

# 西伯利亚雅库特金伯利岩中四颗古老锆石巨晶的微量元素和 Hf 同位素特征——对区分金伯利岩中锆石巨晶的启示\*

孙晶<sup>1,2</sup>

SUN Jing<sup>1,2</sup>

1. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249

2. 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249

1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, Beijing 102249, China

2021-07-06 收稿, 2021-09-01 改回.

**Sun J. 2021. Trace elements and Hf isotopic compositions of four ancient zircon megacrysts from Yakutian kimberlite, Siberia: Implications for identifying mantle and old zircon megacrysts from Kimberlites. *Acta Petrologica Sinica*, 37(11): 3548–3558, doi: 10.18654/1000-0569/2021.11.18**

**Abstract** Zircon from kimberlite can be divided into fine-grained zircon ( $<200\mu\text{m}$ ) and megacrystal zircon ( $>500\mu\text{m}$ ) according to its grain size. Previous studies have shown that the U-Pb system of mantle zircon is an open state in the high temperature mantle until the eruption of host kimberlite. Therefore, mantle zircon is one of the important minerals for dating the age of kimberlite. However, recent studies have shown that some zircon megacrysts from kimberlite with ages much older than kimberlite also have large grain sizes. Their presence undoubtedly influences the quasi-dating of kimberlite ages. In this study, four ancient zircon megacrysts from the Siberian kimberlite were studied and the origin of the ancient zircon megacrysts was discussed through morphology, chronology, trace elements and Hf isotopic compositions. Moreover, the morphology, U and Th contents, trace element composition, and Hf-O isotopes of mantle zircon and old zircon from cratonic kimberlite rocks in the world are collected and compared. The results show obvious differences in  $t_{\text{DM}}$  ages and O isotopic compositions between the large old zircon and mantle zircons. These methods can be used to distinguish old zircon from mantle zircon megacrysts in kimberlite in future studies.

**Key words** Mantle zircon xenocryst; Old zircon megacrysts; Kimberlite; Identification method

**摘要** 金伯利岩中的锆石按照颗粒大小可以分为细粒锆石(一般小于 $200\mu\text{m}$ )和巨晶锆石(一般大于 $500\mu\text{m}$ )。前人的研究结果显示在金伯利岩中粒径较大的巨晶锆石的 U-Pb 体系在高温的地幔中一直保持着开放状态,直到寄主金伯利岩浆的喷发才使地幔锆石的 U-Pb 体系封闭,因此这些巨晶锆石是确定金伯利岩年龄的重要矿物之一。然而,近年来的研究表明,金伯利岩中还存在一些时代远老于金伯利岩年龄的锆石,也具有较大的粒径(以下称古老锆石巨晶)。它们的存在无疑影响了利用锆石 U-Pb 方法确定金伯利岩年龄的准确性。本文以西伯利亚雅库特(Yakutia)金伯利岩省中的四颗古老锆石巨晶为研究对象,通过形态学、年代学、微量元素和 Hf 同位素组成,讨论古老锆石巨晶的来源。同时,我们统计和对比了全球多个金伯利岩中能够确定金伯利岩年龄的锆石和古老锆石巨晶的形态学、U、Th 含量和微量元素组成、Hf-O 同位素等特征。研究结果显示,金伯利岩中的古老锆石巨晶的  $t_{\text{DM}}$  年龄和 O 同位素组成与可以用来确定金伯利岩年龄的锆石巨晶具有明显的差别。这些手段在未来的研究中可以用来区分可确定金伯利岩年龄的锆石巨晶和古老的锆石巨晶。

**关键词** 地幔锆石巨晶; 古老锆石巨晶; 金伯利岩; 判别方法

中图法分类号 P578.941; P588.145; P597.3

\* 本文受国家自然科学基金项目(42072060)资助。

第一作者简介: 孙晶,女,1987年生,副教授,主要从事岩石学与地球化学研究, E-mail: sunjingyv@163.com

锆石是 U-Th-Pb 以及 Lu-Hf 等元素重要的赋存矿物,耐高温、耐熔和抗风化的良好稳定性令微量元素在锆石中的扩散和丢失速率很低,因而常被作为重要的化学探针,用于研究岩浆的喷发时代与演化过程。金伯利岩等幔源岩石中的部分锆石具有较大(毫米到厘米级)的粒径且来源于地幔,因而又被称为地幔锆石巨晶。长期以来,它们被用于确定金伯利岩质岩浆的喷发时代和岩石圈地幔的同位素组成特征(Griffin *et al.*, 1999; Spetsius *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2014; Agashev *et al.*, 2020)。由于超基性岩浆的硅不饱和性不利于锆石的生长,金伯利岩中的锆石像金刚石一样少见(含量  $\leq 1\text{g/t}$ ; Kresten *et al.*, 1975)。

近年在南非(Kinny *et al.*, 1989; Griffin *et al.*, 2000)、加拿大(Zartman and Richardson, 2005)、澳大利亚(Berryman *et al.*, 1998)等地的金伯利岩中陆续发现了具有太古宙-元古宙时代的锆石巨晶,它们的年龄明显老于寄主金伯利岩的喷发时代。这说明,一些金伯利岩中存在非单一地幔来源的锆石种类,即还存在古老锆石巨晶。由于古老锆石巨晶与能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶在肉眼下并没有明显的差别,这可能导致锆石 U-Pb 定年结果被错误解读,从而对金伯利岩定年造成一定困扰。因此,系统地对比古老锆石巨晶和能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶的特征,确定出一套有效的区分手段是十分有必要的。

本次研究以西伯利亚雅库特地区几个喷发时代已知的金伯利岩中的四颗古老锆石巨晶为研究对象,进行了 CL 图像、U-Pb 年龄、微量元素和 Hf 同位素的分析,讨论这些古老锆石巨晶的可能来源。同时,统计了其它克拉通金伯利岩中的古老锆石巨晶和能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶,从形态学、微量元素、U、Th 含量和 Hf-O 同位素等方面讨论它们之间的差别,从而能够区分确定金伯利岩年龄的和古老的锆石巨晶的有效方法。

## 1 区域地质背景与样品描述

### 1.1 区域地质背景

西伯利亚克拉通面积大约  $4 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,南起贝加尔湖(Baikal Lake),北至拉普捷夫海(Laptev),东至俄库斯科海(Okhotsk),西至叶尼塞河(Yenisey)。西伯利亚克拉通是世界上稳定的克拉通之一,雅库特(Yakutia)金伯利岩省(图1中红色虚线区域)位于西伯利亚克拉通的东北部,大小为  $1100\text{km} \times 800\text{km}$ 。该地区共有 25 个金伯利岩区(其中 Ukukit 区有东西两部分),分别发育有数量不等的共计 1050 个金伯利岩管(Spetsius, 2004),是世界上著名的金刚石产区之一(图1)。西伯利亚克拉通基底岩石出露较少,只在南部的 Aldan 和北部的 Anabar 地盾中有所出露,发育有 3.0 ~ 3.6 Ga 的麻粒岩和片麻岩,其在 1.8 ~ 2.0 Ga 发生混合岩化(Jackson *et al.*, 2004; Nutman *et al.*, 1992)。根据这两个地区的研究资料,该克拉通在 1.8 Ga 年左右发生克拉通化而趋

于稳定(Rosen *et al.*, 2005)。

### 1.2 样品描述

本次研究的四颗锆石巨晶分别来自于雅库特金伯利岩省中的 Kuranah 金伯利岩区的 Markiza 岩管(1 粒)、Beriginde 金伯利岩区的 Gorelaya 岩管(1 粒)和 Luchakan 金伯利岩区的 Luchakan 岩管(2 粒)。我们前期对雅库特金伯利岩中钙钛矿(Sun *et al.*, 2014)和锆石巨晶的 U-Pb 定年工作(Sun *et al.*, 2018)显示, Kuranah、Beriginde 和 Luchakan 金伯利岩区的金伯利岩的年龄分别为 ~220Ma、~160Ma 和 ~220Ma。

四颗锆石巨晶颗粒最大的为 Mar-3, 粒径近 1mm(不完整的颗粒);最小的为 78-1450-2, 粒径约 0.5mm(不完整的颗粒)。锆石巨晶内部结构可以分为以下几种类型(图2): 1) 无环带结构,如 Mar-3; 2) 具有清晰的振荡环带结构,如 78-1461-2; 3) 核边结构,这些锆石巨晶颗粒相对较小,晶型不完整,如 78-1450-1 和 78-1450-2。

## 2 分析方法

### 2.1 微量元素与 U-Pb 年龄

利用 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统和 Agilent 7500a 型四极杆电感耦合等离子质谱仪(Q-ICP-MS)完成锆石 U-Pb 定年和微量元素测试,具体操作方法见 Xie *et al.* (2008)。实验过程中采用 NIST 610 作为微量元素含量外标,锆石 91500 作为 U-Pb 同位素比值外标,锆石 Plesovice 作为未知样品的数据质量监控标来进行分析。分析过程中我们没有对有核锆石的结晶核进行分析。激光束斑为  $120\mu\text{m}$ ,频率为 8Hz,激光能量密度为  $15\text{J}/\text{cm}^2$ 。每测定 5 个样品点测定一组标样。数据处理采用 GLITTER 程序,年龄计算时以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值分馏校正。Plesovice 测定的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $334 \pm 2\text{Ma}$ ,与文献推荐值( $337 \pm 1\text{Ma}$ ; Sláma *et al.*, 2008)在误差范围内一致。各元素浓度的计算采用 GEMOC 开发的 GLITTER 4.0 软件,以 NIST SRM 610 作外标,以  $^{29}\text{Si}$  为内标,各元素的测试精度在 10% 以内。

### 2.2 Hf 同位素

锆石激光 Lu-Hf 同位素测试利用 Coherent GeoLasPro 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统和美国 Thermo Fisher 公司生产的 Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)联机完成。Hf 同位素的测试需要在锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年测试完成后进行。详细分析流程见 Wu *et al.* (2006),这里仅作简要描述如下:分析采用静态信号采集模式,背景采集时间 30s,积分时间为 0.131s,采集 200 组数据,总计约 30s。激光束斑直径为  $80\mu\text{m}$ ,剥蚀速率为 8Hz,激光能量密度为  $15\text{J}/\text{cm}^2$ 。分析采用的杯结构为:  $^{172}\text{Yb}$ 、 $^{173}\text{Yb}$ 、 $^{175}\text{Lu}$ 、 $^{176}\text{Hf} + \text{Yb} + \text{Lu}$ 、 $^{177}\text{Hf}$ 、 $^{178}\text{Hf}$ 、 $^{179}\text{Hf}$ 、 $^{180}\text{Hf}$  和  $^{182}\text{W}$ 。  $^{176}\text{Hf}$

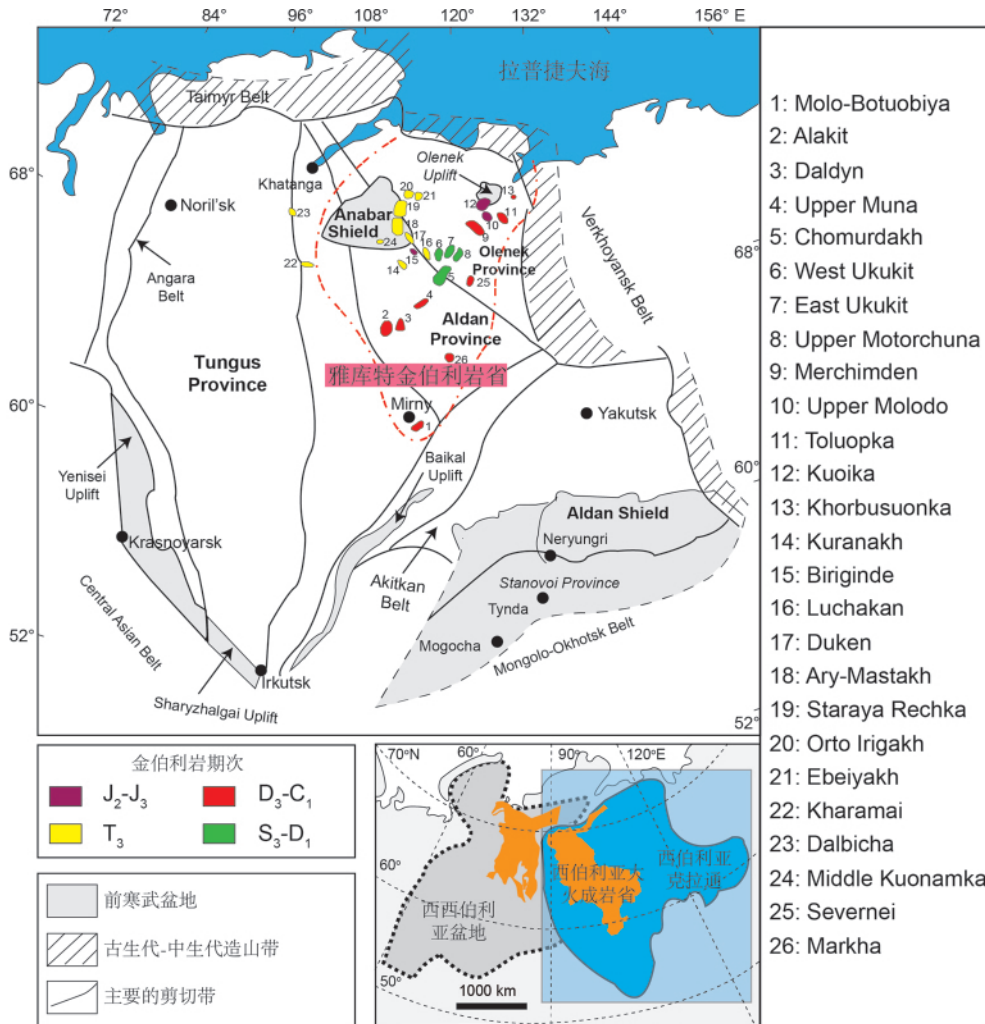


图1 西伯利亚克拉通地质简图(据 Griffin *et al.*, 1999 修改)

Fig.1 Overview map of the Siberian craton, showing the locations of kimberlite fields(modified after Griffin *et al.*, 1999)

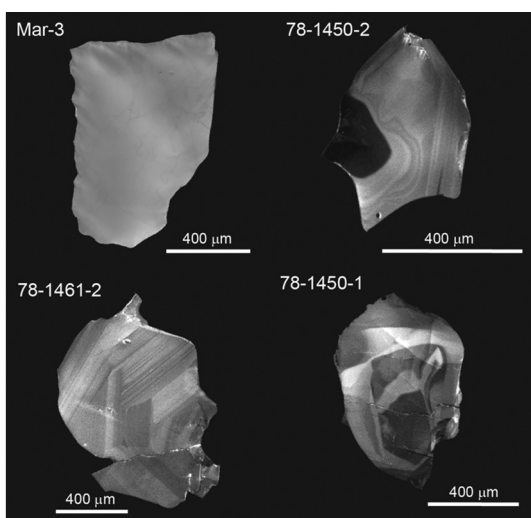


图2 雅库特金伯利岩中古老锆石巨晶 CL 图像

Fig.2 CL images of ancient zircon megacrysts from Yakutia kimberlite

有两个同位素<sup>176</sup>Lu 和<sup>176</sup>Yb,其中<sup>176</sup>Lu 对<sup>176</sup>Hf 的干扰采用<sup>175</sup>Lu/<sup>176</sup>Lu = 0.02655 进行校正,并假设 Lu 的分馏与 Hf 的分馏情形相同。<sup>176</sup>Yb 对<sup>176</sup>Hf 的干扰采用实测 Yb 的分馏系数,并假设<sup>176</sup>Yb/<sup>172</sup>Yb = 0.5887。实际测定过程中,每颗锆石进行 10 个单点分析,以锆石 GJ-1 和锆石 Plesovice 作为双重外部标样在单颗粒锆石前后各分析一次,监测仪器的漂移。测试结果表明,标准锆石 GJ-1 和 Plesovice 的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf 同位素比值分别为 0.282009 ± 25 (2SD, N = 72) 和 0.282478 ± 21 (2SD, N = 54),与推荐值(0.282000 ± 25 (Morel *et al.*, 2008); 0.282482 ± 13 (Sláma *et al.*, 2008)) 在误差范围内一致。

本文所有实验都在中国科学院地质与地球物理研究所 LA-ICPMS 实验室完成。

### 3 测试结果

#### 3.1 微量元素特征

四颗锆石巨晶的稀土元素配分曲线见图 3,分析数据见

表1 雅库特金伯利岩中古老锆石巨晶的微量元素含量( $\times 10^{-6}$ )Table 1 Trace element compositions of ancient zircon megacrysts from Yakutia kimberlite ( $\times 10^{-6}$ )

Element	78-1461-2											78-1450-1			
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	Avg.	01	02	03	Avg.
<sup>47</sup> Ti	1040	1043	1100	1144	1058	1054	1099	1066	1036	1010	1065	1132	1056	1080	1089
<sup>49</sup> Ti	14.93	13.97	16.82	17.38	15.99	16.64	19.01	15.29	17.48	14.04	16.16	39.34	30.41	34.86	34.87
<sup>88</sup> Sr	0.24	0.08	0.07	0.10	0.07	0.19	0.07	0.09	0.08	0.05	0.10	0.18	0.04	0.06	0.09
<sup>89</sup> Y	456.9	298.6	409.6	563.3	352.6	332.7	265.9	384.0	248.6	257.0	356.9	108.8	82.61	98.48	96.61
<sup>93</sup> Nb	4.26	3.01	4.11	5.13	3.27	3.00	3.20	3.62	2.88	2.42	3.49	1.00	0.68	0.70	0.79
<sup>139</sup> La	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.49	0.02	0.01	0.17
<sup>140</sup> Ce	6.94	5.41	6.37	7.23	5.41	4.92	4.96	5.66	4.89	4.83	5.66	8.08	4.59	5.43	6.03
<sup>141</sup> Pr	0.20	0.17	0.19	0.22	0.17	0.18	0.12	0.19	0.12	0.19	0.18	0.35	0.13	0.15	0.21
<sup>146</sup> Nd	3.34	2.72	3.08	3.29	2.62	3.16	2.096	3.23	1.945	2.6	2.81	3.68	1.88	2.52	2.69
<sup>147</sup> Sm	6.23	4.60	5.78	7.5	4.96	5.77	4.11	6.15	3.53	4.19	5.28	3.77	2.70	3.42	3.30
<sup>153</sup> Eu	0.32	0.21	0.28	0.43	0.26	0.22	0.17	0.26	0.21	0.21	0.26	0.82	0.32	0.35	0.50
<sup>157</sup> Gd	25.74	17.15	24.05	31.97	19.12	21.63	16.12	24.65	13.84	15.22	20.95	10.72	8.50	10.19	9.80
<sup>159</sup> Tb	7.68	5.24	7.17	9.51	5.85	6.25	4.75	7.38	4.22	4.66	6.27	2.54	1.98	2.41	2.31
<sup>163</sup> Dy	66.09	44.05	60.94	82.3	50.63	51.08	39.65	59.23	35.7	37.9	52.76	16.99	13.21	15.76	15.32
<sup>165</sup> Ho	19.69	12.95	17.71	25.09	15.38	14.10	11.47	16.59	10.71	10.95	15.46	3.69	2.79	3.38	3.29
<sup>166</sup> Er	62.07	39.84	55.09	79.94	48.68	41.57	35.31	48.57	33.6	33.53	47.82	9.41	7.12	8.39	8.31
<sup>169</sup> Tm	11.08	7.06	9.67	14.51	8.94	6.97	6.31	8.13	6.09	5.82	8.46	1.50	1.11	1.30	1.30
<sup>172</sup> Yb	81.47	51.2	69.35	108.7	67.2	48.03	45.15	56.89	45.41	41.99	61.54	10.57	7.72	8.90	9.06
<sup>175</sup> Lu	12.66	7.83	10.58	16.81	10.52	7.11	6.83	8.27	7.04	6.31	9.40	1.54	1.11	1.28	1.31
<sup>178</sup> Hf	10520	10751	11221	10866	10766	11210	11088	11105	10279	10236	10804	9783	9625	10124	9844
<sup>181</sup> Ta	1.51	1.22	1.58	1.62	1.11	1.01	1.05	1.22	0.90	0.90	1.21	0.24	0.21	0.19	0.21
<sup>204</sup> Pb	0.27	0.17	0.29	0.17	0.23	0.24	0.25	0.22	0.22	0.36	0.24	0.39	0.25	0.23	0.29
<sup>206</sup> Pb	143.8	135.5	169.2	149.4	106.4	124.6	126.2	143.4	97.08	105.7	130.1	150.4	130.5	157.4	146.1
<sup>207</sup> Pb	18.58	17.7	21.97	19.70	13.95	16.19	16.71	18.56	12.68	13.7	16.97	20.33	17.03	21.28	19.55
<sup>208</sup> Pb	13.12	10.42	15.06	15.18	8.55	10.23	9.28	13.2	7.88	8.27	11.12	7.30	6.35	7.99	7.21
<sup>238</sup> U	112.7	107.6	133.8	119.7	84.16	98.96	100.2	113.9	76.85	83.99	103.2	113.2	100.6	115.4	109.7
<sup>232</sup> Th	78.92	63.05	93.7	96.57	50.49	62.26	56.59	81.43	46.91	49.1	67.90	45.25	39.18	49.08	44.50

Element	78-1450-2								Mar-3									
	02	03	04	05	06	07	Avg.	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	Avg.
<sup>47</sup> Ti	1105	1098	1105	1126	1107	1070	1102	1503	1487	1390	1509	1415	1454	1443	1498	1526	1446	1467
<sup>49</sup> Ti	22.83	48.87	56.76	30.51	25.88	22.04	34.48	13.52	14.05	12.50	14.41	14.22	15.59	11.31	10.19	15.66	16.48	13.79
<sup>88</sup> Sr	0.61	0.13	0.12	0.11	0.07	0.16	0.20	0.08	0.10	0.06	0.07	0.07	0.05	0.06	0.06	0.07	0.09	0.07
<sup>93</sup> Nb	1.53	0.78	0.91	1.51	0.80	1.69	1.20	1.41	1.54	1.31	1.72	1.35	1.34	1.42	1.51	1.34	1.40	1.43
<sup>89</sup> Y	531.6	275.3	271.9	465.6	252.7	602.0	399.8	121.8	142.0	119.2	268.2	203.6	114.7	93.24	98.05	126.0	199.6	148.6
<sup>139</sup> La	0.36	0.07	0.04	0.07	0.02	0.06	0.10	0.93	0.56	0.31	0.24	0.17	0.51	0.49	0.66	0.42	0.28	0.46
<sup>140</sup> Ce	15.11	5.88	8.29	13.64	8.05	16.21	11.20	25.55	25.91	21.27	24.64	20.24	18.97	29.91	32.01	19.43	18.41	23.63
<sup>141</sup> Pr	0.25	0.08	0.07	0.12	0.06	0.14	0.12	0.95	0.85	0.66	0.53	0.45	0.60	0.99	1.07	0.61	0.46	0.72
<sup>146</sup> Nd	2.81	1.10	1.03	1.79	1.08	2.06	1.64	7.64	6.95	5.73	5.78	5.01	5.06	8.80	9.30	5.81	4.44	6.45
<sup>147</sup> Sm	4.02	1.72	1.89	3.10	1.87	3.66	2.71	4.08	4.22	3.77	6.89	5.08	3.52	3.83	4.55	3.55	4.18	4.37
<sup>153</sup> Eu	0.91	0.45	0.44	0.65	0.42	0.70	0.60	0.86	0.87	0.86	1.64	1.24	0.70	0.74	0.81	0.82	1.11	0.97
<sup>157</sup> Gd	17.35	7.58	8.62	14.82	8.48	17.92	12.46	8.54	9.54	8.64	19.54	14.57	8.21	6.88	7.59	8.72	13.12	10.54
<sup>159</sup> Tb	5.65	2.56	2.83	4.86	2.74	6.13	4.13	2.09	2.26	2.05	4.83	3.55	2.05	1.57	1.70	2.02	3.44	2.55
<sup>163</sup> Dy	57.22	27.38	27.95	49.53	26.79	63.27	42.02	17.14	19.34	16.69	38.67	30.04	16.17	13.27	13.96	17.27	28.61	21.12

续表 1

Continued Table 1

Element	78-1450-2							Mar-3										
	02	03	04	05	06	07	Avg.	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	Avg.
<sup>165</sup> Ho	20.31	10.12	9.94	17.75	9.47	22.90	15.08	4.22	4.80	4.18	9.37	7.21	3.92	3.23	3.39	4.42	7.01	5.18
<sup>166</sup> Er	78.54	41.69	39.86	69.89	36.53	89.52	59.34	12.65	15.28	11.97	26.74	20.56	12.24	9.25	10.10	13.01	20.71	15.25
<sup>169</sup> Tm	16.77	9.30	8.77	15.11	7.90	19.31	12.86	2.32	2.95	2.28	4.80	3.63	2.19	1.86	1.84	2.43	3.67	2.80
<sup>172</sup> Yb	148.5	85.67	79.23	133.6	70.67	169.7	114.6	21.38	26.38	19.47	42.13	31.74	20.31	16.04	16.09	22.40	32.11	24.81
<sup>175</sup> Lu	27.33	16.43	15.02	24.95	12.98	31.52	21.37	1.94	2.42	1.88	3.58	2.84	1.90	1.42	1.56	2.16	2.91	2.26
<sup>178</sup> Hf	10508	10237	10350	10674	10671	10722	10527	6960	6901	6539	6863	6615	6767	6896	7155	7159	6692	6855
<sup>181</sup> Ta	0.36	0.20	0.26	0.38	0.24	0.46	0.31	0.40	0.43	0.34	0.41	0.37	0.35	0.37	0.39	0.37	0.36	0.38
<sup>204</sup> Pb	0.22	0.21	0.24	0.22	0.21	0.18	0.21	0.24	0.26	0.21	0.17	0.28	0.19	0.32	0.31	0.22	0.23	0.24
<sup>206</sup> Pb	192.5	59.82	77.70	189.9	99.07	253.2	145.4	22.19	22.94	20.72	30.82	24.66	19.06	20.27	25.43	19.44	22.22	22.78
<sup>207</sup> Pb	25.51	7.95	10.47	25.46	13.36	34.10	19.48	2.71	2.83	2.61	3.82	3.10	2.42	2.54	3.14	2.43	2.81	2.84
<sup>208</sup> Pb	7.50	2.53	2.58	6.89	3.54	8.77	5.30	1.77	1.79	1.50	3.12	2.36	1.36	1.70	2.07	1.53	2.17	1.94
<sup>238</sup> U	151.8	45.94	60.37	146.5	80.33	191.3	112.7	16.25	16.77	14.64	23.54	18.17	14.04	14.87	18.87	14.55	16.64	16.83
<sup>232</sup> Th	49.25	15.01	16.31	44.28	23.02	55.59	33.91	8.34	8.39	7.15	15.38	11.48	6.99	7.79	10.90	7.53	10.92	9.49

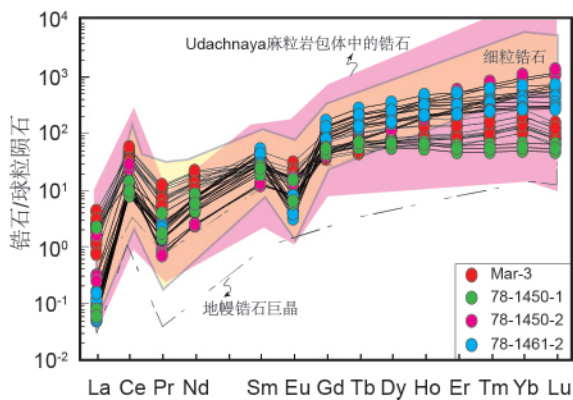


图3 雅库特金伯利岩古老锆石球粒陨石标准化稀土元素配分图解(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

图中淡黄色、浅粉色和虚线区域分别代表西伯利亚雅库特地区金伯利岩中的细粒锆石(Kostrovitsky *et al.*, 2016)、Udachnaya 麻粒岩包体中的锆石(Koreshkova *et al.*, 2009)和地幔锆石(即能够确定金伯利岩年龄的锆石, Sun *et al.*, 2018)

Fig. 3 Chondrite-normalized rare earth element patterns of ancient zircon megacrysts from Yakutia kimberlite (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

表 1。它们都表现出明显的 Eu 负异常(图 3)和较高的稀土总量。锆石颗粒 Mar-3 具有相对较低的 U ( $16.83 \times 10^{-6}$ )、Th ( $9.49 \times 10^{-6}$ ) 含量, Th/U 比值为 0.56; 其余三颗锆石巨晶具有相对较高的 U ( $103.2 \times 10^{-6} \sim 112.7 \times 10^{-6}$ )、Th ( $33.91 \sim 67.90 \times 10^{-6}$ ) 含量, Th/U 比值介于 0.32 ~ 0.66 之间(表 1)。

### 3.2 U-Pb 年龄

四颗锆石巨晶具有前寒武纪的 U-Pb 同位素年龄(1.8 ~

1.9Ga, 表 2 和图 4)。这一年龄与它们对应的金伯利岩区或金伯利岩管的其它锆石巨晶年龄都不同, 远大于雅库特地区最早的金伯利岩喷发时代。来自 Kuranakh 金伯利岩区 Markiza 岩管的 Mar-3 锆石巨晶  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $1819 \pm 7\text{Ma}$ (图 4a), 与同一岩管的另外两颗锆石巨晶年龄 ( $220.3 \pm 2.9\text{Ma}$ 、 $223.6 \pm 3.4\text{Ma}$ ; Sun *et al.*, 2018) 不同; Beriginde 金伯利岩区 Gorelaya 岩管的 78-1461-2 锆石巨晶  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄为  $1912 \pm 6\text{Ma}$ (图 4b), 超出该岩管的其它锆石巨晶年龄范围 ( $159.2 \sim 160.9\text{Ma}$ ; Sun *et al.*, 2018); Luchakan 金伯利岩区的 78-1450-1 和 75-1450-2 两颗锆石巨晶  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄分别为  $1965 \pm 12\text{Ma}$  和  $1925 \pm 8\text{Ma}$ (图 4c, d), 早于这一地区的其它锆石巨晶年龄 ( $222.2 \sim 225.4\text{Ma}$ ; Sun *et al.*, 2018)。

### 3.3 Hf 同位素特征

四颗锆石巨晶的 Hf 同位素数据见表 3。它们由具有较多放射性成因的 Hf 同位素组成,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  同位素比值集中在  $0.281375 \sim 0.281668$ ,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值分别为  $-8.9$ 、 $-6.3$ 、 $1.1$  和  $3.7$ 。Mar-3 和 78-1461 具有负的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值, 其余两颗来自同一岩管的锆石巨晶具有正的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(图 5)。四颗锆石巨晶具有较老的  $t_{\text{DM}}$  年龄 ( $2.1 \sim 2.5\text{Ga}$ )。

## 4 讨论

### 4.1 西伯利亚雅库特金伯利岩中古老锆石巨晶的来源

花岗岩等硅饱和的岩石中锆石的颗粒大小一般在  $200\mu\text{m}$  左右, 而金伯利岩中的锆石可以分为细粒锆石和巨晶锆石。细粒锆石颗粒较完整, 粒径一般小于  $200\mu\text{m}$ 。金伯利

表 2 西伯利亚雅库特金伯利岩中古老锆石巨晶的 U-Pb 同位素组成

Table 2 U-Pb isotopic compositions of ancient zircon megacrysts from Yakutia kimberlite, Siberia

Spot No.	U Th		Th/U	isotopic compositions						$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ weighted average age	
	( $\times 10^{-6}$ )			$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$2\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$2\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$2\sigma$	(Ma)	$2\sigma$
78-1461-2											
01	112.7	78.92	0.70	0.11632	0.00128	5.61790	0.06060	0.35030	0.00683	1901	20
02	107.6	63.05	0.59	0.11710	0.00140	5.66053	0.06544	0.35063	0.00693	1912	21
03	133.8	93.70	0.70	0.11730	0.00129	5.90639	0.06389	0.36522	0.00713	1916	20
04	119.7	96.57	0.81	0.11726	0.00120	5.79371	0.05846	0.35839	0.00692	1915	18
05	84.16	50.49	0.60	0.11723	0.00121	5.71147	0.05809	0.35337	0.00684	1915	18
06	98.96	62.26	0.63	0.11712	0.00126	5.53785	0.05872	0.34295	0.00669	1913	19
07	100.2	56.59	0.56	0.11749	0.00129	5.76179	0.06226	0.35571	0.00696	1918	20
08	113.9	81.43	0.71	0.11695	0.00145	5.61271	0.06733	0.34810	0.00696	1910	22
09	76.85	46.91	0.61	0.11685	0.00129	5.63291	0.06115	0.34966	0.00686	1909	20
10	83.99	49.10	0.58	0.11724	0.00126	5.23434	0.05546	0.32382	0.00633	1915	19
Mar-3											
01	16.25	8.34	0.51	0.11054	0.00136	5.09866	0.05869	0.33430	0.00628	1808	22
02	16.77	8.39	0.50	0.10974	0.00136	5.0645	0.05855	0.33446	0.00629	1795	22
03	14.64	7.15	0.49	0.11202	0.00138	5.16881	0.05948	0.33441	0.00629	1832	22
04	23.54	15.38	0.65	0.10956	0.00127	5.04212	0.05481	0.33355	0.0062	1792	21
05	18.17	11.48	0.63	0.11115	0.00132	5.06408	0.05612	0.33022	0.00616	1818	21
06	14.04	6.99	0.50	0.11248	0.00154	5.09557	0.06484	0.32831	0.00632	1840	25
07	14.87	7.79	0.52	0.11318	0.00146	5.13858	0.06178	0.32906	0.00625	1851	23
08	18.87	10.90	0.58	0.11102	0.00148	4.98113	0.06173	0.32519	0.00622	1816	24
09	14.55	7.53	0.52	0.11088	0.00151	4.95968	0.06297	0.32418	0.00624	1814	25
10	16.64	10.92	0.66	0.11293	0.00208	5.09493	0.08667	0.32697	0.0069	1847	33
78-1450-1											
01	113.2	45.25	0.40	0.11802	0.00136	6.13585	0.07075	0.37700	0.0077	1926	20
02	100.6	39.18	0.39	0.11783	0.0019	5.66707	0.08759	0.34874	0.00764	1924	29
03	115.4	49.08	0.43	0.11782	0.00136	5.23678	0.06049	0.32229	0.0066	1924	21
78-1450-2											
02	151.8	49.25	0.32	0.11782	0.00112	5.59253	0.05546	0.34420	0.00689	1923	17
03	45.94	15.01	0.33	0.11803	0.00123	5.71157	0.0608	0.35092	0.00711	1927	19
04	60.37	16.31	0.27	0.1182	0.0015	5.51262	0.06916	0.33820	0.00708	1929	23
05	146.5	44.28	0.30	0.11807	0.00128	5.49182	0.06049	0.33732	0.0069	1927	19
06	80.33	23.02	0.29	0.11774	0.00121	5.86792	0.06211	0.36143	0.00735	1922	18
07	191.3	55.59	0.29	0.1178	0.00127	5.58112	0.06128	0.34362	0.00704	1923	19

岩中的巨晶锆石一般是不完整的锆石颗粒,粒径在毫米到厘米级别,其完整的颗粒粒径可能更大。西伯利亚雅库特地区金伯利岩中的锆石按照形态学、微量元素、年代学和同位素特征可以分为细粒锆石、能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶和古老的锆石巨晶。前人研究表明细粒锆石颗粒一般是金伯利岩上升时从地壳中捕获的,具有多期次的年龄(Kostrovitsky *et al.* 2016);能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶来源于岩石圈地幔或软流圈地幔(Griffin *et al.* 2000; Sun *et al.* 2018);那么,雅库特金伯利岩中的古老锆石巨晶是来

源于哪里呢?

很明显,本次研究中的四颗古老锆石巨晶的 U-Pb 年龄不能代表寄主金伯利岩的年龄。这些年龄集中在 1.8 ~ 1.9Ga 左右的古老锆石巨晶,受到 160 ~ 220Ma 寄主金伯利岩喷发事件的影响较小。古老的锆石巨晶在其它地区的金伯利岩中也有发现,这些古老的锆石巨晶通常具有两个共同特点:(1)大多数具有负的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值,如 Kaapvaal 克拉通的 Jwaneng 古老锆石巨晶(2.1 ~ 2.7Ga),其  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值范围为 -3.4 ~ -5.4(Griffin *et al.* 2000);虽然本次研究中有两颗

表3 西伯利亚雅库特金伯利岩中古老锆石巨晶的 Hf 同位素组成

Table 3 Hf isotopic compositions of ancient zircon megacrysts from Yakutia kimberlite, Siberia

Spot No.	Age (Ma)	Lu ( $\times 10^{-6}$ )	Hf ( $\times 10^{-6}$ )	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$
Mar-3								
01				0.000041	0.281382	0.000016	-9.1	2547
02				0.000045	0.281383	0.000016	-9.1	2546
03				0.000036	0.281389	0.000018	-8.9	2538
04				0.000073	0.281366	0.000016	-9.7	2571
05	1819	2.26	6855	0.000078	0.281373	0.000017	-9.5	2562
06				0.000062	0.281360	0.000016	-9.9	2578
07				0.000030	0.281379	0.000017	-9.2	2551
08				0.000030	0.281353	0.000017	-10.1	2585
09				0.000039	0.281369	0.000017	-9.6	2564
10				0.000039	0.281352	0.000017	-10.2	2587
78-1461-2								
01				0.000158	0.281359	0.000018	-7.2	2585
02				0.000089	0.281346	0.000017	-7.6	2598
03				0.000142	0.281391	0.000020	-6.1	2542
04				0.000107	0.281420	0.000019	-5.0	2501
05	1912	9.40	10804	0.000146	0.281400	0.000020	-5.8	2530
06				0.000099	0.281344	0.000019	-7.7	2601
07				0.000098	0.281393	0.000017	-5.9	2536
08				0.000094	0.281420	0.000019	-5.0	2500
09				0.000081	0.281380	0.000019	-6.4	2552
10				0.000092	0.281376	0.000018	-6.5	2558
78-1450-1								
01	1924	1.31	9844	0.000023	0.281598	0.000021	2.3	2258
02				0.000019	0.281590	0.000019	2.1	2267
03				0.000016	0.281613	0.000021	2.9	2237
04				0.000016	0.281590	0.000020	2.1	2267
05				0.000026	0.281553	0.000021	0.7	2317
78-1450-2								
01				0.000194	0.281667	0.000021	3.6	2175
02				0.000236	0.281639	0.000023	2.6	2214
03				0.000213	0.281680	0.000021	4.1	2159
04	1925	21.37	10527	0.000368	0.281695	0.000021	4.4	2146
05				0.000163	0.281656	0.000022	3.3	2188
06				0.000351	0.281671	0.000023	3.6	2178
07				0.000322	0.281663	0.000023	3.3	2188

锆石巨晶的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为正值,但另外两颗锆石巨晶  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-8.9 \sim -6.3$ 。(2) 具有明显的 Eu 负异常和较高的重稀土 (HREE) 含量,这与雅库特地区金伯利岩中的细粒锆石和 Udachnaya 麻粒岩包体中锆石的特征十分相似(图3),暗示它们的源区存在壳源组分。因此,对于金伯利岩中古老锆石巨晶或许可以解释为地壳来源或在壳幔相互作用过程中形成的。Valley *et al.* (1998) 也将 Jwaneng 前寒武纪锆石巨晶较低的  $\delta^{18}\text{O}$  值解释为太古宙俯冲洋壳与海水之间的水岩反

应,暗示着 Jwaneng 的古老锆石巨晶可能是洋壳与地幔相互作用的结果。虽然粒径如此大的锆石巨晶在地壳中不常见,但国际锆石标样 91500(加拿大 Ontario),单颗粒重达为 238g,就是世界上最大的地壳锆石之一(Wiedenbeck *et al.*, 1995; Horn *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2006)。1.8 ~ 1.9Ga 是西伯利亚克拉通拼合、地壳生长和碱性/碳酸岩广泛发育的时期(Kostrovitsky *et al.*, 2016),因此雅库特地区这些古老的锆石巨晶很有可能在这一事件中形成,并保持着 U-Pb 体系封



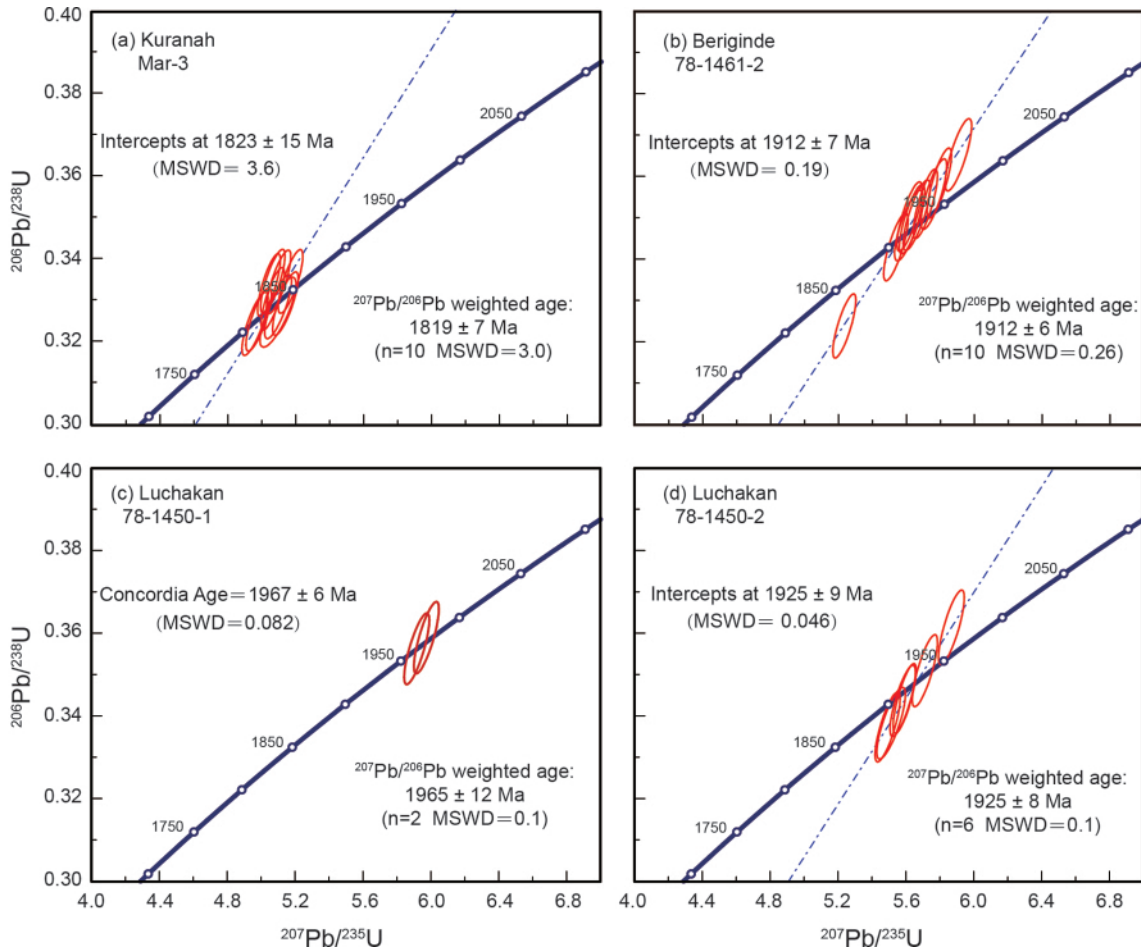


图4 雅库特金伯利岩中古老锆石巨晶 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams for four old zircon megacrysts from Yakutia Kimberlite

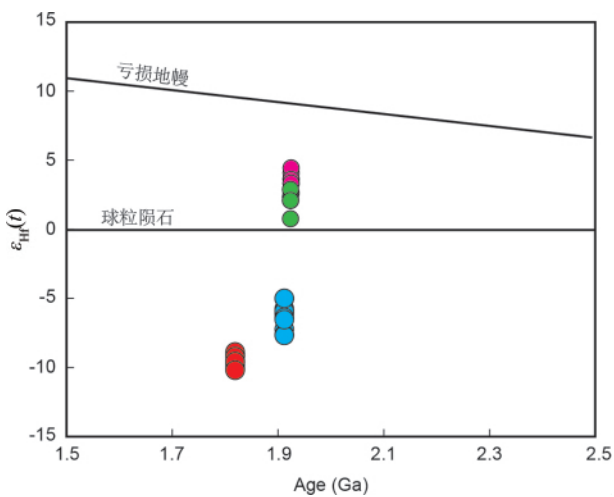


图5 雅库特金伯利岩中古老锆石 Hf 同位素组成

亏损地幔和球粒陨石演化线引自吴福元等 2007; 图例同图3

Fig. 5 Initial Hf isotopic compositions of four old zircon megacrysts from Yakutia kimberlite plotted over their ages

闭状态, 而后再被金伯利岩携带至地表。

#### 4.2 如何区分金伯利岩中不同来源的锆石巨晶

金伯利岩中能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶形成后, 其 U-Pb 体系在高温的地幔中是处于开放状态的, 寄主金伯利岩浆的喷发使锆石巨晶的 U-Pb 体系封闭 (Kinny *et al.*, 1989; Sun *et al.*, 2018)。因此, 这些锆石巨晶一直是金伯利岩定年的重要矿物之一。然而, 金伯利岩中古老锆石巨晶的存在, 让我们不得不讨论如何区分金伯利岩中不同来源的锆石巨晶, 有效地将能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶挑选出来用于准确的金伯利岩定年。我们统计了多个地区金伯利岩中锆石巨晶, 对 CL 图像、微量元素、Hf 和 O 同位素等特征分别进行了讨论。

##### 4.2.1 CL 图像特征

CL 图像可以显示锆石的形态学特征。能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶按照内部结构可以分为以下几种类型: 无环带结构、轻微/弱环带结构、清晰的振荡环带结构, 其中大多数为无环带结构和轻微/弱环带结构。而绝大多数古老的锆石巨晶具有核边结构或明显的振荡环带, 只有少数显示出



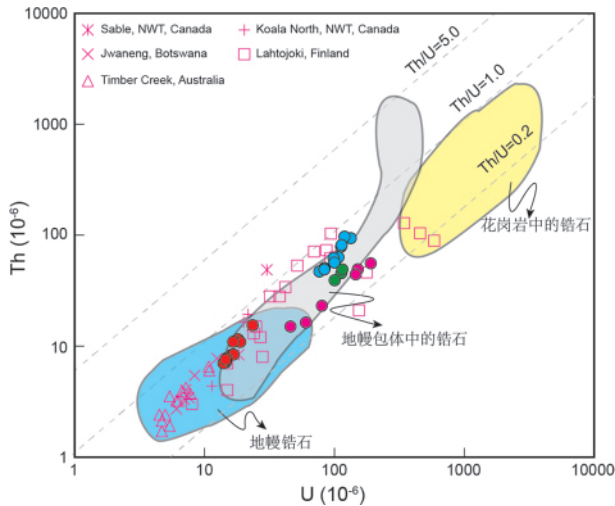


图6 雅库特金伯利岩中古老锆石巨晶的 U-Th 关系图 (据 Konzett *et al.*, 1998 修改)

图中投点的锆石巨晶均为具有古老年龄的锆石巨晶, 数据据: Koala North, Sable, NWT, Canada (Zartman and Richardson 2005); Jwaneng, Botswana, Timber Creek, Canada (Griffin *et al.*, 2000); Lahtojoki, Finland (Peltonen and Mänttari, 2001). 其他图例同图3  
Fig. 6 U vs. Th contents in ancient zircon megacrysts from Yakutia kimberlite (modified after Konzett *et al.*, 1998)

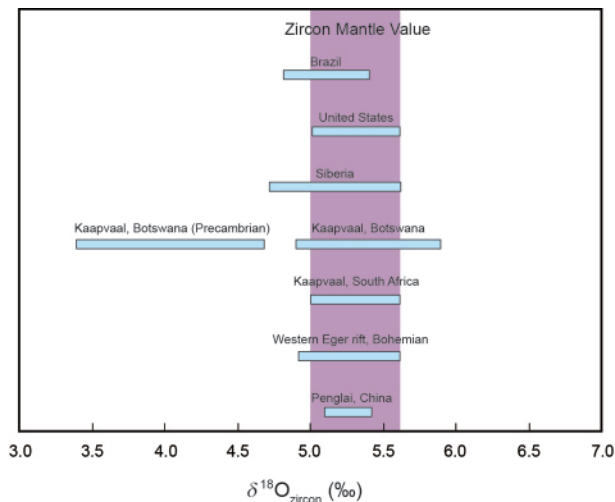


图7 锆石巨晶氧同位素组成 (据 Page *et al.*, 2007; Valley *et al.*, 1998 修改)

数据来源: 中国蓬莱引自 Li *et al.* (2010); Western Eger rift 引自 Siebel *et al.* (2009)

Fig. 7 Oxygen isotopic compositions of zircon megacrysts (modified after Page *et al.*, 2007; Valley *et al.*, 1998)

无环带的特征(如 Mar-3)。因此,如果在 CL 图像中可以清晰地看到锆石巨晶具有核边结构,则该锆石巨晶更有可能是古老的,不能用于金伯利岩年龄的确定。而如果表现出其它形态学上的特征则需要进一步的确认。

#### 4.2.2 Th、U 含量和微量元素特征

Th、U 含量和微量元素特征一直是判断锆石来源的重要指标。从我们统计的数据来看,绝大多数能够确定金伯利岩年龄的锆石的 U 和 Th 含量均小于  $100 \times 10^{-6}$ ,一般在  $10 \times 10^{-6}$  左右(图 6),具有较低的稀土元素总量( $\Sigma$  REE 含量  $< 200 \times 10^{-6}$ ) (Kinny *et al.*, 1989; Schärer *et al.*, 1997; Berryman *et al.*, 1998; Griffin *et al.*, 2000; Peltonen and Mänttari 2001; Spetsius *et al.*, 2002; Zartman and Richardson, 2005; McInnes *et al.*, 2009; Robles-Cruz *et al.*, 2012)。也有少数能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶 U 或 Th 含量大于  $100 \times 10^{-6}$  (Griffin *et al.*, 2000; Robles-Cruz *et al.*, 2012; Sun *et al.*, 2018),而古老锆石巨晶的 U、Th 含量和稀土元素总量具有较大的变化范围,从图 6 中可以看到有很多古老锆石巨晶的 U、Th 含量也落在了地幔锆石区域中。在稀土元素配分曲线上(图 3),西伯利亚雅库特金伯利岩中的两种锆石巨晶也有一定的重合,古老锆石巨晶具有相对较高的轻稀土含量。Th/U 比值也常被用来区分不同来源的锆石,但从图 6 中可以看出,能够确定金伯利岩年龄的锆石、古老锆石和花岗岩中的锆石的 Th/U 比值并没有较大的区别。因此, U、Th 含量、Th/U 比值和稀土元素总量都不能很好地区分能够确定金伯利岩年龄的锆石和古老锆石巨晶。

Eu 的异常可以反映锆石母岩浆源区是否有长石等矿物的分异,进而反映锆石的来源。能够确定金伯利岩年龄的锆石主要来源于岩石圈地幔,一般不具有 Eu 的异常,统计的近 200 颗地幔锆石巨晶中,约 80% 的锆石巨晶  $Eu/Eu^*$  值在 1.3 ~ 0.8 之间。古老锆石巨晶主要在地壳或壳幔相互作用过程中形成,常表现出强烈的 Eu 负异常,  $Eu/Eu^*$  值  $< 0.6$ 。但统计结果也显示有少量能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶表现出强烈的 Eu 负异常,其  $Eu/Eu^*$  值低至 0.24。因此,锆石的 Eu 异常虽然有潜力区分出古老锆石巨晶和能够确定金伯利岩年龄的锆石,但仍需结合其它特征进行综合判断。

#### 4.2.3 Hf-O 同位素特征

我们统计了近 300 颗金伯利岩中能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶 Hf 同位素组成,其中有大约 80% 具有正的  $\varepsilon_{Hf}(t)$  值,但也存在约 60 多颗锆石巨晶具有负的  $\varepsilon_{Hf}(t)$  值,如南非克拉通 Orapa 金伯利岩中存在大量的 U-Pb 年龄为 90Ma 的锆石巨晶,其  $\varepsilon_{Hf}(t)$  值可低至 -16 左右。与之相反,统计的 47 颗古老的锆石巨晶有 45 颗具有负的  $\varepsilon_{Hf}(t)$  值。在本次研究中有两颗古老锆石巨晶  $\varepsilon_{Hf}(t)$  值为正(表 3)。所以  $\varepsilon_{Hf}(t)$  值不能绝对地将能够确定金伯利岩年龄的和古老锆石巨晶进行有效的区分。但我们发现,它们在  $t_{DM}$  值上表现出较大的差异,能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶  $t_{DM}$  一般也较为年轻 ( $< 1.8$  Ga),而古老锆石巨晶的  $t_{DM}$  则一般大于 2.0 Ga。因此,  $t_{DM}$  在区分锆石巨晶上表现出一定的潜力。

已有的数据显示(图 7),能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶具有地幔的氧同位素特征(4.7‰ ~ 5.9‰; Valley *et al.*, 1998, 2003; Page *et al.*, 2007; Siebel *et al.*, 2009; Li *et al.*,

2010) 如西伯利亚金伯利岩中能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶  $\delta^{18}\text{O}$  的平均值为  $5.3 \pm 0.2\%$  (Valley *et al.*, 1998; Page *et al.*, 2007) 在地幔  $\delta^{18}\text{O}$  值范围内 ( $5.3 \pm 0.3\%$ ; Valley *et al.*, 2003) 暗示着这些锆石巨晶来源于岩石圈地幔或软流圈 (Valley *et al.*, 1998)。虽然古老锆石巨晶的氧同位素分析数据有限, 但仅有的几个氧同位素分析结果显示古老锆石巨晶的  $\delta^{18}\text{O}$  值远离地幔值, 暗示着 O 同位素可能可以用来区分古老锆石巨晶和能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶。

## 5 结论

(1) 西伯利亚雅库特金伯利岩中具有前寒武纪时代的锆石巨晶, 无论在 Hf 同位素还是微量元素特征上都与能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶明显不同。它们是寄主岩浆在上升过程中捕获的地壳来源或壳幔相互作用过程中形成的锆石。这四颗前寒武纪锆石巨晶的 U-Pb 年龄在  $1.8 \sim 1.9\text{Ga}$  左右, 可能是在西伯利亚克拉通拼合、地壳生长和碱性/碳酸岩广泛发育的时期形成的。

(2) 通过统计和对比了来自多个克拉通金伯利岩中古老锆石巨晶和能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶的形态学、微量元素、U、Th 及微量元素含量和 Hf-O 同位素特征, 可以看出金伯利岩中的古老锆石巨晶在  $t_{\text{DM}}$  年龄和 O 同位素组成上与能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶具有明显的差别。相比于金伯利岩中的能够确定金伯利岩年龄锆石巨晶, 古老的锆石巨晶可能具有核边结构、常具有  $\delta\text{Eu}$  的负异常、高的 U、Th 含量、负的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值、古老的  $t_{\text{DM}}$  年龄以及地幔氧同位素范围之外的 O 同位素组成, 这些参数在未来的研究中可以用来区分金伯利岩中古老锆石巨晶和能够确定金伯利岩年龄的锆石巨晶。

致谢 感谢三位匿名审稿人对本文提出的宝贵意见。读者如需要电子版附件数据可向作者索取。

## References

- Agashev AM, Chervyakovskaya MV, Serov IV, Tolstov AV, Agasheva EV and Votyakov SL. 2020. Source rejuvenation vs. re-heating: Constraints on Siberian kimberlite origin from U-Pb and Lu-Hf isotope compositions and geochemistry of mantle zircons. *Lithos*, 364-365: 105508
- Berryman AK, Stiefenhofer J, Shee SR and Wyatt BA. 1998. The discovery and geology of the Timber Creek kimberlites, Northern Territory, Australia. In: *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Kimberlite Conference*. Cape Town, 84-86
- Griffin WL, Ryan CG, Kaminsky FV, O'Reilly SY, Natapov LM, Win LM, Kinny PD and Ilupin IP. 1999. The Siberian lithosphere traverse: Mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton. *Tectonophysics*, 310(1-4): 1-35
- Griffin WL, Pearson NJ, Belousova E, Jackson SE, Van Acherbergh E, O'Reilly SY and Shee SR. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133-147
- Horn I, Rudnick RL and McDonough WF. 2000. Precise elemental and isotope ratio determination by simultaneous solution nebulization and laser ablation-ICP-MS: Application to U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 164(3-4): 281-301
- Jackson SE, Pearson NJ, Griffin WL and Belousova EA. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211(1-2): 47-69
- Kinny PD, Compston W, Bristow JW and Williams IS. 1989. Archean mantle xenocrysts in a Permian kimberlite: Two generations of kimberlitic zircon in Jwaneng DK2, southern Botswana. *Geological Society of Australia Special Publication*, 14: 833-842
- Konzett J, Armstrong RA, Sweeney RJ and Compston W. 1998. The timing of MARID metasomatism in the Kaapvaal mantle: An ion probe study of zircons from MARID xenoliths. *Earth and Planetary Science Letters*, 160(1-2): 133-145
- Koreshkova MY, Downes H, Nikitina LP, Vladykin NV, Larionov AN and Sergeev SA. 2009. Trace element and age characteristics of zircons in granulite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Siberia. *Precambrian Research*, 168(3-4): 197-212
- Kostrovitsky IS, Skuzovatov SY, Yakovlev DA, Sun J, Nasdala L and Wu FY. 2016. Age of the Siberian craton crust beneath the northern kimberlite fields: Insights to the craton evolution. *Gondwana Research*, 39: 365-385
- Kresten P, Fels P and Berggren G. 1975. Kimberlitic zircons—a possible aid in prospecting for kimberlites. *Mineralium Deposita*, 10(1): 47-56
- Li XH, Long WG, Li QL, Liu Y, Zheng YF, Yang YH, Chamberlain KR, Wan DF, Guo CH, Wang XC and Tao H. 2010. Penglai Zircon megacrysts: A potential new working reference material for microbeam determination of Hf-O isotopes and U-Pb age. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 34(2): 117-134
- McInnes BIA, Evans NJ, McDonald BJ, Kinny PD and Jakimowicz J. 2009. Zircon U-Th-Pb-He double dating of the Merlin kimberlite field, Northern Territory, Australia. *Lithos*, 112(S1): 592-599
- Morel MLA, Nebel O, Nebel-Jacobsen YJ, Miller JS and Vroon PZ. 2008. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS. *Chemical Geology*, 255(1-2): 231-235
- Nutman AP, Chernyshev IV, Baadsgaard H and Smelov AP. 1992. The Aldan shield of Siberia, USSR: The age of its Archaean components and evidence for widespread reworking in the Mid-Proterozoic. *Precambrian Research*, 54(2-4): 195-210
- Page FZ, Fu B, Kita NT, Fournelle J, Spicuzza MJ, Schulze DJ, Viljoen F, Basei MAS and Valley JW. 2007. Zircons from kimberlite: New insights from oxygen isotopes, trace elements, and Ti in zircon thermometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(15): 3887-3903
- Peltonen P and Mänttari I. 2001. An ion microprobe U-Th-Pb study of zircon xenocrysts from the Lahtojoki kimberlite pipe, eastern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 73(1-2): 47-58
- Robles-Cruz SE, Escayola M, Jackson S, Galí S, Pervov V, Watangua M, Gonçalves A and Melgarejo JC. 2012. U-Pb SHRIMP geochronology of zircon from the Catoca kimberlite, Angola: Implications for diamond exploration. *Chemical Geology*, 310-311: 137-147
- Rosen OM, Manakov AV and Suvorov VD. 2005. The collisional system in the northeastern Siberian craton and a problem of diamond-bearing lithospheric keel. *Geotectonics*, 39(6): 456-479
- Schärer U, Corfu F and Demaiffe D. 1997. U-Pb and Lu-Hf isotopes in baddeleyite and zircon megacrysts from the Mbuji-Mayi kimberlite: Constraints on the subcontinental mantle. *Chemical Geology*, 143(1-2): 1-16
- Siebel W, Schmitt AK, Danišik M, Chen FK, Meier S, Weiß S and Eroğlu S. 2009. Prolonged mantle residence of zircon xenocrysts from the western Eger rift. *Nature Geoscience*, 2(12): 886-890
- Sláma J, Košler J, Condon DJ, Crowley JL, Gerdes A, Hanchar JM,

- Horstwood MSA, Morris GA, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett MN and Whitehouse MJ. 2008. Plešovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1-2): 1-35
- Spetsius ZV, Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly SY and Pearson NJ. 2002. Archean sulfide inclusions in Paleozoic zircon megacrysts from the Mir kimberlite, Yakutia: Implications for the dating of diamonds. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(1-2): 111-126
- Spetsius ZV. 2004. Petrology of highly aluminous xenoliths from kimberlites of Yakutia. *Lithos*, 77(1-4): 525-538
- Sun J, Liu CZ, Tappe S, Kostrovitsky SI, Wu FY, Yakovlev D, Yang YH and Yang JH. 2014. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: Insights from in situ U-Pb and Sr-Nd perovskite isotope analysis. *Earth and Planetary Science Letters*, 404: 283-295
- Sun J, Tappe S, Kostrovitsky SI, Liu CZ, Skuzovatov SY and Wu FY. 2018. Mantle sources of kimberlites through time: A U-Pb and Lu-Hf isotope study of zircon megacrysts from the Siberian diamond fields. *Chemical Geology*, 479: 228-240
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and Isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313-345
- Valley JW, Kinny PD, Schulze DJ and Spicuzza MJ. 1998. Zircon megacrysts from kimberlite: Oxygen isotope variability among mantle melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 133(1): 1-11
- Valley JW, Bindeman IN and Peck WH. 2003. Empirical calibration of oxygen isotope fractionation in zircon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(17): 3257-3266
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, Von Quadt A, Roddick JC and Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1-23
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1-2): 105-126
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185-220 (in Chinese with English abstract)
- Xie LW, Zhang YB, Zhang HH, Sun JF and Wu FY. 2008. In situ simultaneous determination of trace elements, U-Pb and Lu-Hf isotopes in zircon and baddeleyite. *Chinese Science Bulletin*, 53(10): 1565-1573
- Zartman RE and Richardson SH. 2005. Evidence from kimberlitic zircon for a decreasing mantle Th/U since the Archean. *Chemical Geology*, 220(3-4): 263-283

#### 附中文参考文献

- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. *岩石学报*, 23(2): 185-220