

# 辽宁盖县梁屯-矿洞沟碱性正长岩杂岩体的 U-Pb 和 Sm-Nd 年龄及其地质意义\*

蔡剑辉<sup>1,2</sup> 阎国翰<sup>1</sup> 牟保磊<sup>1</sup> 许保良<sup>1</sup> 邵宏翔<sup>1</sup> 许荣华<sup>3</sup>

CAI JianHui<sup>1,2</sup>, YAN GuoHan<sup>1</sup>, MU BaoLei<sup>1</sup>, XU BaoLiang<sup>1</sup>, SHAO HongXiang<sup>1</sup> and XU RongHua<sup>3</sup>

1. 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. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. Faculty of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2001-10-18 收稿, 2002-03-20 改回.

Cai JH, Yan GH, Mu BL, Xu BL, Shao HX and Xu RH. 2002. U-Pb and Sm-Nd isotopic ages of an alkaline syenite complex body in Liangtun-Kuangdongguo, Gai County, Liaoning Province, China and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3):349–354

**Abstract** The complex body in Liangtun-Kuangdongguo, Liaoning Province, China, mainly consists of alkaline rocks such as pyroxene syenite, aegirite-augite syenite and aegirite-augite-hornblende syenite. According to the previous whole rock Rb-Sr isochron age data of  $1866 \pm 115\text{Ma}$  with  $I_{\text{Sr}} = 0.7049$ , it is the oldest alkaline syenite reported in China up to now. The data of Zircon U-Pb and whole rock Sm-Nd data reported in this paper show that the complex body has a U-Pb isotopic age of  $1857 \pm 20\text{Ma}$ , and a whole rock Sm-Nd isochron age of  $1787 \pm 180\text{Ma}$ , with a  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  value between  $-4.8$  and  $-5.0$ . This means that the complex originated from enriched mantle material, with the upper limit age of  $1857 \pm 20\text{Ma}$ . So the authors suggest that during early Proterozoic era an enriched mantle reservoir existed in the North China platform, and the main part of the Liaohe Group was formed before 1900Ma.

**Key words** Eastern Liaoning, Alkaline syenite, Zircon U-Pb isotopic age, Whole rock Sm-Nd isochron age

**摘要** 辽宁梁屯-矿洞沟杂岩体主要由辉石正长岩、霓辉正长岩和霓辉角闪正长岩等碱性岩石组成, 具有全岩 Rb-Sr 等时线年龄  $1866 \pm 115\text{Ma}$  和  $I_{\text{Sr}} = 0.7049$  的同位素特征, 是我国目前报道的最古老的碱性正长岩类。本文报道了该岩体的锆石 U-Pb 和全岩 Sm-Nd 同位素测试资料, 获得了锆石 U-Pb 同位素年龄为  $1857 \pm 20\text{Ma}$ 、Sm-Nd 等时年龄为  $1787 \pm 180\text{Ma}$ 、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -4.8 \sim -5.0$  的数据。它们反映出该杂岩体形成年龄的上限为  $1857 \pm 20\text{Ma}$ 、下限不小于  $1787 \pm 180\text{Ma}$ , 来源于富集地幔物质。基于这些数据并结合区域地质资料分析, 作者提出了华北地台北缘古元古宙存在有富集地幔储库, 以及辽河群主体形成于 1900Ma 以前的认识。

**关键词** 辽东; 碱性正长岩; 锆石 U-Pb 年龄; 全岩 Sm-Nd 等时线年龄

中图法分类号 P588.12

地球上最古老的碱性正长岩类出现于古元古宙时期, 2020Ma 的南非 Pilanesberg 杂岩体 (Mathias M, 1974) 和 1740Ma ~ 1950Ma 的乌克兰 Octjabr 杂岩体 (Sorensen H, 1974) 是这类岩石的代表。我国 1998 年报道了辽宁盖县梁屯

-矿洞沟杂岩体的 Rb-Sr 同位素测试数据。它具有全岩等时线年龄为  $1866 \pm 115\text{Ma}$ 、 $I_{\text{Sr}} = 0.7049$  的特征 (许保良等, 1998), 是目前国内报道的、与地层学资料相吻合的最古老的碱性正长岩杂岩体。这一发现为研究我国早元古宙碱性岩类

\* 本文得到国家自然科学基金项目 (40072024, 49373170) 资助。

第一作者简介: 蔡剑辉, 女, 1966 年 7 月出生, 在读博士, 副研究员, 岩矿及地球化学专业, E-mail: caijh\_cags@163.com.

活动,以及辽河群年代学问题提供了新证据,因而具有重要意义。

但是,Rb-Sr 放射性母子体系容易受到蚀变或变质作用影响而破坏同位素平衡,利用这种方法所获得的数据有时具有不确定性,在开展岩体年代学和相关地质学问题讨论时应寻找进一步证据的支持,特别是对于象辽宁盖县梁屯-矿洞沟这样年代久远、岩石学和地质学意义重要的碱性岩体更应如此。

所以,我们继 Rb-Sr 同位素研究之后又开展了岩体的单颗粒锆石 U-Pb 和全岩 Sm-Nd 两方面的同位素研究工作。本文拟利用这些资料进一步讨论岩体的年代学和物质来源问题,同时阐述它们所反映出的华北地台北缘古元古宙时期的地幔特征,以及辽河群时代厘定方面的问题。

## 1 岩体地质概况和岩石基本特征

梁屯-矿洞沟碱性正长岩体位于辽宁省盖县东南 25~40 公里处,出露面积为 30km<sup>2</sup> 左右,呈两个不规则的小岩株产出,其间被中生代花岗岩体分隔,其它部分的围岩是辽河群盖县组的浅变质岩系,两者间为明显的侵入接触关系。

该岩体岩石类型主要有霓辉角闪正长岩、霓辉正长岩、角闪正长岩、辉石正长岩和正长霓辉岩。岩石的风化面呈浅黄褐色,新鲜面为灰黑、灰褐或红褐色;岩石结构变化于中细粒-中粗粒之间,从边缘向内部有粒度增大的变化特点,局部见有少量伟晶状和嵌晶状结构;块状构造为主。造岩矿物

主要为微斜长石、微斜条纹长石、霓辉石、透辉石、角闪石、黑云母及少量斜长石。常见副矿物为榍石、锆石、磷灰石等。总体上看,各种岩石类型的分布规律不明显,以渐变过渡关系为主。岩石的矿物含量、结构和构造方面显现变化较大的碱性岩特点。

## 2 同位素测试方法和结果

### 2.1 锆石 U-Pb 同位素测定

梁屯-矿洞沟碱性正长岩体中的锆石晶形单调,多为短柱状,晶面光滑,无溶蚀和磨损现象,颜色较深,为深灰褐色-暗红褐色,未见到环带,显示出成分均匀的岩浆锆石特征。

测定步骤是首先将锆石筛分成为不同粒级;然后在双目镜下精心挑选自形、无包裹体和连生体的锆石若干颗粒;分别用 5N 的 HNO<sub>3</sub> 和 3N 的 HCl 溶液低温洗涤 30 分钟,再用蒸馏水清洗和烘干。经过上述方法处理后获得若干组锆石,然后在每组中选择数粒锆石置入清洗干净的聚四氟乙烯高压釜内,称量加入大约 130mg 的<sup>205</sup>Pb-<sup>235</sup>U 混合稀释剂溶液,蒸干后加入约 0.25ml 的浓 HF,在 200℃ 条件下加热 7 昼夜。U、Pb 的分离和提纯在 AGI×8(200~800 目)阴离子树脂上进行,采用氢溴酸体系。U、Pb 同位素测定用硅胶做发射剂,在英制 VG354 固体源质谱计上进行计量测定。Pb 的全流程本底小于 50×10<sup>-12</sup>g。获得的数据和年龄计算结果在表 1 和图 1 中示出。

表 1 梁屯-矿洞沟碱性正长岩的单粒锆石 U-Pb 同位素测定结果

Table 1 Single Zircon U-Pb isotope determination results of the Liangtun-Kuangdonggou alkaline syenite complex

序号	元素含量(μg/g)		普通铅测定值		同位素比值		表面年龄(Ma)		
	U	Pb	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb
1	320.7	119.4	235	3.7064	0.2384	0.1128	1573	1378	1843
2	960.8	202.6	1021	2.5409	0.1599	0.1153	1284	956	1884
3	328.3	126.9	280	4.0196	0.2533	0.1151	1638	1456	1881
4	1290.0	474.6	3280	3.8042	0.2439	0.1132	1594	1407	1851
5	1540.0	366.6	1340	3.8935	0.1847	0.1137	1612	1092	1858
6	556.1	179.0	1631	3.8578	0.2525	0.1109	1605	1451	1812
7	661.5	240.9	3802	4.4688	0.2835	0.1144	1725	1609	1869
8	1280.0	42.7	500	0.3821	0.0239	0.1162	329	152	1897
9	358.3	152.1	1119	5.1280	0.3253	0.1144	1841	1816	1869

注:样品由中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室测定

如表 1 所示,梁屯-矿洞沟碱性正长岩的锆石样品都显示有<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb > <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U > <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 的不一致表面年龄,这种锆石表面年龄的不一致是由于发生在近期的锆石中的放射成因铅不同程度的丢失引起的。在这种情况下,锆石

的<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U 和<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 表面年龄不能代表锆石的结晶年龄,但是采用谐和图解可以获得锆石的结晶年龄,将测得的<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U 与<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 数据投到谐和图中(图 1),9 个锆石样品的同位素数据显示出很好的线性关系,利用 ISOPLOT

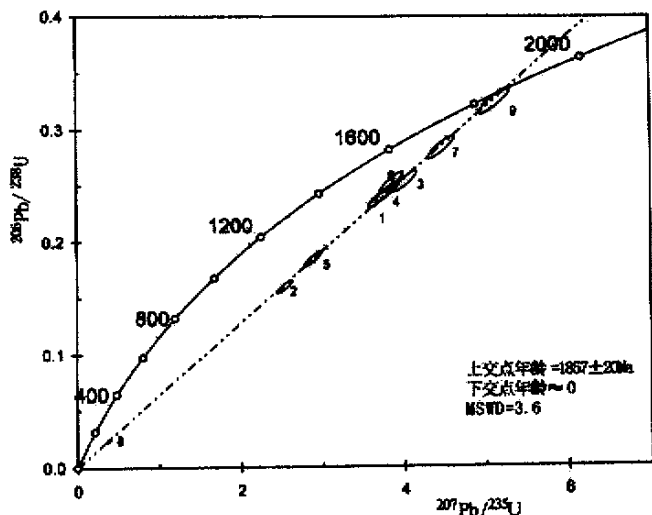


图 1 辽宁梁屯-矿洞沟碱性正长岩杂岩体锆石 U-Pb 年龄图

Fig. 1 U-Pb concordia diagram for zircons from the Liangtun-Kuangdonggou alkaline syenite complex in Liaoning province

程序(Ludwig, 1994)计算,不一致线与谐和线的上交点年龄为  $1857 \pm 20 \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ ),  $\text{MSWD} = 3.6$ , 与  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄(9个点的平均值 =  $1863 \pm 16 \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ ))一致,可以代表锆石的结晶年龄。

## 2.2 Sm-Nd 等时线年龄测定

对梁屯-矿洞沟碱性正长岩体中 7 个新鲜全岩样品进行了 Sm-Nd 同位素测定工作。它们的岩石类型、测试数据和年龄计算结果分别在表 2 和图 2 中示出。

由表 2 看出,样品中 Nd 含量较高,7 个样品的 Nd 含量

在  $63.56 \times 10^{-6} \sim 193.70 \times 10^{-6}$  之间,成岩后的变化对体系的影响应该是微弱的,所以,测定结果可以反映原岩特征。但是由于  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比值的变化范围较小( $0.0935 \sim 0.1084$ ),会使年龄结果的可靠性受到一定限制。利用 ISOPLOT 程序(Ludwig, 1994)计算出 Sm-Nd 等时线年龄为  $1787 \pm 180 \text{ Ma}$ ,  $\text{MSWD} = 0.16$ 。根据这一年龄计算出的 7 个样品的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  的变化范围在  $-4.8 \sim -5.0$  之间,十分接近。从而说明这些岩石来自于相同的同位素体系,它们在形成过程及其以后未发生明显的体系变化。

表 2 梁屯-矿洞沟碱性正长岩杂岩体 Sm-Nd 同位素测试数据及处理结果

Table 2 The Sm-Nd isotopic determination data and calculation results of the Liangtun-Kuangdonggou alkaline syenite complex

编号	样品编号	岩石名称	Sm $\times 10^6$	Nd $\times 10^6$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ( $t = 1787 \text{ Ma}$ )
1	9714	霓辉角闪正长岩	15.45	97.15	0.0962	$0.511220 \pm 5$	-4.8
2	9715	霓辉正长岩	16.00	103.40	0.0935	$0.511182 \pm 8$	-5.0
3	9706	辉石正长岩	19.10	124.20	0.0974	$0.511228 \pm 7$	-5.0
4	9732	角闪霓辉正长岩	34.69	193.70	0.1084	$0.511360 \pm 7$	-4.8
5	9704	霓辉角闪正长岩	10.55	63.58	0.1004	$0.511265 \pm 7$	-4.9
6	9515	霓辉正长岩	23.67	136.90	0.1045	$0.511314 \pm 7$	-4.9
7	9513	霓辉角闪正长岩	13.65	80.07	0.1031	$0.511292 \pm 7$	-5.0

注:样品由中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室测定。采用 VG354 仪器分析,分析流程见(Qiao Guangsheng, 1998),

分析期间 4 次测试的 Lajolla 国际标样值为  $0.511855 \sim 0.511864$ ,平均值为  $0.511860$ 。

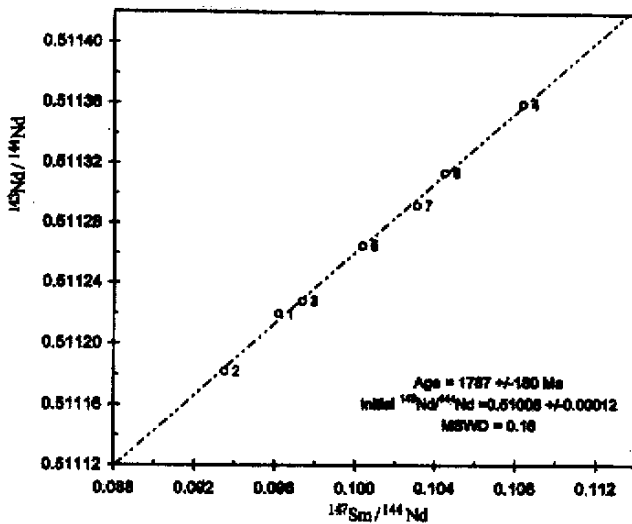


图2 辽宁梁屯—矿洞沟碱性正长岩杂岩体全岩 Sm-Nd 等时年龄图

Fig. 2 Whole rock Sm-Nd isochron diagram of the Liangtun-Kuangdonggou alkaline syenite complex in Liaoning Province

### 3 问题讨论与主要结论

#### 3.1 岩石学意义

本次工作获得的锆石 U-Pb 年龄为  $1857 \pm 20\text{Ma}$ ,  $\text{MSWD} = 3.6$ , 9 个样品  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  表面年龄平均值为  $1863 \pm 16\text{Ma}$  ( $2\sigma$ ); 全岩 Sm-Nd 等时线年龄为  $1787 \pm 180\text{Ma}$ ,  $\text{MSWD} = 0.16$ ; 许保良等获得的全岩 Rb-Sr 等时线年龄为  $1866 \pm 115\text{Ma}$  (许保良等, 1998)。三种不同方法获得的年龄结果, 特别是锆石 U-Pb 年龄和全岩 Rb-Sr 等时线年龄十分接近, 全岩 Sm-Nd 等时线年龄虽然略小, 但也在误差范围之内, 这就不是偶然的。如同前述, 说明岩石来自同一同位素体系, 而且成岩后未受到大的扰动。

$1857 \pm 20\text{Ma}$  的年龄很可能反映出梁屯-矿洞沟碱性正长岩体形成的上限年龄, 全岩 Sm-Nd 等时线年龄则反映出岩体形成时间下限不小于  $1787 \pm 180\text{Ma}$ 。梁屯-矿洞沟碱性正长岩体形成的地质年代, 无论是按照国际地层委员会 (1989)、国际地质科学联合会 (1990) 和国际前寒武纪地层分会 (1991) 推荐的宽尺度方案, 还是按照中国地层委员会 (1990) 建议的小范围划分方案 (白瑾等, 1996), 都可以被划归为古元古宙。因此, 梁屯-矿洞沟碱性正长岩杂岩体是古元古宙岩浆作用的产物。

一般认为, 碱性正长岩浆主要来源于地幔 (Sorensen H, 1974; Fitton J G *et al.*, 1987; Mchone J G, 1996; Bernard Griffiths J *et al.*, 1997; Pervov V A *et al.*, 1997; Ewart A *et al.*, 1998; Kogarko L N, 1998; Simonetti A *et al.*, 1998; Kononova V A *et al.*, 1999; Barbarin B, 1999)。以此

认识为基础, 同时考虑地壳产生的岩石通常为钙碱性和过铝质中酸性-酸性岩石的特点, 我们推测该碱性正长岩浆物质来源于地幔。该岩体的锆同位素初始比值为 0.7049 (许保良等, 1998)。按照 Depaolo 等 (1976) 计算方法计算出的  $t = 1866\text{Ma}$  时  $\epsilon_{\text{Sr}}(t) = +37.32$ , 岩体相应的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  在  $-4.8 \sim -5.0$  之间。而正的  $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  和负的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  性质为富集地幔所特有, 表明该岩体衍生于富集地幔物质, 并且华北地台北缘古元古宙存在有富集地幔储库。

#### 3.2 辽河群时代

辽河群 (白瑾, 1996; 张秋生等, 1988) 或两分法中的宽甸群和辽河群 (赵宗溥等, 1993) 等古元古宙地层广泛出露在吉辽地区, 有关其年代学的认识仁见智, 成为长期遗留下来的有争议的重要地质问题。

目前获得的辽河群同位素年龄主要分布在  $1596\text{Ma} \sim 2300\text{Ma}$  区间 (白瑾, 1996; 张秋生等, 1988; 赵宗溥等, 1993; 王东方等, 1993; 魏菊英等, 1995)。其中  $1596\text{Ma} \sim 1750\text{Ma}$  的年代学数据主要在 80 年代初期以前获得, 且大多数用 K-Ar 方法确定 (张秋生, 1984; 王集源, 1984)。80 年代后期以来开展了进一步的 Rb-Sr、Pb-Pb 和 Sm-Nd 同位素年代学的研究工作, 所发表的辽河群年代学数据普遍大于  $1800\text{Ma}$ 、主要变化于  $1900\text{Ma} \sim 2200\text{Ma}$  之间。有关的代表性成果包括: Pb-Pb 等时年龄  $2066\text{Ma}$  (陈毓蔚等, 1981); Rb-Sr 全岩等时年龄  $1897 \pm 49\text{Ma}$ ,  $1860 \pm 124\text{Ma}$  和 Pb-Pb 年龄  $2098\text{Ma}$  (王集源等, 1987); 锆石 Pb-Pb 等时年龄  $2093 \pm 22\text{Ma}$  和 U-Pb 一致年龄  $2053 \pm 60\text{Ma}$ , 全岩 Rb-Sr 等时年龄  $1875 \pm 216\text{Ma}$ ,  $1860 \pm 124\text{Ma}$  (姜春潮等, 1987); 锆石 U-Pb 一致年

龄 2073.4 Ma、1965Ma 和 Pb-Pb<sub>2210</sub>Ma (张秋生, 1988); Sm-Nd 等时线年龄  $2214.2 \pm 55.86$ Ma、 $2063.24 \pm 37.92$ Ma (白瑾, 1993); 全岩 Sm-Nd 等时年龄  $1829.31 \pm 59.63$ Ma (王魁元, 1994)。值得注意的是, 贺高品等 1998 年从地体角度系统研究了原辽河群地层, 将其分解为辽北和辽南两个部分, 提出北辽河群形成于 1800Ma~2300Ma、南辽河群形成于 2300Ma~1900Ma 的新认识(贺高品, 1998)。上述资料均表明发育在辽南地区的辽河群应形成于 1900Ma 以前。

梁屯-矿洞沟碱性正长岩体侵入到南辽河群上部的盖县组地层(许保良等, 1998), 其形成的年龄上限不应大于 1900Ma。反之, 若用岩体同位素年代限定地层形成时代, 则南辽河群形成的年龄下限不应早于 1857Ma 前后。目前梁屯-矿洞沟碱性正长岩体已获得的  $1866 \pm 115$ Ma 的全岩 Rb-Sr、 $1857 \pm 20$ Ma 的锆石 U-Pb 和  $1787 \pm 180$ Ma 的 Sm-Nd 年代学结果均小于辽河群的同位素年龄 1900Ma。两方面年代学结果相互印证, 不仅表明梁屯-矿洞沟碱性正长岩体形成于 1857Ma 前后, 同时也支持了关于南辽河群形成于 1900Ma 以前的认识。

## 4 结论

(1) 辽宁盖县梁屯-矿洞沟碱性正长岩体的 U-Pb、Sm-Nd 与 Rb-Sr 同位素年代学结果吻合, 反映出该岩体形成时间上限为  $1857 \pm 20$ Ma, 下限不小于  $1787 \pm 180$ Ma, 属于古元古宙碱性岩类。

(2) 辽宁盖县梁屯-矿洞沟碱性正长岩体具有  $\epsilon_{Nd}(t) = -4.8 \sim -5.0$ 、 $\epsilon_{Sr}(t) = +37.32$  的富集地幔物质特征; 反映出该碱性正长岩浆来源于富集地幔物质, 华北地台北缘古元古宙存在有富集地幔储库。

(3) 该岩体侵位于古元古宙南辽河群上部地层中, 指示出南辽河群的形成时代下限应早于  $1857 \pm 20$ Ma, 很可能形成于 1900Ma 之前。

致谢: 工作中得到李之彤研究员的大力帮助, 特此致谢!

## References

Bai Jin. 1993. Precambrian geology and lead-zinc metallogeny in the north of the North China continental platform. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese)

Bai Jin, Huang Xueguang, Wang Huichu *et al.* 1996. Precambrian crustal evolution of China. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese)

Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605—626

Bernard Griffiths J *et al.* 1997. Continental Lithospheric contribu-

tion to alkaline magmatism: isotopic (Nd, Sr, Pb) and geochemical (REE) evidence from Derra de Monchique ant Mount Orconde Complexs. *J. Petrol.*, 38: 115—132

Chen Yuwei, Zhong Fudao. 1981. Determination of isotopic age of Precambrian rock groups in north China, and discussion on chinese Precambrian geological chronology. *Geochimica*, (3): 209—219 (in Chinese with English abstract)

Depaolo D J, Wasserburg G J. 1976. Inferences about magma sources and mantle structure from variations. *Geophys Res Lett*, 3: 743

Ewart A, Milner S C, Armstrong R A and Duncan A R. Etendeka volcanism of the Goboboseb Mountains and Messum igneous complex, Namibia, Part 1: geochemical evidence of early Cretaceous Tristan Plum melts and the role of crustal contamination in the Parana-Etendeka CFB. *J. Petrol.*, 39: 191—225

Fitton J G, Upton B G J. 1987. *Alkaline Igneous Rocks*. Oxford, London: Geol. Soc. Spec. Publ., Blackwell Sci. Publications

He Gaoping, Ye Huiwen. 1998. The composition of the early Proterozoic metamorphic terrains in eastern Liaoning-western Jilin area and its main characteristics. *Acta Science Technology University of Changchun*, 28: 121—126 (in Chinese with English abstract)

Jiang Chunchao *et al.* 1987. Precambrian geology in east part of Liaoning and Jilin Provinces. Liaoning: Scientific and Technical Press (in Chinese)

Kogarko L N. 1998. Alkaline magatism in the early history of the Earth. *Petrology*, (6): 230—236

Kononova V A *et al.* 1999. Mantle herogeneity beneath the northern part of the East-European platform (inferred from the Sr and Nd isotopic compositions of the high-Mg alkaline rocks). *Dokl Akad Nauk*, 364: 810—812

Ludwig K R. 1994. ISOPLOT — A plotting and regression program for radiogenic- isotope data. USGS open-file report 91—445

Mathias M. 1974. Alkaline rocks of Southern Africa. In: Sorensen H (ed.). *The Alkaline Rocks*. 1974. London, New York: John Wiley and Sons. 189—204

Mchone J G. 1996. Constraints on the mantle plume model for Mesozoic alkaline intrusions in northeastern North America. *Can. Mineral.*, 34(part 2): 325—334

Pervov V A *et al.* 1997. Potassic magmatism of the Aldan Shield, southeastern Siberia: an indicator of the multistage evolution of the lithospheric mantle. *Petrology*, 5: 415—430

Qiao Guangsheng. 1998. Normalization of isotopic dilution analysis. *Scientia Sinica Series A*, 31(10): 1263—1268

Simonetti A *et al.* 1998. Geochemical and Nd, Pb and Sr isotope data from Deccan alkaline complexes — inferences for mantle sources and plum-lithosphere interaction. *J. Petrol.*, 39: 1847—1864

Sorensen H. 1974. Alkaline syenites, feldspathoidal syenites and related lavaa. In: Sorensen H (ed.). *The Alkaline Rocks*. 1974. London, New York: John Wiley and Sons. 22—52

- Sorensen H. 1974. The Alkaline Rocks. London, New York: John Wiley and Sons
- Wang DongFang, Chen Congyun, and Yang Sen *et al.* 1993. Precambrian crustal evolution of the China-Korea para-platform. Beijing: Science Press, 347—388(in Chinese)
- Wang Jiyuan. 1984. Discussion on the isotopic age of the Cambrian Dashiqiao Group in eastern Liaoning and its time limit. *Geology of Liaoning*, (2): 147—158 (in Chinese)
- Wang Jiyuan, Wu Jiahong, Jiang Chunchao. 1987. Research on isotopic geological chronology. In: Jiang Chunchao(ed.). Precambrian geology in the east part of Liaoning and Jilin Provinces. Shenyang: Scientific and Technical Press of Liaoning, 135—151 (in Chinese)
- Wang Kuiyuan, Zhao Yanming, and Cao Xiulan *et al.* 1994. Proterozoic typical lead-zinc deposit geology in the north part of the North China continental platform. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese)
- Wei Juying, Zeng Yishan, and Mu Baolei. 1995. Geochemistry of Proterozoic lead-zinc deposits in the north part of the North China platform. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese)
- Xu Baoliang, Yan Guohan, Mu Baolei *et al.* 1998. Rb-Sr isotopic age of alkaline syenite in Liangtun and Kuangdongguo, Gai County, Liaoning Province, China and its significance. *Chinese Science Bulletin*, 43(17): 1885—1887(in Chinese)
- Zhang Qiusheng. 1984. Early Precambrian geology and metallogeny in China. Changchun: People's Publishing House of Jilin (in Chinese)
- Zhang Qiusheng *et al.* 1988. Early crust and ore deposits in eastern Liaoning Peninsula. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Zhao Zongpu *et al.* 1993. Precambrian crustal evolution of the China-Korea paraplatform. Beijing: Science Press (in Chinese)

### 附中文参考文献

- 白瑾. 1993. 华北陆台北缘前寒武纪地质及铅锌成矿作用. 北京:地质出版社
- 白瑾, 黄学光, 王惠初. 1996. 中国前寒武纪地壳演化. 北京:地质出版社
- 陈毓蔚, 钟富道. 1981. 我国北方前寒武纪岩石组同位素年龄测定, 兼论中国前寒武纪地质年表. *地球化学*, (3): 209—219
- 贺高品, 叶慧文. 1998. 辽东-吉南地区早元古代变质地体的组成及主要特征. *长春科技大学学报*, 28: 121—126
- 姜春潮等. 1987. 辽吉东部前寒武纪地质. 辽宁:科学技术出版社
- 王东方, 陈从云, 杨森等. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化. 北京:科学出版社, 347—388
- 王集源. 1984. 辽东前寒武纪大石桥组同位素年龄及其时限问题的讨论. *辽宁地质*, (2): 147—158
- 王集源, 吴家弘, 姜春潮. 1987. 同位素地质年代学研究. 见:姜春潮主编. 辽吉东前寒武纪地质. 沈阳:辽宁科技出版社, 135—151
- 王魁元, 赵彦明, 曹秀兰等. 1994. 华北陆台北缘元古宙典型铅锌矿床地质. 北京:地质出版社
- 魏菊英, 曾贻善, 牟保磊. 1995. 华北地台北缘元古宙中铅锌矿床的地球化学. 北京:地质出版社
- 许保良, 阎国翰, 牟保磊等. 1998. 辽宁盖县梁屯-矿洞沟碱性正长岩 Rb-Sr 年龄及其意义. *科学通报*, 43(17): 1885—1887
- 张秋生. 1984. 中国早前寒武纪地质及成矿作用. 长春:吉林人民出版社
- 张秋生等. 1988. 辽东半岛早期地壳与矿床. 北京:地质出版社
- 赵宗溥等. 1993. 中朝准地台前寒武纪地壳演化. 北京:科学出版社