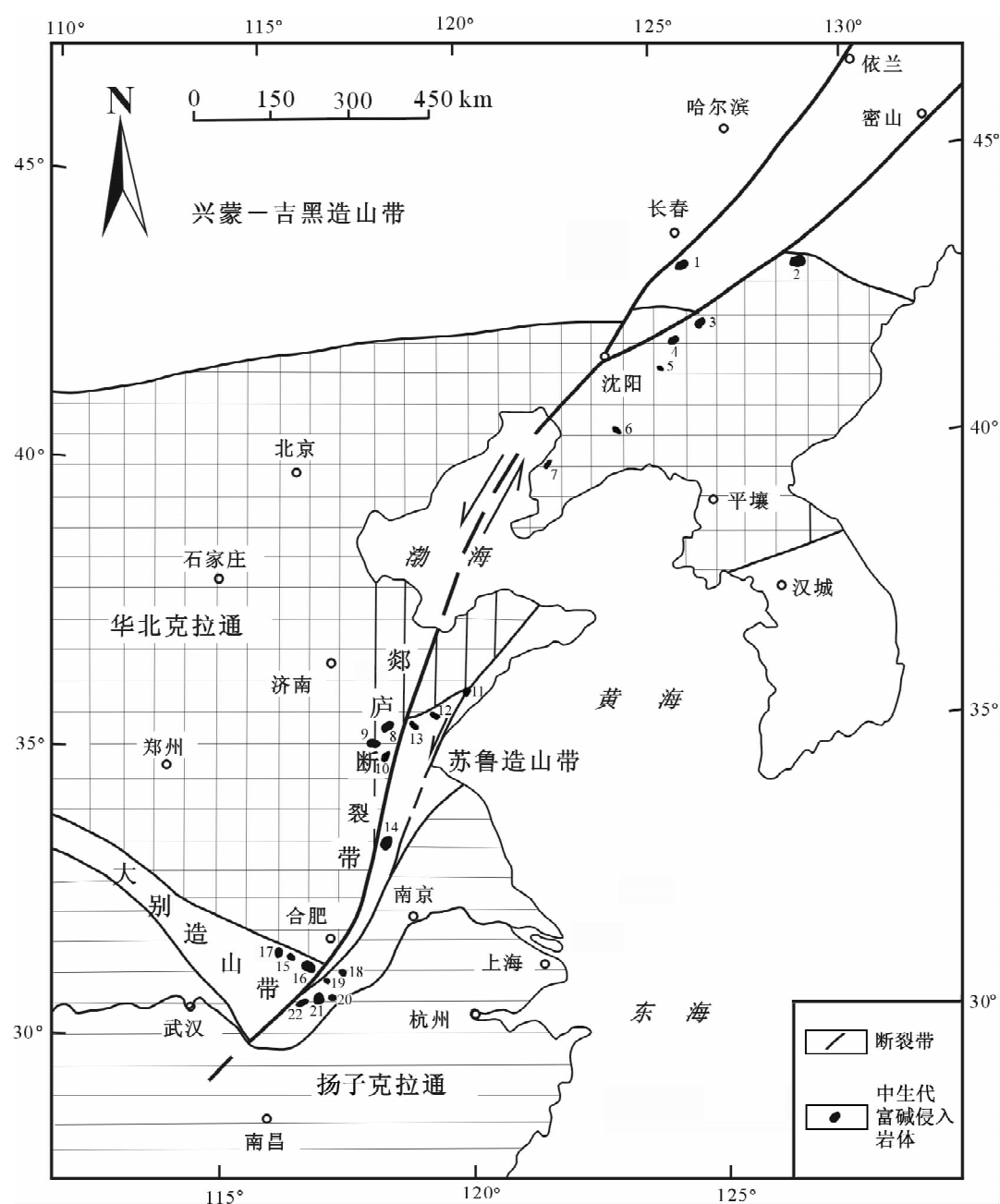


图1 郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩体分布示意图

注：1. 永吉白石砬子岩体；2. 敦化二合店岩体；3. 通化岗山岩体；4. 新宾纪家堡子岩体；5. 宽甸四平街岩体；6. 岫岩朝阳岩体；7. 盖县龙脖子岩体；8. 枣庄龙宝山岩体；9. 微山郝山岩体；10. 枣庄沙沟岩体；11. 五莲七宝山岩体；12. 五莲石场岩体；13. 吕南大山岩体；14. 定远瓦房刘岩体；15. 金寨响洪甸岩体；16. 桐城西汤池岩体；17. 金寨汞湾-鲍冲岩体；18. 庐枞巴家滩岩体；19. 庐枞石马滩岩体；20. 庐枞黄梅尖岩体；21. 庐枞城山岩体；22. 庐枞大龙山岩体

Fig.1 The distribution map of late-Mesozoic alkaline-rich intrusions from the Tanlu Fault zone

带绝大多数岩体的同位素年龄在 130Ma 左右,22 个岩体的平均年龄为 129.8Ma,这说明郯庐断裂带富碱侵入岩浆活动从晚侏罗世在局部地区就已开始,但高峰期是在早白垩世。因此,郯庐断裂带富碱侵入岩带属于晚中生代富碱侵入岩带。

总的来看,郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩体的时空分

布都具有不均一性特征。在时间分布上,华北和扬子两克拉通内侵入岩形成年龄的变化范围较宽,前者为 147 ~ 99Ma,后者为 150 ~ 130Ma;而兴蒙-吉黑和苏鲁-大别两个造山带中岩体形成年龄的变化范围较窄,分别为 125 ~ 123Ma 和 137 ~ 121Ma。在空间上,辽东、鲁南、大别山东段和庐枞四个地区富碱侵入岩体分布较集中,而辽南、鲁北地区出露较少。

表 1 郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩同位素年龄表

Table 1 The table of isotopic ages of late-Mesozoic alkaline-rich intrusions from the Tanlu Fault zone

| 大地构造单元   | 序号 | 岩体名称    | 岩石类型      | 测试方法       | 年龄 (Ma)     | 资料来源                       |
|----------|----|---------|-----------|------------|-------------|----------------------------|
| 兴蒙-吉黑造山带 | 1  | 永吉白石砬子  | 碱性花岗岩     | 锆石 U-Pb 法  | 123.0       | Wu <i>et al.</i> (2002)    |
|          | 2  | 敦化二合店   | 碱性花岗岩     | 锆石 U-Pb 法  | 146.9       | 杨志猛等,2002                  |
|          | 3  | 通化岗山    | 碱性花岗岩     | Rb-Sr 等时线法 | 113.8       | 方文昌 (1992)                 |
|          | 4  | 新宾纪家堡子  | 石英二长岩     | 锆石 U-Pb 法  | 99.0        | 谭运昌等 (1975)                |
|          | 5  | 宽甸四平街   | 碱性花岗岩     | 锆石 U-Pb 法  | 130 ± 1     | Wu <i>et al.</i> (2002)    |
|          | 6  | 岫岩朝阳    | 二长岩       | 锆石 U-Pb 法  | 127 ± 1     |                            |
|          |    |         | 石英二长岩     | 锆石 U-Pb 法  | 128 ± 2     |                            |
|          | 7  | 盖县龙脖子   | 角闪二长岩     | 黑云母 K-Ar 法 | 138.9       | 林景仟等 (1992)                |
|          | 8  | 枣庄龙宝山   | 正长岩       | Rb-Sr 等时线法 | 129.3 ± 4.5 | zhang <i>et al.</i> (2005) |
|          | 9  | 微山县郝山   | 细、中粒霓辉正长岩 | 锆石 U-Pb 法  | 131.1       | 阎国翰 *                      |
| 大别-苏鲁造山带 | 10 | 枣庄沙沟    | 黑云辉石岩-正长岩 | Rb-Sr 等时线法 | 127.0       | 阎国翰 *                      |
|          | 11 | 五莲七宝山   | 辉石二长岩     | 锆石 U-Pb 法  | 126 ± 3     | 周建波等 (2003)                |
|          | 12 | 五莲石场    | 二长岩       | Rb-Sr 等时线法 | 137 ± 1     | 林景仟等 (1992)                |
|          | 13 | 莒南大山    | 二长岩       | K-Ar 法     | 128.6       | Y203 区测                    |
|          | 14 | 定远瓦屋刘   | 石英二长岩     | Ar-Ar 法    | 127.9 ± 0.5 | 牛漫兰等 (2002)                |
|          | 15 | 金寨响洪甸   | 霞石正长岩     | 锆石 U-Pb 法  | 137.2       | 杨祝良等 (1999)                |
|          |    |         | 碱长正长岩     | 锆石 U-Pb 法  | 122.3       |                            |
| 扬子克拉通    | 16 | 桐城西汤池   | 碱长正长岩     | Ar-Ar 法    | 126 ~ 121   | 周泰禧等 (1995)                |
|          | 17 | 金寨永湾-鲍冲 | 石英二长岩     | Ar-Ar 法    | 126 ~ 121   |                            |
|          | 18 | 庐枞巴家滩   | 辉石二长岩     | Rb-Sr 等时线法 | 150.1 ± 0.9 | 杨荣勇等 (1993)                |
|          | 19 | 庐枞石马滩   | 石英正长斑岩    | Rb-Sr 等时线法 | 129.6 ± 1.1 | 孙冶东等 (1991)                |
|          | 20 | 庐枞黄梅尖   | 石英正长岩     | Rb-Sr 等时线法 | 133.1 ± 4.9 | 翟建平等 (1999)                |
|          | 21 | 庐枞城山    | 石英正长斑岩    | Rb-Sr 等时线法 | 137.4 ± 8.4 |                            |
|          | 22 | 庐枞大龙山   | 似斑状黑云正长岩  | Rb-Sr 等时线法 | 135.9 ± 6.1 |                            |

注：\* 未发表数据

2.3 岩体地质和岩石基本特征

在郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩带中,前人和本文作者做过 Nd、Sr、Pb 同位素研究的富碱侵入岩体有 18 个。兹由北向南将岩体和岩石基本特征简述如下:

(1)白石砬子碱性花岗岩体分布于吉林省永吉县双河镇西部,岩体呈近圆形,出露面积约 7km<sup>2</sup>,是由碱长花岗岩-碱性花岗岩-石英正长岩组成的复式小岩体。位于岩体中心部位的碱性花岗岩呈浅红色中粗粒结构,块状构造,可见晶洞构造,主要矿物组合为微斜条纹(60% ~ 65%)、石英(25% ~ 30%)和少量钠闪石。

(2)二合店碱性花岗岩体位于吉林省敦化市南部二合店一带,岩体为不规则状小岩株,出露面积约 10km<sup>2</sup>,主要由碱性花岗岩组成。岩石新鲜面为浅肉红色,半自形粒状结构,块状构造,主要造岩矿物为石英(25%)、碱性长石(包括微斜

条纹长石和少量正长石)(60% ~ 69%)、少量酸性斜长石和钠闪石。

(3)岗山碱性花岗岩体位于吉林省通化县大川乡西北部的岗山,呈近圆形的小岩株,侵位于碱长花岗岩体中,面积约 15km<sup>2</sup>。碱性花岗岩新鲜面为灰白色,中粒结构,块状构造,主要组成矿物为微斜条纹长石(约 75%)、石英(约 20%)、钠闪石(5%左右),局部可见长柱状霓石。

(4)纪家堡子石英二长岩体位于辽宁省新宾满族自治县西南部的纪家堡子一带,呈岩株状,与花岗岩构成复式岩体,面积约 50km<sup>2</sup>。岩石为似斑状结构,块状构造,主要矿物为钾长石(约 40%)、斜长石(更长石)(约 35%)、石英(约 15%)和闪石(约 5%)。

(5)龙宝山正长-二长岩体位于山东省枣庄市东北部龙宝山一带,呈圆形,面积约 4km<sup>2</sup>,为第四系所覆盖,主要由正长岩和部分二长岩组成,主要造岩矿物为正长石、酸性斜长

石、少量霓辉石和黑云母等。

(6) 郯山霓辉正长岩体位于山东省微山湖边,侵入于前寒武泰山群老片麻岩中,出露面积不足  $1\text{km}^2$ ,呈不规则枝杈状。岩石为细-中粒结构,块状构造。主要矿物为霓辉石、条纹长石、钠闪石和石英。

(7) 沙沟黑云辉石岩-辉石正长岩体位于山东省枣庄市沙沟镇东,为第四系所覆盖。根据钻孔资料估计岩体仅有几个平方公里。岩体主要由细粒黑云辉石岩(位于岩体中部)和中粒辉石正长岩(位于岩体边部),及分布于前两者之间的黑云辉石正长岩组成。主要造岩矿物为钾长石、透辉石及少量黑云母。

(8) 七宝山辉石二长岩体呈小岩株产于山东省五莲县西部约  $20\text{km}$  处的七宝山火山机构的中央部位,出露面积约  $10\text{km}^2$ 。由辉石二长岩及部分超浅成粗相安斑岩组成,岩石呈灰黑色,粗粒结构,块状构造,主要矿物为中长石(45%左右)、正长石(40%左右)、辉石(10%左右)及少量黑云母和角闪石。

(9) 大山二长岩体群:出露于山东省五莲县石场至莒南县大山一带,岩体面积由几个至几十个平方公里不等。主要岩石类型有二长岩、石英二长岩和石英正长岩,二长岩和石英二长岩,主要造岩矿物为条纹长石(35%~42%)、中-更长石(25%~35%)、角闪石(5%~15%)、石英(6%~10%)及少量黑云母。石英正长岩一般侵入较晚,该岩石主要组成如下:条纹长石(68%~70%)、斜长石(20%)、石英(7%~10%)、角闪石(7%)和少量黑云母。

(10) 瓦屋刘石英正长岩体位于安徽省定远县境内,呈不规则状小岩株出露。

(11) 响洪甸霞石正长岩-碱长正长岩体:位于安徽省金寨县东南约  $40\text{km}$  处的响洪甸,出露面积约  $15\text{km}^2$ 。主要岩石类型为粗粒斑状碱长正长岩和霞石正长岩,其中霞石正长岩多呈团块状、不规则状赋存于粗粒斑状碱长正长岩中。霞石正长岩主要由正长石和微斜长石(80%~85%)、霞石(10%~20%)及少量霓石、霓辉石组成。粗粒斑状碱长正长岩的主要造岩矿物为微斜长石和微斜条纹长石(60%~90%),其次是角闪石、黑云母及少量更长石。

(12) 西汤池碱长正长岩体出露于安徽省舒城与桐城两县交界处,呈小岩株侵位于由碱长花岗岩和钾长花岗岩构成的复式岩体中。

(13) 永湾-鲍冲石英二长岩体位于安徽省金寨县东南部约  $20\text{km}$  处,呈椭圆形小岩株状,出露面积约  $4\text{km}^2$ 。主要由角闪石英二长岩组成。

(14) 庐枞巴家滩辉石二长岩体位于安徽省庐江和枞阳两县交界处天桥南边的巴家滩一带。为火山通道相根部的浅成侵入岩,出露面积约为  $4\text{km}^2$ ,主要由辉石二长岩、石英辉石二长岩和含石英黑云二长岩组成。

(15) 矾山-石码滩正长斑岩-石英正长斑岩体位于庐枞盆地内部石码滩一带,出露面积较小,仅几个平方公里。

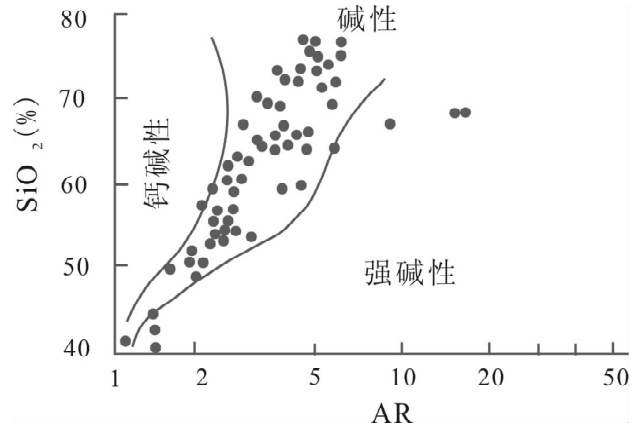


图2 郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩体的 AR -  $\text{SiO}_2$  图解 (Wright, 1969)

Fig. 2 AR -  $\text{SiO}_2$  diagram of late-Mesozoic alkaline-rich intrusions from the Tanlu Fault zone

(16)、(17)和(18)庐枞黄梅尖、城山、大龙山三个石英正长岩体均位于庐枞火山盆地的南部边缘,三岩体都主要由石英正长岩组成,其边部有少量碱长花岗岩和细粒花岗岩。石英正长岩的矿物组成以钾长石(50%)为主,其次为斜长石和石英,铁镁矿物含量很少,主要为黑云母,局部出现角闪石和辉石,偶见霓石和钠闪石(章邦桐等,1988)。

根据郯庐断裂带 18 个晚中生代富碱侵入岩体的全岩化学分析数据(具体数据另文发表),岩石的里特曼指数  $\sigma$  大多数在 3.3~9 之间,少数  $>9$ 。在 Wright (1969) 的 AR -  $\text{SiO}_2$  图解上(图2),18 个岩体的绝大多数投点落在了碱性岩区,少数落在了强碱性岩区,这表明郯庐断裂带晚中生代这 18

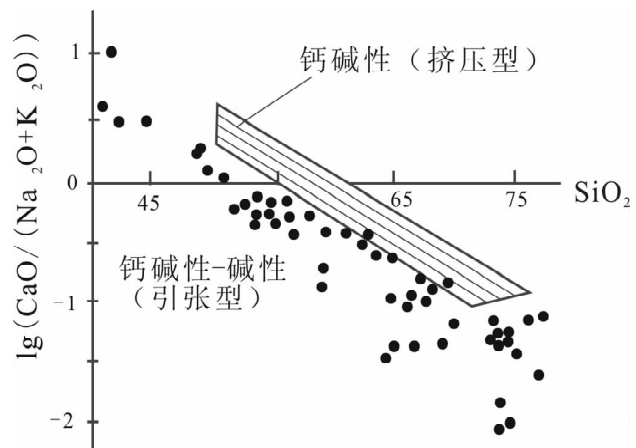


图3 郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩体的  $\lg [\text{CaO} / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] - \text{SiO}_2$  构造图解 (图式据 Brown, 1982)

Fig. 3  $\lg [\text{CaO} / (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] - \text{SiO}_2$  diagram of late-Mesozoic alkaline-rich intrusions from the Tanlu Fault zone

个岩体都属于富碱侵入岩。在 Brown (1982) 的  $\lg [CaO / (Na_2O + K_2O)] - SiO_2$  构造图解上 (图 3), 几乎所有投影点均落入拉张区, 暗示这些岩体都形成于拉张环境, 同时也说明郯庐断裂带在晚中生代处于拉张环境。

### 3 富碱侵入岩 Nd、Sr、Pb 同位素特征

随着同位素地质理论和测试技术的迅速发展, Nd、Sr、Pb 等同位素地球化学已成为研究岩浆岩物质来源和岩石圈演化的重要而有效的工具。

郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩的 Nd、Sr、Pb 同位素, 除前人资料外本文数据都是在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室用 VG354 固体源热电离质谱计分析测定。采用同位素稀释法进行前处理, 详细分析流程见 Qiao (1988)。 $^{87}Sr/^{86}Sr$  和  $^{143}Nd/^{144}Nd$  同位素比值分别用  $^{86}Sr/^{88}Sr = 0.1194$  以及  $^{146}Nd/^{144}Nd = 0.7219$  进行标准化处理, 并根据 NBS-987 的 Sr 标准值 0.710250 进行调整和 LaJolla 的 Nd 标准值 0.511860 分别进行调整。分析精度:  $Rb = \pm 2\%$ ;  $Sr = 0.5 \sim 1\%$ ;  $Sm, Nd \leq 0.5\%$  (通常情况), 整体上  $Rb/Sr$  为  $\pm 2\%$ ,  $Sm/Nd$  为  $\pm 0.2 \sim 0.5\%$ 。全流程空白值:  $Rb = 120pg$ ,  $Sr = 200pg$ ,  $Nd = 50 \sim 100 pg$ 。Pb 同位素测定的对象是相应样品中的钾长石, 标样 NBS981 的重分析误差为  $^{204}Pb/^{206}Pb = 0.05897 \pm 15$ ,  $^{207}Pb/^{206}Pb = 0.91455 \pm 80$ ,  $^{208}Pb/^{206}Pb = 2.161707 \pm 200$ 。Nd、Sr、Pb 同位素测定结果及计算出的有关参数与前人的相关数据一并列入表 2、表 3 和表 4 中。

#### 3.1 Nd 同位素特征

Nd 同位素是一种十分理想的地球化学示踪剂, 在岩石同位素地球化学研究中  $\epsilon_{Nd}(t)$  和  $^{143}Nd/^{144}Nd$  初始比值是最常用的两个重要参数。

##### 3.1.1 $\epsilon_{Nd}(t)$

$\epsilon_{Nd}(t)$  常用来示踪岩浆源区性质。当  $\epsilon_{Nd}(t) > 0$  时, 表示岩浆源于亏损地幔储库; 当  $\epsilon_{Nd}(t) < 0$  时, 表示岩浆源于富集地幔或地壳; 当  $\epsilon_{Nd}(t) \approx 0$  时, 表示岩浆源于未亏损的原始地幔。

兴蒙-吉黑造山带东段 (即吉黑造山带), 迄今仅发现吉林永吉县白石砬子碱性花岗岩体, 该岩体  $\epsilon_{Nd}(t)$  为正值, 其变化范围为  $2.4 \sim 2.1$ , 平均值为  $2.25$ 。与该造山带西段兴蒙地区的巴尔哲、碾子山两个碱性花岗岩体的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值 ( $1.88 \sim 2.72$ , 平均值  $2.34$ ) (王一先和赵振华, 1997; 李培忠和于津生, 1994) 基本一致, 说明兴蒙-吉黑造山带东西两段富碱侵入岩具有相似的  $\epsilon_{Nd}(t)$  特征。

大别-苏鲁造山带中所发现的富碱侵入岩的  $\epsilon_{Nd}(t)$  都为负值, 变化范围为  $-16.5 \sim -20.8$ , 8 个样品平均值为  $-17.06$ 。

华北克拉通富碱侵入岩的  $\epsilon_{Nd}(t)$  均为负值, 但变化范围

较大, 为  $-3.1 \sim -14.6$ , 15 个样品的平均值为  $-10.03$ 。

扬子克拉通富碱侵入岩的  $\epsilon_{Nd}(t)$  和华北克拉通富碱侵入岩一样也是负值, 但是变化范围较小, 介于  $-2.2 \sim -7.7$  之间, 7 个样品的平均值为  $-6.4$ 。

综上所述, 在四个大地构造单元中, 除兴蒙-吉黑造山带晚中生代富碱侵入岩的  $\epsilon_{Nd}(t)$  为正值外, 其它三个大地构造单元的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值均为负值。其中扬子克拉通平均值为  $-6.41$ , 华北克拉通平均值为  $-10.03$ , 大别-苏鲁造山带平均值为  $-17.06$ 。由此说明兴蒙-吉黑造山带富碱侵入岩的源区具亏损性, 其余三个大地构造单元富碱侵入岩的源区具富集性, 而且三者的富集程度差别很大, 大别-苏鲁造山带富集程度最高, 华北克拉通次之, 扬子克拉通富集程度最低。

##### 3.1.2 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 初始比值

兴蒙-吉黑造山带东段富碱侵入岩的  $^{143}Nd/^{144}Nd$  初始比值的变化范围为  $0.512708 \sim 0.512727$ , 平均值为  $0.512718$ ; 而西段巴尔哲、碾子山碱性岩体  $^{143}Nd/^{144}Nd$  初始比值的变化范围为  $0.512682 \sim 0.512761$ , 平均值  $0.512727$  (王一先等, 1997; 李培忠等, 1994)。东西两段富碱侵入岩的  $^{143}Nd/^{144}Nd$  初始比值基本一致。

大别-苏鲁造山带富碱侵入岩的  $^{143}Nd/^{144}Nd$  初始比值变化于  $0.511410 \sim 0.511686$  之间, 8 个样品平均值为  $0.511599$ 。

华北克拉通富碱侵入岩的  $^{143}Nd/^{144}Nd$  初始比值变化范围为  $0.511721 \sim 0.512292$ , 15 个样品的平均值为  $0.511958$ 。

扬子克拉通富碱侵入岩的  $^{143}Nd/^{144}Nd$  初始比值变化范围为  $0.512052 \sim 0.512358$ , 7 个样品的平均值为  $0.512159$ 。

从以上四个大地构造单元来看, 兴蒙-吉黑造山带晚中生代富碱侵入岩的  $^{143}Nd/^{144}Nd$  初始比值 (平均值  $0.512718$ ) 最高, 扬子克拉通的 (平均值  $0.512159$ ) 也较高, 两者均大于  $0.512000$ ; 而华北克拉通和大别-苏鲁造山带富碱侵入岩的  $^{143}Nd/^{144}Nd$  初始比值 (平均值分别为  $0.511958$  和  $0.511599$ ) 均低于  $0.512000$ 。

##### 3.1.3 Nd 同位素模式年龄 $t_{DM}$

Nd 同位素模式年龄  $t_{DM}$  是研究 Nd 同位素特征的重要参数。考虑到不同岩石的  $Sm/Nd$  分馏情况, 一般认为  $f_{Sm/Nd}$  值介于  $-0.5 \sim -0.2$  之间其模式年龄才具有地质意义 (吴福元等, 1997)。在郯庐断裂带所纵切的四个大地构造单元中, 仅兴蒙-吉黑造山带和扬子克拉通中富碱侵入岩的  $f_{Sm/Nd}$  值介于  $-0.5 \sim -0.2$  之间, 故其模式年龄具有地质意义; 而华北克拉通和大别-苏鲁造山带中绝大多数富碱侵入岩的  $f_{Sm/Nd}$  值都小于  $-0.5$ , 大多数  $t_{DM}$  没有地质意义。

#### 3.2 Sr 同位素特征

在岩石学研究中, 为了示踪岩浆源区的特征, 经常使用的 Sr 同位素特征参数主要有  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值  $I_{Sr}$ 。

表 2 郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩 Sm-Nd 同位素特征

Table 2 Sm-Nd isotopic data of late-Mesozoic alkaline-rich intrusions from the Tanlu Fault zone

| 大地构造单元   | 岩体名称   | 岩石类型   | 编号       | Sm × 10 <sup>-6</sup> | Nd × 10 <sup>-6</sup> | <sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd | <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd | 2σ | t (Ma) | f <sub>Sm/Nd</sub> | ε <sub>Nd</sub> (0) | ε <sub>Nd</sub> (t) | t <sub>DM</sub> (Ma) | I <sub>0</sub>      | 资料来源                       |
|----------|--------|--------|----------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----|--------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------------|
| 兴蒙-吉黑造山带 | 永吉白石砬子 | 碱性花岗岩  | 93221    | 13.83                 | 53.00                 | 0.1579                               | 0.512727                             | 13 | 123.0  | -0.20              | 1.7                 | 2.3                 | 1157                 | 0.512600            | 本文                         |
|          | 永吉白石砬子 | 碱性花岗岩  | Beishi-1 | 13.11                 | 50.89                 | 0.1557                               | 0.512708                             | 10 | 123.0  | -0.21              | 1.4                 | 2.0                 | 1162                 | 0.512583            | Wu <i>et al.</i> (2002)    |
| 华北克拉通    | 敦化二台店  | 碱性花岗岩  | 93212    | 4.43                  | 22.89                 | 0.1171                               | 0.512405                             | 12 | 146.9  | -0.40              | -4.5                | -3.1                | 1176                 | 0.512292            | 本文                         |
|          | 通化岗山   | 碱性花岗岩  | 96G      | 20.11                 | 142.64                | 0.0853                               | 0.512202                             | 7  | 113.0  | -0.57              | -8.5                | -6.9                | 1126                 | 0.512139            | 本文                         |
|          | 新宾纪家堡子 | 碱性花岗岩  | 93101I   | 4.34                  | 27.73                 | 0.0947                               | 0.511830                             | 11 | 99.0   | -0.52              | -15.8               | -14.5               | 1688                 | 0.511769            | 本文                         |
|          | 枣庄龙宝山  | 正长岩    | 10 个样    | 7.08 ~ 9.92           | 46.73 ~ 60.45         | 0.0916 ~ 0.0992                      | 0.510966 ~ 0.511805                  | 12 | 129.3  | -0.53 ~ -0.50      | -13.1 ~ -16.2       | -11.4 ~ -14.6       | 1477 ~ 1787          | 0.511889 ~ 0.511721 | Zhang <i>et al.</i> (2005) |
|          | 枣庄沙沟   | 黑云辉石岩  | ZH-2     | 44.81                 | 258.91                | 0.1046                               | 0.512050                             | 10 | 127.0  | -0.47              | -11.5               | -10.0               | 1535                 | 0.511963            | 本文                         |
|          | 枣庄沙沟   | 辉石正长岩  | ZH-4     | 15.49                 | 104.27                | 0.0898                               | 0.512019                             | 11 | 127.0  | -0.54              | -12.1               | -10.3               | 1391                 | 0.511944            | 本文                         |
|          | 莒南大山   | 二长岩    | 90-J9-1  | 10.16                 | 66.79                 | 0.0920                               | 0.511701                             | 18 | 128.6  | -0.53              | -18.3               | -16.6               | 1811                 | 0.511624            | 本文                         |
| 大别-苏鲁造山带 | 莒南大山   | 正长岩    | 90-J11-1 | 11.44                 | 74.57                 | 0.0903                               | 0.511676                             | 10 | 128.6  | -0.54              | -18.8               | -17.0               | 1817                 | 0.511600            | 本文                         |
|          | 五莲七宝山  | 辉石二长岩  | D-2      | 16.31                 | 115.48                | 0.0854                               | 0.511706                             | 14 | 126.0  | -0.57              | -18.2               | -16.4               | 1712                 | 0.511636            | 邱煌生等(1999)                 |
|          | 五莲七宝山  | 辉石二长岩  | Q-5      | 10.37                 | 78.24                 | 0.0801                               | 0.511742                             | 17 | 126.0  | -0.59              | -17.5               | -15.6               | 1604                 | 0.511676            | 邱煌生等(1999)                 |
|          | 定远瓦屋刘  | 石英二长岩  | WWL      | 2.935                 | 18.35                 | 0.0996                               | 0.511621                             | 6  | 127.9  | -0.49              | -19.8               | -18.3               | 2037                 | 0.511538            | 牛漫兰等(2002)                 |
|          | 金寨响洪甸  | 霞石正长岩  | S5-1     | 23.12                 | 154.9                 | 0.0902                               | 0.511760                             |    | 137.2  | -0.54              | -17.1               | -15.3               | 1713                 | 0.511679            | 周泰禧等(1995)                 |
|          | 金寨响洪甸  | 碱长正长岩  | S6-1     | 19.87                 | 133.4                 | 0.0900                               | 0.511700                             |    | 122.3  | -0.54              | -18.3               | -16.6               | 1783                 | 0.511628            | 周泰禧等(1995)                 |
|          | 桐城汤池   | 碱长正长岩  | A16      | 5.38                  | 38.07                 | 0.0854                               | 0.511480                             |    | 126.0  | -0.57              | -22.6               | -20.8               | 1979                 | 0.511410            | 周泰禧等(1995)                 |
|          | 庐枞石马滩  | 石英正长斑岩 | 010-1    | 6.712                 | 45.01                 | 0.0902                               | 0.512206                             |    | 129.6  | -0.54              | -8.4                | -6.7                | 1166                 | 0.512130            | 孙治东等(1991)                 |
|          | 庐枞石马滩  | 石英正长斑岩 | 008-5    | 7.989                 | 48.16                 | 0.1003                               | 0.512443                             |    | 129.6  | -0.49              | -3.8                | -2.2                | 952                  | 0.512358            | 孙治东等(1991)                 |
|          | 庐枞巴家滩  | 辉石二长岩  | B-44     | 7.80                  | 40.36                 | 0.1196                               | 0.512212                             |    | 150.1  | -0.39              | -8.3                | -6.8                | 1518                 | 0.512095            | 王德滋等(1996)                 |
| 扬子克拉通    | 庐枞巴家滩  | 黑云母二长岩 | B-58     | 5.61                  | 33.17                 | 0.1017                               | 0.512152                             |    | 150.1  | -0.48              | -9.5                | -7.7                | 1358                 | 0.512052            | 王德滋等(1996)                 |
|          | 庐枞大龙山  | 石英正长岩  |          |                       |                       |                                      | 0.512410                             |    | 135.9  |                    |                     | -6.8                |                      |                     | 翟建平(1999)                  |
|          | 庐枞黄梅尖  | 石英正长岩  |          |                       |                       |                                      | 0.512212                             |    | 133.1  |                    |                     | -7.7                |                      |                     | 翟建平(1999)                  |
|          | 庐枞城山   | 石英正长岩  |          |                       |                       |                                      | 0.511995                             |    | 137.4  |                    |                     | -9.0                |                      |                     | 翟建平(1999)                  |

表 3 郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩 Rb-Sr 同位素特征

Table 3 Rb-Sr isotopic data of late-Mesozoic alkaline-rich intrusions from the Tanlu Fault zone

| 大地构造单元   | 岩体名称   | 岩石类型      | 编号       | Rb × 10 <sup>-6</sup> | Sr × 10 <sup>-6</sup> | <sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr | <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr | 2σ      | t (Ma) | I <sub>Sr</sub> | ε <sub>Sr</sub> (t) | 资料来源                       |
|----------|--------|-----------|----------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------|--------|-----------------|---------------------|----------------------------|
| 兴蒙-吉黑造山带 | 永吉白石砬子 | 碱性花岗岩     | 93221    | 301.20                | 3.93                  | 231.1000                           | 1.09145                            | 15      | 123.0  | 0.6875          | -240.0              | 本文                         |
|          | 永吉白石砬子 | 碱性花岗岩     | Beishi-1 | 288.90                | 4.35                  | 198.2000                           | 1.02879                            | 50      | 123.0  | 0.6823          | -313.1              | Wu <i>et al.</i> (2002)    |
| 华北克拉通    | 敦化二台店  | 碱性花岗岩     | 93212    | 275.00                | 206.20                | 3.8280                             | 0.71959                            | 12      | 146.9  | 0.7116          | 103.0               | 本文                         |
|          | 通化岗山   | 碱性花岗岩     |          |                       |                       |                                    |                                    |         | 113.0  | 0.7089          |                     | 方文昌, 1992                  |
|          | 新宾纪家堡子 | 石英二长岩     | 9310J1   | 84.96                 | 676.70                | 0.3616                             | 0.70539                            | 14      | 99.0   | 0.7049          | 6.9                 | 本文                         |
|          | 枣庄龙宝山  | 正长岩       | 10 个样    | 47.89 ~ 157.00        | 345.0 ~ 2218          | 0.0653 ~ 1.3156                    | 0.70990 ~ 0.71030                  | 12 ~ 20 | 129.3  | 0.7079 ~ 0.7082 | 50.0 ~ 54.2         | Zhang <i>et al.</i> , 2005 |
|          | 枣庄沙沟   | 黑云辉石岩     | ZH-2     | 64.90                 | 1891.00               | 0.0993                             | 0.71006                            |         | 127.0  | 0.7099          | 78.3                | 本文                         |
|          | 枣庄沙沟   | 黑云辉石正长岩   | ZH-3     | 56.20                 | 5831.50               | 0.0279                             | 0.70998                            |         | 127.0  | 0.7099          | 79.1                | 本文                         |
|          | 枣庄沙沟   | 辉石正长岩     | ZH-4     | 40.60                 | 2899.00               | 0.0405                             | 0.70947                            |         | 127.0  | 0.7094          | 71.4                | 本文                         |
|          | 徽山县祁山  | 细、中粒霓辉正长岩 | 4 个样     | 157.85 ~ 78.94        | 170.46 ~ 4550.67      | 2.6800 ~ 0.0500                    | 0.71176 ~ 0.70780                  | 15 ~ 18 | 131.1  | 0.7064 ~ 0.7077 | 29.5 ~ 47.8         | 本文                         |
| 大别-苏鲁造山带 | 莒南大山   | 二长岩       | 90-J9-1  | 136.50                | 917.30                | 0.4267                             | 0.70947                            |         | 128.6  | 0.7087          | 61.4                | 本文                         |
|          | 莒南大山   | 正长岩       | 90-J11-1 | 139.60                | 1078.00               | 0.3722                             | 0.70937                            |         | 128.6  | 0.7087          | 61.4                | 本文                         |
|          | 五莲七宝山  | 辉石二长岩     | D-2      | 123.81                | 1451.03               | 0.246                              | 0.70964                            |         | 126.0  | 0.7092          | 68.7                | 邱检生等, 1999                 |
|          | 五莲七宝山  |           | Q-5      | 75.89                 | 2486.45               | 0.088                              | 0.70916                            |         | 126.0  | 0.7090          | 65.9                | 邱检生等, 1999                 |
|          | 定远瓦屋刘  | 石英二长岩     | WWL      | 139.30                | 571.00                | 0.7047                             | 0.70592                            | 12      | 127.9  | 0.7046          | 3.9                 | 牛漫兰等, 2002                 |
|          | 金寨响洪甸  | 霞石正长岩     | S5-1     | 260.10                | 477.50                | 1.577                              | 0.71188                            |         | 137.2  | 0.7088          | 63.2                | 周泰禧等, 1995                 |
|          | 金寨响洪甸  | 碱长正长岩     | S6-1     | 237.00                | 1326.00               | 0.517                              | 0.71034                            |         | 122.3  | 0.7094          | 72.0                | 周泰禧等, 1995                 |
|          | 桐城西汤池  | 碱长正长岩     | AI-6     | 154.90                | 211.90                | 2.116                              | 0.71237                            |         | 126.0  | 0.7086          | 59.9                | 周泰禧等, 1995                 |
| 扬子克拉通    | 庐枞石马滩  | 石英正长斑岩    | 010-1    | 360.70                | 162.90                | 6.410                              | 0.71791                            |         | 129.6  | 0.7061          | 24.7                | 孙治东等, 1991                 |
|          | 庐枞石马滩  | 正长斑岩      | 008-5    | 288.00                | 788.70                | 1.057                              | 0.70836                            |         | 129.6  | 0.7064          | 29.2                | 孙治东等, 1991                 |
|          | 庐枞巴家滩  | 辉石二长岩     | B-44     | 102.10                | 1137.00               | 0.2599                             | 0.70652                            |         | 150.1  | 0.7060          | 23.1                | 王德滋等, 1996                 |
|          | 庐枞巴家滩  | 黑云母二长岩    | B-58     | 159.10                | 1613.00               | 0.2852                             | 0.70656                            |         | 150.1  | 0.7060          | 22.9                | 王德滋等, 1996                 |
|          | 庐枞大龙山  | 似斑状黑云正长岩  | 1295     | 191.00                | 243.10                | 2.271                              | 0.71040                            |         | 135.9  | 0.7064          | 23.0                | 翟建平, 1999                  |
|          | 庐枞城山   | 石英正长斑岩    | 2005     | 200.70                | 172.00                | 3.378                              | 0.71410                            |         | 137.4  | 0.7076          | 23.1                | 翟建平, 1999                  |
|          | 庐枞黄梅尖  | 似斑状黑云正长岩  | 1069     | 163.30                | 742.40                | 0.625                              | 0.70810                            |         | 133.1  | 0.7078          | 23.3                | 翟建平, 1999                  |

表 4 郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩钾长石 Pb 同位素组成

Table 4 Pb isotopic data of K-feldspar in late-Mesozoic alkaline-rich intrusions from the Tanlu Fault zone

| 大地构造单元   | 岩体名称   | 岩石类型     | 编号       | <sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | 2σ    | <sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | 2σ    | <sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | 2σ    | 资料来源      |
|----------|--------|----------|----------|--------------------------------------|-------|--------------------------------------|-------|--------------------------------------|-------|-----------|
| 兴蒙-吉黑造山带 | 永吉白石砬子 | 碱性花岗岩    | 93221    | 18.539                               | 0.006 | 15.509                               | 0.005 | 38.228                               | 0.013 | 本文        |
| 华北克拉通    | 敦化二合店  | 碱性花岗岩    | 93212    | 16.458                               |       | 15.276                               |       | 36.958                               |       | 本文        |
|          | 通化岗山   | 碱性花岗岩    | LN002    | 17.356                               |       | 15.473                               |       | 37.703                               |       | 张理刚等,1995 |
|          | 通化岗山   | 碱性花岗岩    | 96G1     | 16.643                               | 0.009 | 15.327                               | 0.008 | 36.966                               | 0.019 | 本文        |
|          | 新宾纪家堡子 | 石英二长岩    | 9310J1   | 16.245                               | 0.009 | 15.139                               | 0.009 | 36.509                               | 0.020 | 本文        |
|          | 枣庄沙沟   | 黑云辉石正长岩  | ZH-3a    | 17.399                               |       | 15.540                               |       | 37.969                               |       | 本文        |
|          | 枣庄沙沟   | 辉石正长岩    | ZH-4     | 17.578                               |       | 15.534                               |       | 38.054                               |       | 本文        |
|          | 微山县鄱山  | 霓辉正长岩    | X-3      | 17.123                               | 0.002 | 15.297                               | 0.003 | 37.472                               | 0.006 | 本文        |
| 大别-苏鲁造山带 | 莒南大山   | 二长岩      | 90-J9-1  | 16.761                               |       | 15.354                               | 0.002 | 37.245                               | 0.010 | 本文        |
|          | 莒南大山   | 正长岩      | 90-J11-1 | 16.763                               |       | 15.336                               | 0.002 | 37.385                               | 0.004 | 本文        |
|          | 五莲七宝山  | 二长岩      | SD009    | 17.539                               |       | 15.539                               |       | 37.943                               |       | 张理刚等,1995 |
|          | 五莲七宝山  | 正长斑岩     | SD010    | 17.581                               |       | 15.555                               |       | 37.988                               |       | 张理刚等,1995 |
|          | 汞湾-鲍冲  | 石英二长岩    | G1       | 17.420                               |       | 15.450                               |       | 38.020                               |       | 周泰禧等,1995 |
|          | 金寨响洪甸  | 霞石正长岩    | S5-1     | 17.243                               |       | 15.423                               |       | 37.715                               |       | 周泰禧等,1995 |
|          | 金寨响洪甸  | 碱长正长岩    | S6-1     | 17.203                               |       | 15.494                               |       | 38.064                               |       | 周泰禧等,1995 |
|          | 桐城西汤池  | 碱长正长岩    | AI-6     | 16.990                               |       | 15.500                               |       | 37.710                               |       | 周泰禧等,1995 |
| 扬子克拉通    | 庐枞大龙山  | 似斑状黑云正长岩 | 1295     | 18.110                               |       | 15.492                               |       | 38.283                               |       | 章邦桐等,1988 |
|          | 庐枞大龙山  | 角闪石英正长岩  | 1030     | 18.016                               |       | 15.453                               |       | 38.151                               |       | 章邦桐等,1988 |
|          | 庐枞城山   | 石英正长斑岩   | 2005     | 18.019                               |       | 15.495                               |       | 38.317                               |       | 章邦桐等,1988 |
|          | 庐枞城山   | 石英正长岩    | 1059     | 17.952                               |       | 15.520                               |       | 38.096                               |       | 章邦桐等,1988 |
|          | 庐枞巴家滩  | 辉石二长岩    | B-44     | 18.151                               |       | 15.559                               |       | 38.196                               |       | 杨荣勇等,1993 |
|          | 庐枞巴家滩  | 黑云母二长岩   | B-58     | 18.020                               |       | 15.529                               |       | 38.070                               |       | 杨荣勇等,1993 |

现代大洋玄武岩的  $I_{Sr}$  为 0.702 ~ 0.707, 通常被认为是未遭受地壳硅铝物质混染的岩石, 代表岩浆岩来自于上地幔源区; 现代大陆硅铝质岩的  $I_{Sr}$  平均值为 0.719, 故  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值  $I_{Sr}$  在 0.706 ~ 0.719 之间的花岗岩的岩浆应主要是壳源的, 但受到幔源物质的混染。以此为据, 可以有效地区分岩浆物质来源。

兴蒙-吉黑造山带东段富碱侵入岩的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值  $I_{Sr}$  的变化范围为 0.6480 ~ 0.6823, 平均值为 0.6652; 西段的巴尔哲、碾子山富碱侵入岩体的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值  $I_{Sr}$  变化范围 0.6951 ~ 0.7040、平均值 0.6990 基本一致, 由此表明整个兴蒙-吉黑造山带富碱侵入岩的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值都比较低。

大别-苏鲁造山带富碱侵入岩的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值  $I_{Sr}$  变化范围为 0.7046 ~ 0.7094, 12 个样品平均值为 0.7081。

华北克拉通富碱侵入岩的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值  $I_{Sr}$  变化范围较大, 为 0.7048 ~ 0.7116, 19 个样品的平均值为 0.7088。

扬子克拉通富碱侵入岩的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始比值  $I_{Sr}$  介于 0.7060 ~ 0.7078, 7 个样品的平均值为 0.7066。

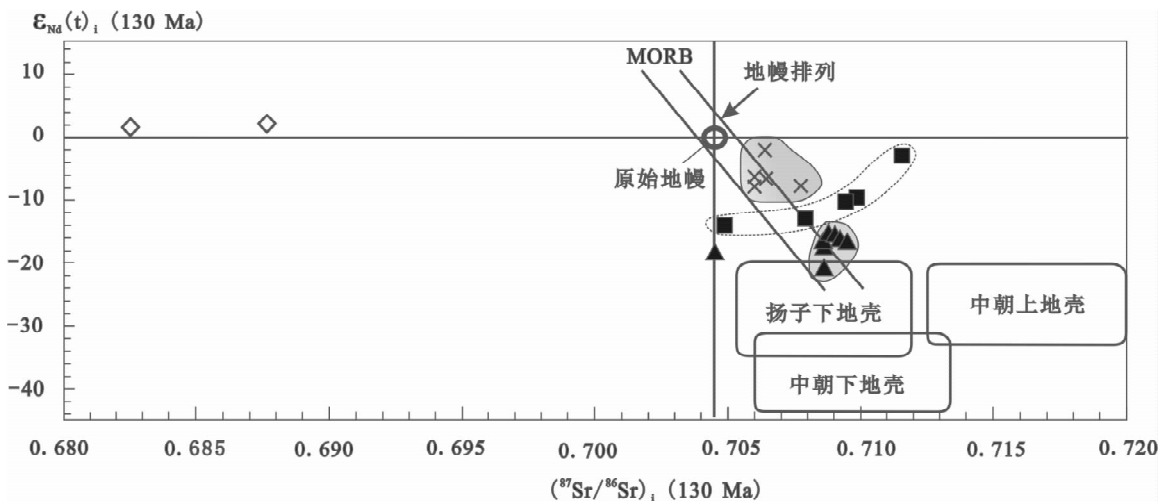
总的来看, 兴蒙-吉黑造山带富碱侵入岩的  $^{87}Sr/^{86}Sr$  初始值  $I_{Sr}$  最低 (平均值 0.6652), 其次为扬子克拉通的 (平均值为 0.7066), 华北克拉通和大别-苏鲁造山带中的富碱侵入岩的  $I_{Sr}$  值较为接近, 平均值分别为 0.7088 和 0.7081。

3.3 Pb 同位素特征

兴蒙-吉黑造山带东段富碱侵入岩钾长石的  $^{206}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{208}Pb/^{204}Pb$  比值分别为 18.539、15.51 和 38.228, 与其西段巴尔哲、碾子山富碱侵入岩体的一致。

大别-苏鲁造山带富碱侵入岩中钾长石的  $^{206}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 、 $^{208}Pb/^{204}Pb$  比值的变化范围分别为 16.761 ~ 17.581、15.336 ~ 15.555 和 37.245 ~ 38.064。8 个样品平均值分别为 17.188、15.456 和 37.759。

华北克拉通富碱侵入岩中钾长石的  $^{206}Pb/^{204}Pb$  = 16.245 ~ 17.578、 $^{207}Pb/^{204}Pb$  = 15.139 ~ 15.539、 $^{208}Pb/^{204}Pb$  = 36.509 ~ 38.054, 7 个样品的平均值分别为 16.972、15.369 和 37.376。



图例: × 扬子克拉通 ■ 华北克拉通 ▲ 大别-苏鲁造山带 ◇ 吉黑造山带

图4 郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)_i - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  图解(扬子下地壳、中朝下地壳和中朝上地壳据 Jahn *et al.*, 1999)

Fig. 4  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)_i - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  correlation diagram of late-Mesozoic alkaline-rich intrusions from the Tanlu Fault zone

扬子克拉通富碱侵入岩中钾长石的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.952 \sim 18.151$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.453 \sim 15.559$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.070 \sim 38.317$ , 6个样品的平均值分别为18.045、15.508和38.186。

由此可见,在四个大地构造单元中,兴蒙-吉黑造山带和扬子克拉通富碱侵入岩中钾长石的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 平均值相对都较高,而华北克拉通和大别-苏鲁造山带中却都相对较低。

## 4 郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩的物质来源探讨

一般认为,岩浆一般都能继承源岩的同位素成分,在岩浆形成过程中高温下同位素均达到了平衡,并且在岩浆形成后封闭体系内发生分异作用过程中仍然保持不变。所以,通过岩浆岩可以了解地球深部同位素特征。

### 4.1 Nd、Sr 同位素对物源的制约

地球不同源区 Nd、Sr 同位素组成的差异性示踪物质来源的基础(Depaolo, 1988; Fauge, 2001)。Nd、Sr 同位素联合体系对于物质源区示踪和进一步判别壳源混染作用也很有效(Rollison, 2000)。

郯庐断裂带所纵切的华北克拉通、扬子克拉通、兴蒙-吉黑造山带和大别-苏鲁造山带四个大地构造单元中,晚中生代富碱侵入岩的 Nd、Sr 同位素差异性在  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)_i - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  图解(图4)中表现得非常明显,除吉黑造山带位于亏损地幔区外,其它三个大地构造单元中富碱侵入岩大多

数投点都落在靠近富集地幔演化线附近,暗示这三大构造单元中富碱侵入岩也主要源于富集岩石圈地幔。

吉黑造山带晚中生代碱性花岗岩的投点在  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)_i - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  图解(图4)中落在了第二象限中,表明其岩浆来源与亏损地幔储库关系密切。但是一般认为由亏损地幔部分熔融直接生成酸性岩浆的可能性极小(Green, 1980; Martin, 1997),同时在  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)_i - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  图解(图4)上其投点有偏离亏损地幔演化线端员,所以推测该造山带中富碱侵入岩可能不是直接来源于亏损地幔,而可能是源于与亏损地幔有成因关系的年轻地壳。

华北克拉通晚中生代富碱侵入岩在图4中的投点多数落在了富集地幔附近,但部分投点的离散度较大,表明华北克拉通晚中生代富碱侵入岩也主要源于富集地幔,推测其投点离散度大的原因可能与华北克拉通岩石圈地幔的不均一性有关(蔡剑辉等,2004; 张宏福等,2005),或者是受地壳混染程度不同的影响。

扬子克拉通晚中生代富碱侵入岩在图4上的投影点落在富集地幔演化线的上端,距原始地幔较近而距扬子克拉通下地壳投影区较远,这暗示该区富碱侵入岩的源区为富集程度较低的岩石圈地幔,而且岩浆在上升途中受扬子下地壳混染也较少。特别值得提出的是,Chen *et al.* (2001)近年来对扬子克拉通的长江中下游广大地区中生代基性岩的 Nd、Sr 同位素研究,得出该区基性岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -5.2 \sim -7.7$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7069 \sim 0.7071$ ,故认为该区基性岩源于类似于 EM I 型富集地幔。而扬子克拉通晚中生代富碱侵入岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -2.2 \sim -7.7$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.706 \sim 0.7078$ ,除  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值略为偏高外,与该区基性岩的 Nd、Sr 同位素特征基本一致。这进一步说明扬子克拉通晚中生代富碱侵入岩主

要也是源于 EMI 型富集地幔,但可能受了少量扬子下地壳的混染。

在图 4 上,大别-苏鲁造山带晚中生代富碱侵入岩投影点落在了华北克拉通富碱侵入岩投影区与扬子克拉通下地壳投影区之间的富集地幔演化线附近而距扬子克拉通富碱侵入岩投影区较远,说明大别-苏鲁造山带富碱侵入岩主要与华北克拉通岩石圈富集地幔有关,同时又受到扬子克拉通下地壳的重要影响,而可能与富集程度较低的扬子克拉通岩石圈地幔关系不大。

至于大别-苏鲁造山带岩石圈地幔富集程度高的原因和形成机制,还需追溯到大别-苏鲁造山带的形成过程。大别-苏鲁造山带是在早中生代扬子克拉通向华北克拉通深俯冲-碰撞而形成的高压-超高压变质的陆-陆碰撞造山带,随后折返并发生退变质作用(刘福来等,2003),这已为国内外广大地质学者所认同。然而,在俯冲-碰撞和随后的折返过程中怎样造成大别-苏鲁造山带岩石圈地幔富集的机制还存在不同的认识。概括起来大致可分混合论和交代论两种观点。前者认为扬子克拉通陆壳在俯冲过程中与华北克拉通岩石圈地幔的混合是造成大别-苏鲁造山带岩石圈地幔高度富集的主要原因(Wang *et al.*, 2005);后者又分流体交代和熔体交代两种不同的看法,李曙光等(1998)强调俯冲陆壳在超高压变质过程中可以析出具有高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、低 $\epsilon_{\text{Nd}}$ 特征的流体,交代上部楔形地幔,较容易形成具有非常低的 $\epsilon_{\text{Nd}}$ 值的富集地幔。Zhang *et al.* (2002)和郭锋等(2005)则认为深俯冲陆壳在俯冲或折返过程中发生部分熔融作用形成的熔体与地幔反应是形成大别-苏鲁造山带富集岩石圈地幔的重要机制。周新华等(2005)认为可能的机制为扬子板块深俯冲中析出的熔/流体交代并改造了上覆地幔。在以上几种代表性看法中,究竟哪一种更符合实际情况,还有待于进一步探讨。特别值得注意的是,Zheng *et al.* (2003)对大别-苏鲁高压-超高压变质岩的 C-O 同位素研究显示在陆壳俯冲过程中缺乏流体活动,因此认为流体交代作用对于大别-苏鲁地区富集岩石圈地幔的形成贡献很小。虽然 Zheng *et al.* (2003)只是强调了陆壳俯冲过程中高压-超高压环境中缺乏流体活动,但同时也指出在超高压板片折返过程中由于压力突然降低含水的各种矿物会发生分解或羟基出溶。本文作者认为,扬子克拉通陆壳在深俯冲之后,特别是在折返过程中因压力释放有利于熔/流体的形成、析出和上升交代并改造上覆的华北克拉通岩石圈地幔,使之成为富集地幔。华北克拉通南、北边缘的早中生代富碱侵入岩带都是在周边板块对华北克拉通俯冲-碰撞之后转变为拉张构造环境时形成的(阎国翰等,2002)。因此,本文认为折返过程中陆壳熔/流体的析出交代可能是造成大别-苏鲁造山带岩石圈地幔预富集的主要原因。

#### 4.2 Pb 同位素对物源的制约

钾长石铅同位素比值可以代表岩石的初始值,反映了源

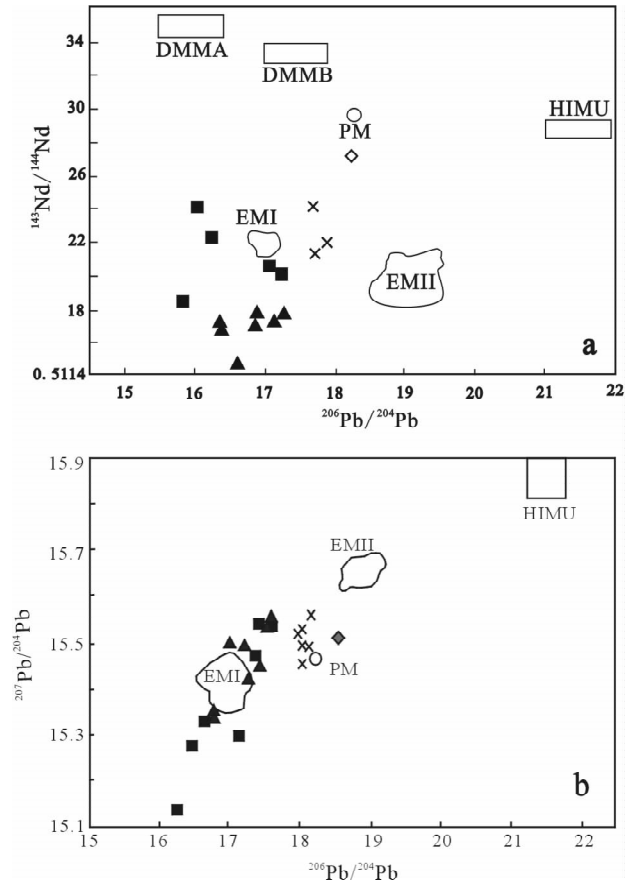


图 5 郯庐断裂带晚中生代富碱侵入岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  -  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (a) 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  -  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (b) 图解 (DMM、EM I、EM II、HIMU 和原始地幔为 Hart (1984) 和 Zindler and Hart (1986) 定义的地幔端元,图例同图 4)

Fig. 5  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  -  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  -  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  correlation diagrams of late-Mesozoic alkaline-rich intrusions from the Tanlu Fault zone

区的 U/Pb、Th/Pb 比值特征,对岩浆的起源示踪是行之有效的手段(李昌年,1992; 陈江峰等,1999)。

在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  -  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解上(图 5b),华北克拉通和大别-苏鲁造山带富碱侵入岩钾长石的 Pb 同位素投点都落在了 EM I 型富集地幔附近,暗示着两个大地构造单元中富碱侵入岩的源区性质和 EM I 型富集地幔相似。而扬子克拉通和吉黑造山带两大构造单元中晚中生代富碱侵入岩的钾长石 Pb 同位素的投点在图 5b 上落在了原始地幔附近,说明扬子克拉通和吉黑造山带晚中生代富碱侵入岩钾长石的源区性质和原始地幔更接近。

#### 4.3 Nd、Pb 同位素对物源的联合制约

郯庐断裂带所纵切的四个大地构造单元中晚中生代富碱侵入岩的 Nd、Pb 同位素特点在 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  -  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  图解上(图 5a)表现得很清楚。华北克拉通、扬子克拉通和大

别-苏鲁造山带三大构造单元晚中生代富碱侵入岩的投影点主要落在了 EM I 型富集地幔端元附近, 这表明其源区性质与 EM I 型富集地幔接近; 吉黑造山带晚中生代富碱侵入岩在图 5a 上其投影点落于原始地幔附近, 表明其源区性质接近于原始地幔的弱亏损性地幔。这与前述的关于 Nd、Sr 同位素的讨论结果基本一致。

## 5 结论

通过以上讨论可以得出以下几点结论:

(1) 兴蒙-吉黑造山带晚中生代富碱侵入岩 ( $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  均值为 2.25), 可能源于和原始地幔较接近的弱亏损地幔有成因关系的年青地壳。

(2) 华北克拉通、扬子克拉通和大别-苏鲁造山带三大构造单元晚中生代富碱侵入岩 ( $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  均为负值) 都源于 EM I 型富集地幔, 但三大构造单元岩石圈地幔富集程度又有很大的差别: 大别-苏鲁造山带岩石圈地幔富集程度最高 ( $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 -17.06), 华北克拉通次之 ( $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 -10.03), 扬子克拉通岩石圈地幔富集程度最低 ( $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为 -6.41)。

(3) 大别-苏鲁造山带岩石圈地幔富集程度之所以最高, 可能与在早中生代扬子克拉通陆壳向华北克拉通深俯冲之后的折返过程中, 因压力释放而导致的熔-流体形成、析出和向上交代华北克拉通岩石圈地幔有关。

## References

- Brown GC. 1982. Calcalkaline intrusive rocks: Their diversity, evolution and relation to volcanic arcs. In: Thorpe RS (ed). *Andersites*. Hoboken: John Wiley and Sons, 437–461
- Cai JH, Yan GH, Xiao CD *et al.* 2004. Nd, Sr and Pb isotopic characteristics of the Mesozoic intrusive rocks in the Taihang-Da Hinggan Mountains Tectonomagmatic Belt and their source region. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1225–1242 (in Chinese with English abstract)
- Chen JF and Jahn BM. 1999. Nd, Sr, Pb isotope tracer and continental crust evolution of Southeastern China. In: Zheng YF (ed). *Chemical Geodynamics*. Beijing: Science Press, 262–287 (in Chinese).
- Chen JF, Yan J, Xie Z, Xu X and Xing F. 2001. Nd and Sr isotopic compositions of igneous rocks from the lower Yangtze region in eastern China: Constrains on sources. *Phys. Chem. Earth (A)*, 26: 719–731
- Depaolo DJ. 1988. *Neodymium isotope geochemistry and introduction*. New York: Springer
- Fang WC. 1992. Granitoids from Jinlin Province and their metallogenesis. *Science and Technology Press of Jilin*, 28–29. (in Chinese with English abstract)
- Faure G. 2001. *Origin of igneous rocks*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York: Springer
- Green TH. 1980. Island arc and continent-building magmatism: In review of petrogenetic models based on experimental petrology and geochemistry. *Tectonophysics*, 67: 367–385
- Guo F, Fan WM, Wang YJ *et al.* 2005. Geochemistry of late Mesozoic mafic rocks from the Dabie-Sulu region, China: Constraints on the nature of lithospheric mantle beneath the orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1265–1270. (in Chinese with English abstract)
- Hart SR. 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle. *Nature*, 309: 753–757
- Jahn BM, Wu FY, Luo CH and Tsai LH. 1999. Crust mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic ultramafic intrusions of northern Dabie complex, central China. *Chemical Geology*, 157: 119–146
- Li CN. 1992. *Microelemental petrology of igneous rocks*. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 147–154
- Li PZ and Yu JS. 1994. Isotope geochemistry of Nianzishan miarolitic alkaline granite in Heilongjiang Province. In: Chen HS (ed). *Isotope Geochemistry*. Hangzhou: Press of Zhejiang University: 269–286 (in Chinese)
- Li SG, Nie YH and Hart SR. 1998. Subducted continental crust and upper mantle interaction (II): Sr and Nd isotope geochemistry of post-collisional mafic-ultramafic rocks from Dabieshan. *Science in China (Series D)*, 28: 18–22. (in Chinese)
- Liu FL, Xu ZQ, Song B. 2003. Determination of UHP and retrograde metamorphic ages of the Sulu terrane: Evidence from SHRIMP U-Pb dating on Zircon of gneissic rocks. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 229–237 (in Chinese with English abstract)
- Lin JQ, Tan DJ, Chi XG *et al.* 1992. *Mesozoic granites in Jiao-Liao Peninsula*. Beijing: Science Press, 17–23 (in Chinese with English abstract)
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46: 411–429
- Niu ML, Zhu G, Liu GS *et al.* 2002. Tectonic setting and deep processes of Mesozoic magmatism in middle-south segment of the Tan-Lu Fault. *Geological Science*, 37(4): 393–404. (in Chinese with English abstract)
- Qiao GS. 1988. Normalization of isotopic dilution analysis. *Scientia Sinica Series A*, 31(10): 1263–1268
- Qiu JX. 1993. *The alkaline rocks in Qin-Bashan area*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Qiu JS and Wang DZ. 1999. Geochemistry of pyroxene-monzonite from Qibaoshan goldcuprid in Wulian County, Shandong Province and its nature of source region. *Geological Review*, 45(supl.): 612–617 (in Chinese with English abstract)
- Rollison HR. 2000. *Using Geochemistry data: Evaluation, presentation, interpretation* (Translated by Yang XM *et al.*). Hefei: University of science and technology of China Press, 179–205
- Sun YD, Liu XS and Chu L M. 1991. Stable isotopes of syenitoid in the Luzong basin, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 3: 95–97 (in Chinese with English abstract)
- Tan YC, Sun YY, Ji HH *et al.* 1975. Description of geological map from Yingpan of 1:200000 regional geology
- Tu GC. 1989. About the alkali-rich intrusive rocks. *Journal of Mineral and Geology (China)*, 13(3): 1–4 (in Chinese).
- Tu GC, Zhang YQ and Zhao ZH. 1984. The preliminary study on two alkali rich intrusive rocks zones. In Xu KQ and Tu GC (ed). *Granite geology and mineralization: International symposium on granites*. Nanjing: Science and Technology Publishing House of Jiangsu: 21–37 (in Chinese)
- Wan TF, Zhu H, Zhao L *et al.* 1996. A summary of formation and evolution of Tan-Lu Fault Zone. *Geoscience*, 10(2): 159–168 (in Chinese with English abstract)
- Wang DZ, Ren QJ, Qiu JS, Chen KR, Xu ZW and Zen JH. 1996. Characteristics of volcanic rocks from shoshonite province in eastern China and its mineralization. *Acta Geologica Sinica*, 70(1): 23–34 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ, Fan WM, Peng TP *et al.* 2005. Nature of the Mesozoic

- lithospheric mantle and tectonic decoupling beneath the Dabie Orogen, Central China: Evidence from 40/88/39/88 geochronology, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of early Cretaceous mafic rocks, *Chem. Geol.*, 220: 165 – 189
- Wang YX and Zhao ZH. 1997. Geochemistry and origin of the Baerzhe REE-Nb-Be-Zr superlarge deposit. *Geochemica*, 26 (1): 24 – 34 (in Chinese with English abstract)
- Wright JB. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic genesis. *Geol. Mag.*, 101: 370 – 384
- Wu FY, Jahn BM and Lin Q. 1997. Isotopic characteristics of the post-orogenic granite in orogenic belt of Northern China and their implications for crustal growth. *Chinese Sciences Bulletin*, 42 (20): 2188 – 2192. (in Chinese)
- Wu FY, Lin JQ, Wild SA *et al.* 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in Eastern China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 233: 103 – 119
- Wu FY, Sun DY, Li H *et al.* 2002. A-type granites in Northeastern China: Age and geochemical constrains on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187: 143 – 173
- Xu JW and Ma GF. 1992. 10-year review of research on Tan-Lu Fault Zone. *Geological Review*, 38 (4): 316 – 324 (in Chinese with English abstract)
- Yan GH, Mu BL, Xu BL *et al.* 2002. Phanerozoic alkali-rich intrusive rocks in North China: chronology and Nd-Sr-Pb isotope characteristics. *Geological Review*, 48 (sup.): 69 – 76 (in Chinese with English abstract)
- Yan GH, Mu BL and Zeng YS. 1989. Spatial distribution of alkaline and meta-alkaline intrusive rocks from North China and their tectonic significance. *The Bulletin of Shenyang Institute of Geology and Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Science*, 19: 93 – 100 (in Chinese with English abstract)
- Yang RY, Ren QJ, Xu ZW *et al.* 1993. The magmatic sources of volcanic-intrusive complex from Bajiatan, in the Luzong basin, Anhui Province. *Geochimica*, 2: 197 – 206. (in Chinese with English abstract)
- Yang ZM, Xin Y L and Qiao GH. 2002. The tectonic setting of the alkali granite of the Erhedian area (Hanconggou succession), Dunhua City and its geologic features. *Jilin Geology*, 21 (1-2): 8 – 14 (in Chinese with English abstract)
- Yang ZL, Shen WZ and Tao KY. 1999. Chronology of Mesozoic volcanic-intrusive rocks from Northern Huaiyang. *Geological Review*, 45 (sup.): 674 – 680 (in Chinese with English abstract)
- Zai JP, Xu GP, Zhang BT *et al.* 1999. Discussion on the identical source of the volcanic rocks and meta-alkaline quartz syenite zone from the Luzong basin and their genesis. *Geological Review*, 45 (sup.): 707 – 711 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BT, Zhang FS, Ni QS *et al.* 1988. Study on geological and geochemical characteristics of the quartz-syenite zone from the Luzong basin, Anhui Province and its genesis. *Acta Petrologica Sinica*, (3): 1 – 14 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Sun XM and Zhou XH. 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China: Evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 144: 241 – 253
- Zhang HF, Sun XM, Zhou XH *et al.* 2005. Geochemical constraints on the origin of Mesozoic alkaline intrusive complexes from the North China Craton and tectonic implications. *Lithos*, 81: 297 – 317
- Zhang HF, Zhou XH, Fan WM *et al.* 2005. Nature, composition, enrichment processes and its mechanism of the Mesozoic lithospheric mantle beneath the southeastern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (4): 1271 – 1280 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LG *et al.* 1995. Block-geology of Eastern Asia lithosphere. Beijing: Science Press. (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Xiong XL, Wang Q *et al.* 2003. Alkali-rich igneous rocks and related Au and Cu large and superlarge deposits in China. *Science in China (Series D)*, 46 (sup.): 1 – 13 (in Chinese)
- Zheng YF, Fu B and Gong B. 2003. Stable isotope geochemistry of ultra-high pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Sci. Rev.*, 62: 105 – 160
- Zhou JB, Zheng YF and Zhao ZF. 2003. Zircon U-Pb dating on Mesozoic granitoids at Wulian, Shangdong Province. *Geological Journal of China Universities*, 9 (2): 185 – 194 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TX, Chen JF, Zhang X *et al.* 1995. Geochemistry of granite-syenite zone from Northern Huaiyang and its tectonic significance. *Geological Review*, 41 (2): 144 – 151 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XH, Zhang HF, Ying JF *et al.* 2005. Geochemical records of subsequent effects of continental deep subduction: Discussion of mantle source variations of the Mesozoic lithospheric mantle of the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (4): 1255 – 1263. (in Chinese with English abstract)
- Zhu G, Wang DX, Liu GS *et al.* 2004. Evolution of the Tan-Lu Fault Zone and its responses to plate movements in West Pacific Basin. *Geological Science*, 39 (1): 36 – 49. (in Chinese with English abstract)
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14: 493 – 571

## 附中文参考文献

- 蔡剑辉, 阎国翰, 肖成东等. 2004. 太行山-大兴安岭构造岩浆带中生代侵入岩 Nd、Sr、Pb 同位素特征及物质来源探讨. *岩石学报*, 20 (5): 1225 – 1242
- 陈江峰, 江博明. 1999. 铍锆铅同位素示踪和中国东南大陆地壳演化. 见: 郑永飞主编. *化学地球动力学*. 北京: 科学出版社, 262 – 287
- 方文昌. 1992. 吉林省花岗岩类及成矿作用. 长春: 吉林科学技术出版社, 28 – 29
- 郭锋, 范蔚茗, 王岳军等. 2005. 大别-苏鲁地区晚中生代镁铁质岩地球化学对造山带岩石圈地幔性质的约束. *岩石学报*, 21 (4): 1265 – 1270
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 147 – 154
- 李培忠, 于津生. 1994. 碾子山晶洞碱性花岗岩同位素地球化学. 见: 陈好寿主编. *同位素地球化学研究*. 杭州: 浙江大学出版社, 269 – 286
- 李曙光, 聂永红, Hart SR. 1998. 俯冲陆壳与上地幔相互作用 (II): 大别山碰撞后镁铁-超镁铁岩的 Sr、Nd 同位素地球化学. *中国科学(D)*, 28: 18 – 22
- 林景任, 谭东娟, 迟效国等. 1992. 胶辽半岛中生代花岗岩. 北京: 科学出版社: 17 – 23
- 刘福来, 许志琴, 宋彪. 2003. 苏鲁地体超高压和退变质时代的厘定: 来自片麻岩锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年的证据. *地质学报*, 77 (2): 229 – 237
- 牛漫兰, 朱光, 刘国生, 王道轩, 宋传中. 2002. 郯庐断裂带中-南段中生代岩浆活动的构造背景与深部过程. *地质科学*, 37 (4): 393 – 404

- 邱家骧. 1993. 秦巴碱性岩. 北京: 地质出版社, 1-137
- 邱检生, 王德滋. 1999. 山东五莲七宝山辉石二长岩的地球化学及岩浆源区性质. 地质论评, 45(增刊): 612-617
- 孙治东, 刘孝善, 褚立明. 1991. 安徽庐枞地区正长岩类稳定同位素研究. 岩石学报, (3): 95-97
- 谭运昌, 孙玉仪, 计惠海等. 1975. 营盘幅 1/20 万区域地质图说明书
- 涂光炽. 1989. 关于富碱侵入岩. 地质与矿产, 3(13): 1-16
- 涂光炽, 张玉泉, 赵振华. 1984. 华南两个富碱侵入岩带的初步研究. 见: 徐克勤, 涂光炽主编. 花岗岩地质和成矿关系. 南京: 江苏科技出版社, 21-37
- 万天丰, 朱鸿, 赵磊等. 1996. 郯庐断裂带的形成和演化: 综述. 现代地质, 10(2): 159-168
- 王德滋, 任启江, 邱检生等. 1996. 中国东部橄榄安粗岩省的火山岩特征及其成矿作用. 地质学报, 70(1): 23-33
- 王一先, 赵振华. 1997. 巴尔哲超大型稀土铌钽矿床地球化学和成因. 地球化学, 26(1): 24-34
- 吴福元, 江博明, 林强. 1997. 中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与壳生长意义. 科学通报, 42(20): 2188-2192
- 徐嘉炜, 马国峰. 1992. 郯庐断裂带研究的十年回顾. 地质论评, 38(4): 316-324
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良等. 2002. 中国北方显生宙富碱侵入岩年代学和 Nd, Sr, Pb 同位素特征. 地质论评, 48(增刊): 69-76
- 阎国翰, 牟保磊, 曾贻善. 1989. 中国北方碱性和偏碱性侵入岩的时空分布及大地构造意义. 中国地质科学院沈阳地质研究所所刊, 19: 93-100
- 杨荣勇, 任启江, 徐兆文等. 1993. 安徽庐枞地区巴家滩火山-侵入岩体的岩浆来源. 地球化学, 2: 197-206
- 杨志猛, 辛玉莲, 乔国华. 2002. 敦化市二合店一带(寒葱沟序列)碱性花岗岩形成构造环境及地质特征. 吉林地质, 21(1-2): 8-14
- 杨祝良, 沈渭洲, 陶奎元. 1999. 北淮阳中生代火山-侵入岩同位素年代学研究. 地质论评, 45(增刊): 674-680
- 翟建平, 徐光平, 章邦桐, 胡凯. 1999. 庐枞火山岩系与偏碱性石英正长岩带的同源特征及成因探讨. 地质论评, 45(增刊): 707-711
- 章邦桐, 张富生, 倪琦生等. 1988. 安庐石英正长岩带的地质与地球化学特征及成因探讨. 岩石学报, 3: 1-14
- 张宏福, 周新华, 范蔚茗等. 2005. 华北东南部中生代岩石圈地幔性质、组成、富集过程及其形成机理. 岩石学报, 21(4): 1271-1280
- 张理刚等. 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及其动力学. 北京: 科学出版社, 19-73
- 赵振华, 熊小林, 王强等. 2002. 我国富碱火成岩及有关的大型-超大型金铜矿床成矿作用. 中国科学(D 辑), 46(增刊): 1-13
- 周建波, 郑永飞, 赵子福. 2003. 山东五莲中生代岩浆岩的锆石 U-Pb 年龄. 高校地质学报, 9(2): 185-194
- 周泰禧, 陈江峰, 张巽, 李学明. 1995. 北淮阳花岗岩-正长岩带地球化学特征及其大地构造意义. 地质论评, 41(2): 144-151
- 周新华, 张宏福, 英基丰, 陈高辉. 2005. 大陆深俯冲后效应作用的地球化学记录——华北中生代岩石圈地幔源区特征变异讨论. 岩石学报, 21(4): 1255-1263
- 朱光, 王道轩, 刘国生, 牛漫兰, 宋传中. 2004. 郯庐断裂带的演化及其对西太平洋板块运动的响应. 地质科学, 39(1): 36-49