文章编号: 0254 - 5357(2012)04 - 0705 - 06

赣南路迳似金伯利岩(金伯利质煌斑岩)锆石的特点和年龄及其构造意义

王登红[1], 陈振宇[1], 许建祥[2], 刘善宝[1]
(1. 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
2. 江西省国土资源厅, 江西 南昌 330000)

摘要: 南岭以花岗岩广泛分布闻名于世,但也存在基性超基性侵入岩。位于赣南安远蔡坊镇的路迳似金伯利岩(金伯利质煌斑岩)就是其中之一。本研究在野外调研的基础上,利用高灵敏高分辨离子探针(SHRIMP)锆石定年技术对其成岩时代进行了研究,获得其 U - Pb 年龄为 132.0 Ma(变化于 128.7 ~ 135.4 Ma)。同时还发现了早期锆石捕获晶,其年龄为 1945 Ma,意味着赣南地区存在古元古代的基底。这一结果一方面弥补了原先根据 K - Ar 法和 Rb - Sr 法将似金伯利岩定为新生代的不足,为探讨赣南地区大地构造演化历史提供了准确资料;同时也表明燕山晚期的构造体制转换与壳幔相互作用是有关的,似金伯利岩岩浆可能起源于富集地幔。

关键词: 路迳似金伯利岩(金伯利质煌斑岩); 锆石 U - Pb 定年; 燕山晚期; 富集地幔
中图分类号: P597.3; P612 **文献标识码:** A

The Characteristics and Age of Zircon in Lujing Kimberlite-like Rock (Kimberlitic Lamprophyre) in Southern Jiangxi and Its Tectonic Significance

WANG Deng-hong[1], *CHEN Zhen-yu*[1], *XU Jian-xiang*[2], *LIU Shan-bao*[1]
(1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
2. Department of Land and Resources of Jiangxi Province, Nanchang 330000, China)

Abstract: The Nanling area is famous for its widely distributed granites, however, there are also many mafic to ultra-mafic intrusion, Lujing kimberlite-like rock (kimberlitic lamprophyre), located in Caifang Town, Anyuan Country of South Jiangxi province, being one of these intrusions. Based on a field survey, we investigated the rock formation time of Lujing by SHRIMP zircon U-Pb dating, and determined its age as 132.0 Ma (range in 128.7 - 135.4 Ma). Meanwhile, early xenocryst of 1945 Ma old was found, which indicates that there is a Palaeoproterozoic basement in the South Jiangxi area. Firstly, this result revises the previous determination of the Lujing kimberlite-like rock as Caenozoic by K-Ar and Rb-Sr dating method, and provides new correct data for investigating the evolutionary history of tectonic structures of the South Jiangxi area. Secondly, this result indicates that the transformation of the tectonic system in the late Yanshanian period is related to the interaction of crust and mantle, and the magma of the Lujing kimberlite-like rock may have originated from enriched mantle.

Key words: Lujing kimberlite-like rock (kimberlitic lamprophyre); zircon U-Pb dating; late Yanshanian; enriched mantle

收稿日期: 2012 - 01 - 08; **接受日期:** 2012 - 03 - 22
基金项目: 国家深部探测技术与实验研究专项"南岭成矿带地壳岩浆系统结构探测实验"课题(SinoProbe 0301); 中国地质大调查项目"南岭地区岩浆岩成矿专属性研究"(1212011120989); "我国三稀金属资源战略调查"项目(1212011120354); "我国重要矿产和区域成矿规律研究"项目(1212010633903)
作者简介: 王登红,研究员,博士生导师,主要从事矿产资源研究。E-mail: wangdenghong@ sina. com。

路迳似金伯利岩,位于赣州地区安远县蔡坊镇境内。在 1∶20 万寻乌幅称为“路径苦橄玢岩”,在 1∶5 万版石幅则称为“路迳似金伯利岩”,也被称为“路迳金伯利质煌斑岩”[1-2]。本文按照习惯和地质特征称之为似金伯利岩(金伯利质煌斑岩)。虽然赣南地区作为我国石英脉型黑钨矿的主产地,与黑钨矿有关的燕山期花岗岩已经开展了较为深入的研究,但对于大面积花岗岩分布地区的基性超基性岩还少有关注。在 20 世纪 70~80 年代,江西 909 地质队[3]和中国地质大学(武汉)池际尚教授[4]等专门开展了金刚石成矿条件的研究工作,宜昌地质矿产研究所战明国等[5]也开展了构造背景的研究,但发表的成果不多,对其成因、成岩条件,尤其是与常见的钨多金属矿产资源之间是否存在某些方面的联系,认识还不足。2007 年 11 月以来,本课题组先后多次对赣南地区的一些基性超基性岩进行了野外调查,并开展了室内研究,本文利用高灵敏度高分辨率离子探针(SHRIMP)锆石定年技术对路迳似金伯利岩(金伯利质煌斑岩)的成岩时代进行了研究,并对其成岩构造环境和壳幔相互作用及成矿关系进行探讨。

1　地质背景及岩石学特征

路迳似金伯利岩呈圆筒状沿北东东向张性断裂或派生次级断裂侵入于晚侏罗世菖蒲群酸性火山熔岩中,在平面上呈近圆形,直径 6~150 m 不等。以往的区调工作曾发现三个露头,但总出露面积不足 0.1 km^2。本次调研的露头是由 20 世纪 80 年代江西 909 地质队在金刚石资源评价过程中用炸药爆破出来的,目前是一片桔子林地。路迳似金伯利岩见图 1 和图 2。

岩石呈灰绿色-黑色,角砾状、球状构造。碎屑含量可达 50%~60%,可分为同源包体和异源包体,被火山玻璃和火山灰质胶结。其中,同源包体包括超基性岩结核(俗称“凤凰蛋”)、辉石橄榄岩团块和捕虏晶;异源包体包括中酸性火山岩、中酸性超浅成侵入岩、岩屑晶屑凝灰岩等角砾和岩屑。岩石具斑状结构、次生边结构、交代假象结构和交代残余结构等。矿物组合为镁铝榴石、镁橄榄石、次铬透辉石、透辉石、顽火辉石、紫苏辉石、黑云母、镁质钛铁矿和铬尖晶石等。岩石具有自变质和晚期热液交代蚀变的特征,其中,橄榄石、辉石和角闪石等斑晶的边缘常常有 1~2 圈的次变边,其成分与核心矿物基本一致;有时可见橄榄石或斜方辉石具单斜辉石次变边,宽度 0.02~0.04 mm,有时被碳酸盐交代。斜方辉石和橄榄石也常常蛇纹石化、滑石化。碳酸盐化比较常见,常沿解理和裂隙交代橄榄石、辉石和角闪石而形成“假象”。

图 1　路迳似金伯利岩露头

Fig. 1　The outcrop of Lujing kimberlite-like rock

图 2　路迳似金伯利岩(黑色椭圆形者为辉石巨晶)

Fig. 2　Photo of Lujing kimberlite-like rock (dark oval is pyroxene macrocrystalline)

2　样品及分析方法

2.1　样品特点

用于挑选锆石进行 SHRIMP U-Pb 定年的似金伯利岩样品(LJ-1b)采自安远县城北偏东约 20 km 处。显微镜下锆石长度 0.1~0.3 mm,宽度 0.05~0.1 mm,长宽比 2∶1~3∶1,无色透明,浅淡褐红色,具有强玻璃光泽,正方柱锥状,外表光亮,具有熔蚀特征,晶棱大部分不清晰。前人资料显示似金伯利岩中 Zr 含量可达 407.2 μg/g[2],本次从约 2 kg 的半风化岩石(凤凰蛋)中挑选出的锆石颗粒 124 粒,一般呈近等粒状-短柱状,少见长柱状,未见针状(图 3)。有的颗粒见破碎(半贝壳状断口),但一般完整,裂纹不发育(区别于变质岩锆石)。锆石的韵律环带较发育,但往往不如花岗岩中的密集而平行细密,阴极发光图像中发光环带较宽且反差较小,扇形环带不明显,但铀含量普遍在 400 μg/g 以上。

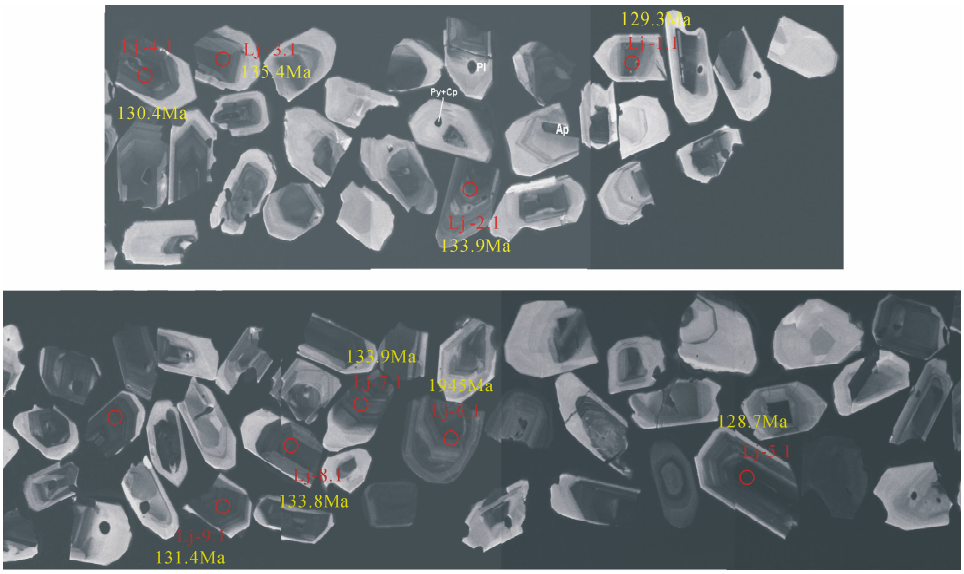

图 3　路迳似金伯利岩中锆石阴极发光图像及 SHRIMP 分析点位和$^{206}Pb/^{238}U$ 视年龄(图中标尺均为 200 μm)

Fig. 3　Cathodoluminescence images of zircons in Lujing kimberlite-like rock with analysis spot of SHRIMP and $^{206}Pb/^{238}U$ apparent age

2.2　分析方法

锆石 SHRIMP U－Pb 年龄分析方法参照文献[6],按常规方法分选出晶形完好、无裂纹和包体少的锆石颗粒,与标准锆石样品(91500)一起粘接在环氧树脂靶上。在年龄分析之前,对样品靶上的待测锆石进行透射光、反射光和阴极发光图像分析,据此选定被测锆石微区分析的点位。锆石微区原位 U－Pb 同位素定年在北京离子探针中心的 SHRIMP Ⅱ仪器上完成。对测定结果用 SHRIMP 定年标准物质对 U－Th 和 Pb 含量及年龄进行校正。

3　分析结果

3.1　锆石 SHRIMP 铀－铅年龄

表 1 列出了路迳似金伯利岩(金伯利质煌斑岩)岩筒中的锆石 SHRIMP U－Pb 年龄测定数据,图 4 为被测锆石的阴极发光图像及测定点位和相应的$^{206}Pb/^{238}U$ 视年龄。由表 1 数据可看出,所有测定点的 Th/U 比值在 0.32～0.98 之间,在阴极发光图像中,被测锆石内部结构清晰,具有岩浆结晶锆石特征。在$^{206}Pb/^{238}U$－$^{207}Pb/^{235}U$ 谐和图上,9 个测点中有 8 个投影在谐和线上或线附近(图 4),这一特征也指示被测锆石未遭受明显的后期热事件的影响。8 个点的$^{206}Pb/^{238}U$ 视年龄为 128.7～135.4 Ma,谐和年龄为(132.0±1.9) Ma,MSWD=0.82。

未投在谐和线上的点是 LJ－6.1,其^{206}Pb 的含量达 291 μg/g,$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 1945 Ma,显示为捕获锆石。在阴极发光图像上也明显可见,LJ－6.1 的测点实际上被另外一个锆石颗粒包裹,即大锆石

表 1　路迳似金伯利岩中锆石的 SHRIMP U－Pb 年龄测定结果

Table 1　SHRIMP U-Pb analysis results of zircons in Lujing kimberlite-like rock

分析点号	$w(^{206}Pb_c)$ /%	w_B/(μg·g^{-1})			同位素比值							$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄/ Ma
		^{238}U	^{232}Th	$^{206}Pb^*$	$^{232}Th/^{238}U$	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	±%	$^{207}Pb^*/^{235}U$	±%	$^{206}Pb^*/^{238}U$	±%	
LJ－1.1	1.46	402	337	7.1	0.87	0.06140	2.5	0.139	8.8	0.02025	2.2	129.3±2.8
LJ－2.1	0.36	939	609	17	0.67	0.04993	1.9	0.1362	3.3	0.02099	2.1	133.9 2.8
LJ－3.1	0.73	666	288	12.2	0.45	0.05510	1.9	0.1442	6.6	0.02123	2.1	135.4 2.9
LJ－4.1	0.32	1432	1306	25.2	0.94	0.05178	1.4	0.1387	3.5	0.02043	2.1	130.4 2.7
LJ－5.1	0.13	2050	1952	35.6	0.98	0.04924	1.2	0.1339	2.8	0.02016	2	128.7 2.6
LJ－6.1	－	961	300	291	0.32	0.12549	0.3	6.1	2.1	0.3522	2	1945 34
LJ－7.1	0.8	733	332	13.3	0.47	0.05130	2.2	0.13	7.7	0.02098	2.1	133.9 2.8
LJ－8.1	0.37	838	419	15.1	0.52	0.05196	1.8	0.1417	5.3	0.02097	2.1	133.8 2.8
LJ－9.1	－	1263	664	22.3	0.54	0.04950	2.2	0.1466	3.6	0.0206	2.1	131.4±2.7

注:误差为 1σ;Pb_c 和 Pb^* 分别代表普通铅和放射成因铅,应用实测的^{204}Pb 对普通铅进行了校正。

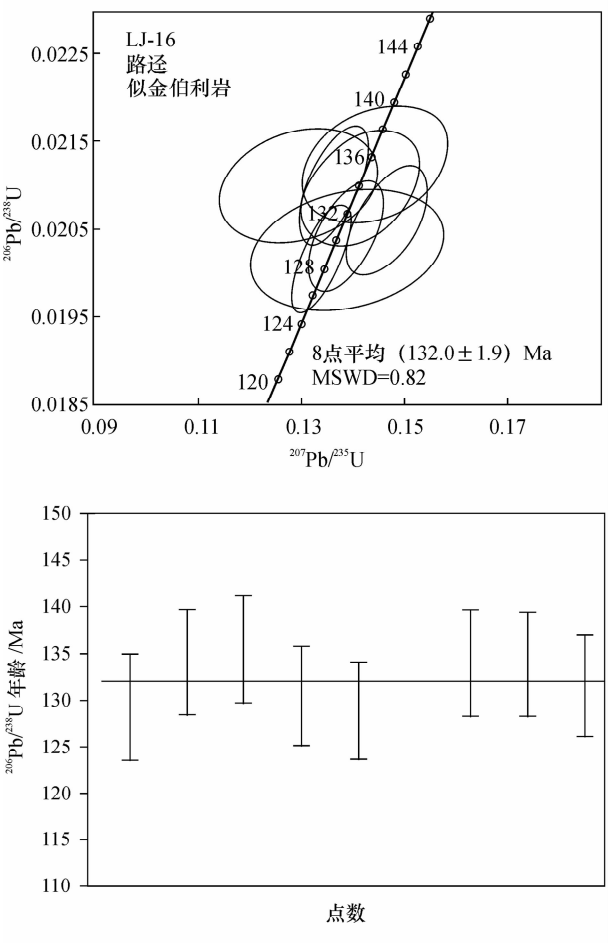

图 4　路迳似金伯利岩锆石 U－Pb 年龄谐和图和$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值

Fig. 4　Zircon U-Pb concordia diagram and age weight mean diagram of Lujing kimberlite-like rock

晶体中含有古元古代的小锆石晶体。这种现象在岩浆岩中是常见的，南岭的花岗岩中普遍可见（“专栏”文章讨论的赣南岩体中就是如此），超基性岩中也不例外。

3.2　锆石中铀和钍的含量

基性岩、超基性岩中锆石的 U、Th 含量通常不高，一般为几十 μg/g[7]，以至于 Pb 含量低而导致锆石测年的难度要大于花岗岩。例如，新疆扎河坝蛇绿岩中锆石的 U 含量为 42～263 μg/g，Th/U 比值集中在 0.48～0.87[6]。但是，本次研究发现赣南路迳似金伯利岩中锆石与众不同，其 U、Th 含量普遍在 100 μg/g 以上，9 个锆石平均 U、Th 含量为 1031.56 μg/g和 689.67 μg/g，变化范围 U 为 402～2050 μg/g，Th 为 288～1952 μg/g。Th/U 比值变化于 0.32～0.98，平均值为 0.64。

4　成岩时代、构造环境和壳幔作用

4.1　成岩时代

对于路迳似金伯利岩岩筒形成的地质时代，前人有不同的认识。符鹤琴等[8]根据岩筒侵入于晚侏罗世的火山岩中，推断为白垩纪的产物，并认为与世界上大多数金伯利岩的形成时代相近。赖章忠等[9]报道了路迳金伯利角砾岩全岩 K－Ar 年龄为 140 Ma。但获得这一数据的角砾岩样品是混杂岩，其中含有 20% 左右的酸性火山岩的碎屑物质，由于似金伯利岩的钾含量很低，而酸性火山岩钾含量高得多，显然 140 Ma 更多地反映了异源物质的贡献，而不能代表路迳岩筒的真实年龄。赖章忠等[9]也指出“路迳金伯利角砾岩 K－Ar 法年龄偏老，可能是样品中侏罗纪火山岩（年龄 154 Ma）角砾的干扰，导致样品年龄偏大”。战明国[5]报道迳岩筒金云母单矿物的 K－Ar 年龄为 43.9 Ma；中国地质大学叶松等[1]报道的 Rb－Sr 等时线地质年龄（37.6±2.2）Ma 相近，可确定该岩筒形成的地质时代应为新生代老第三纪始新世晚期。本次测定的结果表明，白垩纪初期是路迳似金伯利岩的主要形成期，前人 K－Ar 和 Rb－Sr 等时线年龄不能代表成岩时代。

4.2　成岩构造环境

本次分析的 9 个测点中，除了 1 颗锆石具有古老地壳的$^{206}Pb/^{238}U$年龄（1945±34）Ma 记录之外，其他数据均显示为白垩纪初期，8 个点加权平均为（132.0±1.9）Ma，未发现 125 Ma 之后的年龄数据，也没有发现早于 137 Ma 的侏罗纪数据。因此，从锆石年龄记录来看，路迳超基性岩岩筒形成于白垩纪初期但可能捕获了古元古代的地质体，而不是形成于新生代但捕获了侏罗纪火山岩。

综合分析，侏罗系上统菖蒲群火山岩喷发于陆相环境。菖蒲群火山岩的喷发代表了当时赣南地区大陆地壳开始发生“减薄”，而紧随其后的路迳似金伯利岩岩筒的侵入，又意味着地壳的“减薄”与幔源岩浆活动有关，甚至有可能正是地幔物质的上涌导致了地壳的减薄，或者地壳的持续减薄引发了幔源物质的上侵。无论是地幔物质上侵导致地壳减薄（类似于地幔柱环境）还是地壳减薄引发地幔物质上侵，都说明在侏罗纪末期－白垩纪初期，赣南地区发生了区域性的构造运动（相当于中燕山运动第Ⅰ幕[10]）。

似金伯利岩的地球化学特征也显示其独特性。如，其稀土元素总量（REEs）为 329.24 μg/g，LREEs/HREEs = 5.59，配分曲线呈右倾型（图 5）。这是上地幔或洋中脊玄武岩所不典型的，但对于洋

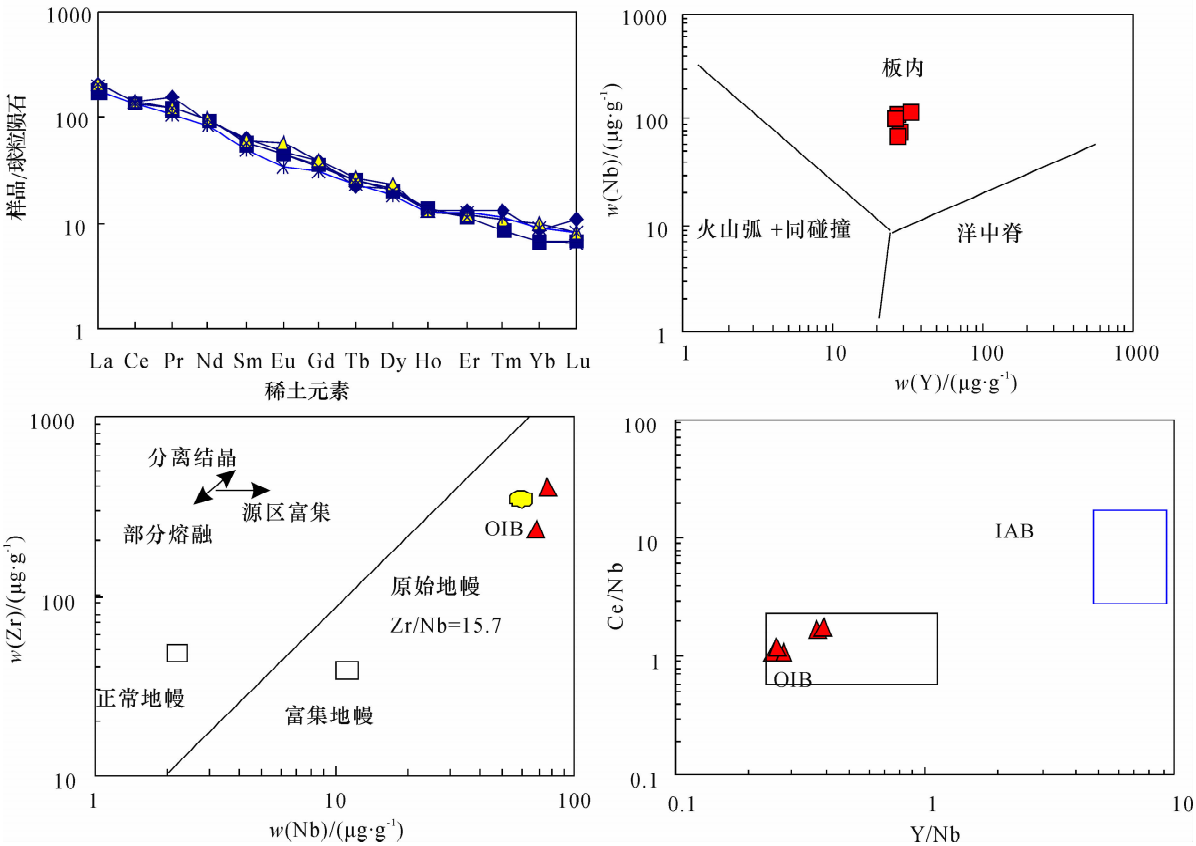

图 5　赣南路迳似金伯利岩的微量元素和稀土元素图解(数据来自文献[2])

Fig. 5　Trace elements and rare earth elements diagrams of Lujing kimberlite-like rock (data from reference [2])

岛玄武岩(OIB)或大陆溢流玄武岩来说则不奇怪。事实上,其微量元素图解(图 5)也显示其与洋岛玄武岩(OIB)的亲缘性。地幔柱成因的,尤其是起源于核幔边界的地幔柱物质往往具有稀土元素含量高且轻稀土富集的特征[11]。

本次对锆石的研究也发现其 U、Th 含量远高于一般基性超基性岩的锆石(如扎河坝蛇绿岩则锆石 U 含量为 42 ~ 263 μg/g),也远高于很多金伯利岩和钾镁煌斑岩中的锆石[12],而与地幔柱成因基性超基性岩中锆石的年龄相当,如与峨眉地幔柱有关的攀西裂谷碱性岩[13]、层状基性侵入岩[14-15]、碱性岩墙[16]中锆石 U、Th 含量平均值都在 1000 μg/g 以上,因此也意味着路迳似金伯利岩的岩浆可能来自于富集地幔源区。

4.3　壳幔相互作用与成矿关系

对于赣南乃至于整个华南地区基性超基性岩的研究程度,由于岩体出露少见而比较低,给科技工作者的印象始终是大面积出露的花岗岩,进而影响到对南岭地区"壳幔"相互作用的研究。显然,在缺少幔源岩石样品的情况下,要查明南岭地区的"壳幔"过程还是比较困难,因此,与南岭大规模钨矿成矿作用几乎同时的路迳似金伯利岩也就成为研究壳幔相互作用及其与成矿关系的一个重要切入点。本次利用锆石 SHRIMP U - Pb 法获得锆石年龄 132.0 Ma,从宏观上证明在赣南发生广泛而强烈的以石英脉型黑钨矿为特色的成矿作用的同时,并没有排斥存在强烈幔源岩浆活动的可能性。也就是说,这一时期不只是地壳岩石在发生重熔作用下形成大面积的花岗岩,而且"地幔"也是在活动的,幔源的岩浆乃至于幔源的流体和成矿物质也在发生迁移、聚集和成矿。江西 909 地质大队对路迳岩筒开展了调查研究,虽然没有找到金刚石,但发现岩体的 Nb 含量较高,说明至少 Nb 有富集成矿的趋势。后来的研究也发现(数据见表 2),路迳似金伯利岩中 Cu、Ag、V、Ti 等有不同程度的富集,其含量相当于同类岩石的 3 倍、10 倍、33.7 倍、650 倍;Zn、Pb、Sn、Ga 的含量也都高于超基性岩的维氏值;Mo、W、Zr 含量是地壳维氏值的近 3 倍,高于超基性岩维氏值的 13 ~ 165 倍;只有 Co、Cr、Ni 含量低于超基性岩维氏值,但仍然是地壳维氏值的1.7 ~ 3.2 倍[2]。本次利用阴极发光和 SHRIMP 定年研究也发

现,早白垩世的锆石中除了包裹有古元古代的锆石外,还包裹有磷灰石、黄铁矿和黄铜矿的晶体(图 3),而 U、Th 含量远高于一般基性 - 超基性岩中的锆石,也显示了一些成矿迹象的存在。

表 2　路迳似金伯利岩的岩石化学成分

Table 2　Petro-chemistric data of Lujing kimberlite-like rocks　　w_B/%

岩石名称	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	NiO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	CO_2	H_2O^+	总和
似金伯利岩	44.62	2.24	10.22	6.64	4.47	0.15		8.72	6.52	2.22	2.36	0.93			89.09
似金伯利岩	41.14	3.5	8.65	8.64	4.33	0.23		8.11	11.37	2.52	1.75	0.25			90.49
斑状金伯利岩	33.16	1.77	2.45	6.81	3.03	0.15		28.00	0.35	0.102	0.67	0.70		7.00	84.20
金伯利质煌斑岩	34.11	3.17	8.78	5.50	7.00	0.19	0.042	13.19	11.79	2.79	1.95	1.24	8.44	1.95	100.14
金伯利质煌斑岩岩球	34.78	3.29	8.12	4.00	7.40	0.17	0.036	11.43	12.42	2.92	1.73	1.34	9.86	1.88	99.38
金伯利质煌斑角砾岩	33.75	3.05	7.69	3.95	7.63	0.18	0.042	13.04	11.28	2.40	2.10	1.16	11.21	1.95	99.43
金伯利质煌斑角砾凝灰岩	40.67	1.21	6.67	3.48	4.7	0.16	0.065	12.01	8.50	1.70	2.44	0.86	14.42	2.79	99.68

注:资料来源于 1∶5 万版石幅区域地质调查报告和文献[2]。

5　结语

南岭地区的基性超基性岩分布零星,以往研究程度很低。本次对于赣南路迳似金伯利岩中锆石阴极发光和同位素定年的研究,确定了其成岩时代为早白垩世(128.7 ~ 135.4 Ma,加权平均 132.0 Ma),并根据其 U、Th 含量和岩石化学成分等方面的特征推测其岩浆起源于富集地幔,而早白垩世的成岩构造环境为地壳减薄、地幔物质上涌。在这样的壳幔相互作用过程中,幔源的成矿物质被携带到地壳浅部,而幔源热量的持续传递对于地壳物质的重熔和花岗岩类的形成也具有积极的意义。

6　参考文献

[1]　叶松,杨眉,叶德隆,邰道乾,任迎新. 江西安远路迳金伯利质煌斑岩筒的 Rb - Sr 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质科技情报, 2001,20(2): 27 - 29.

[2]　叶松,杨眉,叶德隆,邰道乾,任迎新. 江西安远路迳金伯利质煌斑岩筒研究[J]. 矿产与地质,2007,21(4): 383 - 395.

[3]　江西省地质勘查局. 江西省区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1984: 1 - 921.

[4]　池际尚. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩)[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1988.

[5]　战明国. 赣南金伯利角砾岩的发现、研究与金刚石找矿前景(未刊资料)[Z]. 1995.

[6]　简平,刘敦一,张旗,张福勤,石玉若,施光海,张履桥,陶华. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U - Pb测年[J]. 地学前缘,2003,10(4): 439 - 456.

[7]　周剑雄,陈振宇. 电子探针下锆石阴极发光的研究[M]. 成都:电子科技大学出版社,2007: 1 - 104.

[8]　符鹤琴,罗小洪,李武显. 江西金刚石找矿前景分析[J]. 江西地质科技,1993,20(3): 101 - 106.

[9]　赖章忠,王安诚. 赣南中生代火山活动时代及岩浆来源[J]. 江西地质,1996,10(2): 111 - 118.

[10]　陈毓川,王登红,朱裕生,徐志刚,任纪舜,翟裕生,常印佛,汤中立,裴荣富,滕吉文,邓晋福,胡云中,任天祥,沈保丰,王世称,肖克炎,彭润民,钱壮志,梅燕雄,杜建国,施俊法,张晓华,朱明玉,徐珏,薛春纪. 中国成矿体系与区域成矿评价(上册)[M]. 北京:地质出版社, 2007.

[11]　王登红. 地幔柱及其成矿作用[M]. 北京:地质出版社,1998: 1 - 160.

[12]　Belousova E, Walter, Griffin W L, O'Reilly S Y, Fisher N I. Zircon trace-element compositions as indicators of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143: 602 - 622.

[13]　夏斌,刘红英,张玉泉. 攀西古裂谷钠质碱性岩锆石 SHRIMP U - Pb 年龄及地质意义——以红格、白马和鸡街岩体为例[J]. 大地构造与成矿学,2004(2): 149 - 154.

[14]　Zhou M F, Zhao J H, Qi L, Su W C, Hu R Z. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd isotope geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing area, SW China [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151: 1 - 19.

[15]　Zhong H, Zhu W G. Geochronology of layered mafic intrusions from the Pan-Xi area in the Emeishan large igneous province, SW China [J]. *Mineral Deposita*, 2006,41: 599 - 606.

[16]　Shellnutt J G, Zhou M F, Yan D P, Wang Y B. Longevity of the Permian Emeishan mantle plume (SW China): 1 Ma, 8 Ma or 18 Ma [J]. *Geological Magazine*, 2008,145(3): 373 - 388.