

文章编号: 0258-7106(2009)03-0240-11

黔西南白层超基性岩墙锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成研究*

陈懋弘^{1,2}, 章伟², 杨宗喜², 陆刚³, 侯可军¹, 刘建辉⁴

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 中国地质大学, 北京 100083; 3 广西区域地质调查研究院, 广西 桂林 541003; 4 北京离子探针中心, 北京 100037)

摘要 文章对黔西南白层地区出露的燕山期超基性岩墙进行了单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成研究, 获得 A、B 两组不同的锆石年龄。A 组锆石呈不规则粒状, 具不完整的宽条带, 12 颗锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄加权平均值为 (84 ± 1) Ma, 代表了超基性岩墙的侵位年龄。锆石 Hf 原位分析表明, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 从 0.282561 到 0.282719, $\epsilon_{\text{Hf}}(84 \text{ Ma})$ 平均为 -3.61 , 表明岩浆源区主要以富集地幔为主, 并受到部分地壳物质的混染。B 组锆石晶形完整, 具典型的中酸性岩浆型振荡环带, 3 颗锆石的 SHRIMP U-Pb 模式年龄为 409~450 Ma。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 从 0.282379 到 0.282440, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 平均为 -3.77 , 均低于 A 组锆石, 属于捕获锆石。据此认为 84 Ma 左右由于华南岩石圈伸展, 软流圈地幔上涌, 导致岩石圈富集地幔部分熔融, 熔体上升过程中与 409~450 Ma 左右形成的少量地壳岩石发生混染, 随后快速侵位冷凝而形成基性-超基性岩墙。白层地区 84 Ma 的超基性岩浆活动是整个华南西部燕山晚期(80~90 Ma)岩浆活动的一部分。右江褶皱带周缘的燕山晚期岩浆活动主要与大规模的 Sn、W、Ag、Cu、Pb、Zn 等矿床有关, 但右江褶皱带内部的燕山晚期岩浆活动是否与以卡林型金矿为代表的低温热液矿床有成因上的联系, 尚需更多矿床年代学资料的证实。

关键词 地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 超基性岩; 白层; 黔西南

中图分类号: P597+.3

文献标志码: A

Zircon SHRIMP U-Pb age and Hf isotopic composition of Baiceng ultrabasic dykes in Zhenfeng County, southwestern Guizhou Province

CHEN MaoHong^{1,2}, ZHANG Wei², YANG ZongXi², LU Gang³, HOU KeJun¹ and LIU JianHui⁴

(1 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3 Institute of Regional Geological Survey of Guangxi, Guilin 541003, China; 4 Beijing SHRIMP Center, Beijing 100037, China)

Abstract

The Baiceng basic-ultrabasic dykes in southwest Guizhou constitute the largest outcrop of Yanshanian basic-ultrabasic rocks in Youjiang fold belt. Two groups of zircon (group A and B) were obtained in the rocks. Group A zircon grains assume the irregular granular form and incomplete broad bands. The SHRIMP U-Pb analysis of 12 zircon grains gave a weighted mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of (84 ± 1) Ma, which is interpreted as the emplacement age of this intrusion. LA-MC-ICP-MS in-situ Lu-Hf isotopic analysis of the same zircon grains gave $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$

* 本文由“中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金”(K2007-1-2)、“国家重点基础研究发展计划(973计划)”(2007CB411407)和“中国博士后科学基金”(20080430456)联合资助

第一作者简介 陈懋弘,男,1971年生,副研究员,博士,从事矿床学及构造地质学研究;E-mail: mhchen666@163.com

收稿日期 2009-01-04; 改回日期 2009-03-13. 张绮玲编辑。

ratios ranging from 0.282561 to 0.282719 and the average $\epsilon_{\text{Hf}}(84 \text{ Ma})$ of -3.61 , suggesting that their parental magmas were mainly derived from an enriched mantle and partly mixed with the lower continental crust rock. The other group of zircon grains (Group B) have a perfect crystal shape and typical oscillatory zoning. The SHRIMP U-Pb analysis of 3 zircon grains gave a $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ model age of $409 \sim 450 \text{ Ma}$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios ranging from 0.282379 to 0.282440, and average $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ of -3.77 , lower than the values of Group A. These data indicate that Group B zircon grains are captured ones. It is inferred that the Baiceng basic-ultrabasic pluton originated from a mixed melting between an enriched lithospheric mantle and the continental crust rock formed in $409 \sim 450 \text{ Ma}$, responding to an extension of lithosphere at 84 Ma or so. This induced the upwelling of asthenospheric mantle. The Baiceng basic-ultrabasic magma activity of 84 Ma was part of the Late Yanshanian magmatic activity in western South China. The Late Yanshanian magmatic activity on the margin of Youjiang folded belt was related to large-scale Sn, W, Ag, Cu, Pb, Zn mineralization. Nevertheless, the problem that whether the Carlin-type gold deposits are related to magmatic activity of this epoch inside the Youjiang fold belt is worthy of further discussion.

Key words: geochemistry, zircon U-Pb age, Hf isotopic composition, ultrabasic rock, Baiceng, southwestern Guizhou

地处滇黔桂三省区交界的右江印支褶皱带在燕山期有 2 件重要的地质事件,一是“卡林型金矿”的大规模成矿,二是超基性-基性-酸性岩墙的侵位。两者之间是否有成因上的联系,目前仍存在较大的争议(Hu et al., 2002; 毛景文等, 2004; 韩至钧等, 1999; 汪砚耕等, 1994; 陈懋弘等, 2006)。争论的主要原因,一是卡林型金矿与燕山期岩浆岩空间上不相关,二是缺乏高精度的成岩成矿同位素年龄制约。右江褶皱带出露的燕山期岩浆岩主要包括桂西巴马、凤山、凌云一带的石英斑岩和花岗斑岩脉,以及桂西都安一带的煌斑岩墙和黔西南贞丰白层、望谟一带的偏碱性超基性岩墙。本文对黔西南贞丰县白层超基性岩墙进行单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成的精细研究,以确定岩浆热事件发生的时限,并讨论岩浆来源、岩浆活动与成矿的关系等问题。

1 地质背景

右江褶皱带位于华南地块、扬子地块和印支地块等 3 大构造单元的交接部位(图 1),是一个比较特殊的大地构造单元。大多数资料将右江褶皱带划为华南地块的一部分(任纪舜等, 1980; 云南省地质矿产局, 1990; 广西壮族自治区地质矿产局, 1985),但也有资料将其划归为扬子地块(贵州省地质矿产局, 1987)。广西壮族自治区地质矿产局(1985)根据右江盆地的特殊演化历史,将其称为右江再生地槽,也

有学者称之为右江裂谷(柳淮之等, 1986)。

右江地区在早泥盆世晚期由于受古特提斯洋打开的影响而发生裂解,形成陆缘裂谷,并逐渐演化为台沟相间的古地理格局,局部形成有限小洋盆;早中三叠世,沉积了巨厚的陆源碎屑浊积岩,并将盆地内长期发育的孤立碳酸盐台地淹没,形成所谓的“右江再生地槽”,晚三叠世,盆地回返造山,形成印支期的造山带(曾允孚等, 1995)。燕山期出现超基性岩-酸性岩墙组合和小型断陷盆地,标志着新一轮的岩石圈伸展,地壳重新裂解。

右江褶皱带燕山期超基性岩主要分布在黔西南贞丰一带,包括贞丰县城东北的纳黑、杨家寨、鲁容、白层及喜年等地。岩墙群侵入于二叠系和三叠系的碳酸盐岩和陆源碎屑浊积岩中(图 1),同时还切穿了黔西南大型逆冲推覆构造(索书田等, 1993)。岩体主要沿东西向或南北向节理呈脉状和墙状产出。单个岩体规模大小不一,长数十米至 1 000 余米,厚从不足 1 m 至 10 m 左右。岩性以斑状黑云橄榄辉石岩、黑云辉石岩、辉橄云岩为主,化学成分为[$w(B)$]: SiO_2 38.09%、 Fe_2O_3 3.55%、 FeO 4.70%、 Al_2O_3 14.38%、 TiO_2 0.86%、 MnO 0.22%、 CaO 12.55%、 MgO 7.65%、 P_2O_5 2.08%、 K_2O 5.36%、 Na_2O 0.20%,总体上以低镁、富钙和相对富钾、钠为特征,属于偏碱性-碱性超基性岩(贵州省地质矿产局, 1987)。

另外,航空磁测资料表明,在贞丰以东 12 ~ 32 km 范围内,出现若干个十分醒目的等轴状航磁异

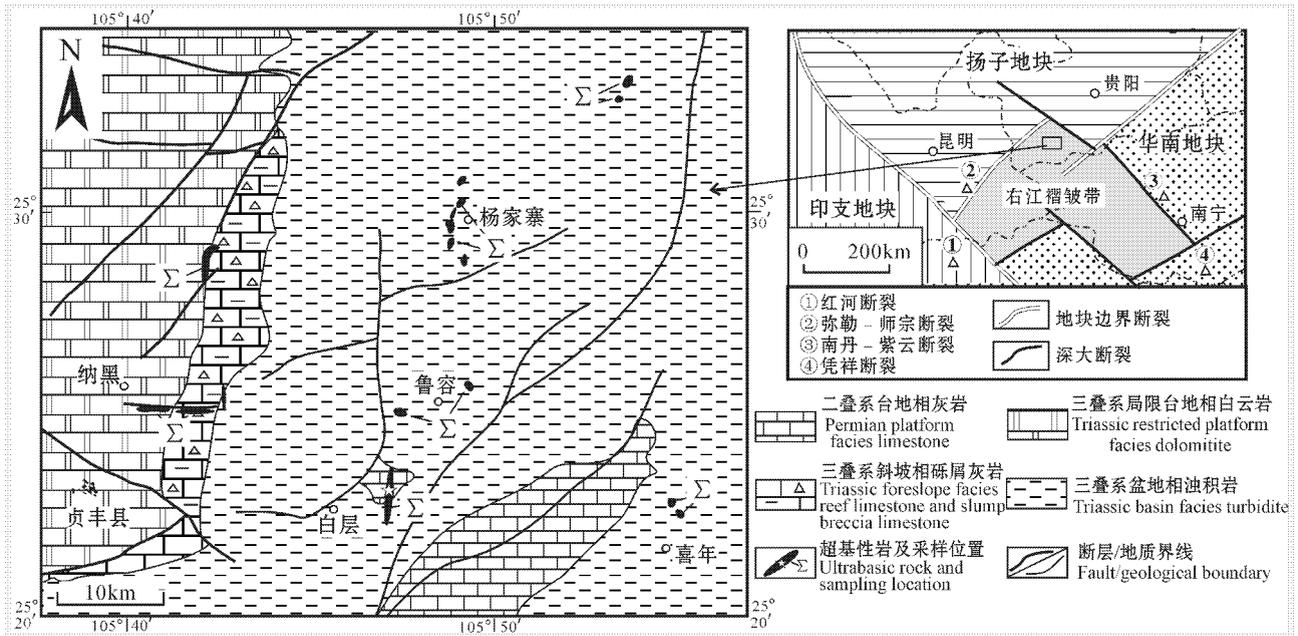


图 1 黔西南白层超基性岩分布图

Fig. 1 Geological map showing the distribution of ultrabasic rocks in Baiceng, southwestern Guizhou

常。单个异常的面积最大可达 100 km^2 。上述出露地表的偏碱性超基性岩体群均处于该异常范围内，因此，推测深部（ $6 \sim 9 \text{ km}$ ）可能隐伏较大的超基性岩体（韩至钧等，1999）。

2 样品采集和岩石特征

本次研究的样品采于贞丰县白层镇东约 1 km 北盘江东岸的一个采石场中，地理坐标为北纬 $25^\circ 23'00''$ ，东经 $105^\circ 47'15''$ 。

该岩墙沿近南北向节理充填于上二叠统吴家坪组灰白色礁灰岩中，产状 $108^\circ \angle 56^\circ$ ，主脉宽 75 cm ，与围岩界线清楚（图 2A）。上、下盘还存在若干厚 $5 \sim 25 \text{ cm}$ 不等的岩脉，局部分支复合状。岩墙中尚有后期方解石细脉充填（图 2B）。围岩蚀变弱，上、下盘仅有宽约 $30 \sim 50 \text{ cm}$ 的弱大理岩化。围岩层理清楚，产状 $295^\circ \angle 31^\circ$ ，与岩墙产状明显不同。根据岩墙特点及其与围岩的关系，可以判别岩墙具有被动侵位的特点。

岩石样品为辉云岩，深灰绿色，斑状结构，块状构造。斑晶含量约 $20\% \sim 30\%$ ，主要成分为辉石、黑云母和角闪石，粒径 $0.2 \sim 3 \text{ mm}$ 。基质成分除上述矿物成分外，大多数隐晶质成分被方解石、粘土矿物及绿泥石等蚀变矿物所交代（图 2C）。宏观和微观上的方解石化特征暗示岩墙形成之后仍有强烈的热

液蚀变作用。

野外采集上述岩石样品重约 30 kg ，经常规重选和磁选，在双目镜下挑纯，共获得约 120 颗锆石。

3 分析方法和测试结果

3.1 分析方法

将挑选的锆石和标准锆石一起粘贴，制成环氧树脂胶样品靶，然后在中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室进行阴极发光和背反射照像，研究锆石颗粒显微结构，确定待测锆石部位。

在北京离子探针中心的 SHRIMP II 型离子探针上进行锆石 U-Th-Pb 分析，具体测试条件及流程见宋彪等（2002）文献。每完成 $2 \sim 3$ 次样品测点分析，做一次标准锆石测定。测试时所用的标准锆石为 BR266 和 TEMORA，前者用于标定 U、Th 和 Pb 的质量分数，后者用于校正年龄（推荐值为 417 Ma ）。测定结果用实测的 ^{204}Pb 进行普通 Pb 的校正，数据处理、年龄计算采用 SQUID 1.0 及 ISOPLOT 程序（Ludwig 2001）。

对已测 SHRIMP U-Pb 年龄的锆石颗粒进行 Hf 同位素组成原位分析，在中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室 Thermo Finnigan Neptune MC-ICP-MS 上完成，采用 Newwave UP213 激光剥蚀系统烧蚀样品。激光斑束直径为 $55 \mu\text{m}$ ，激光剥蚀时

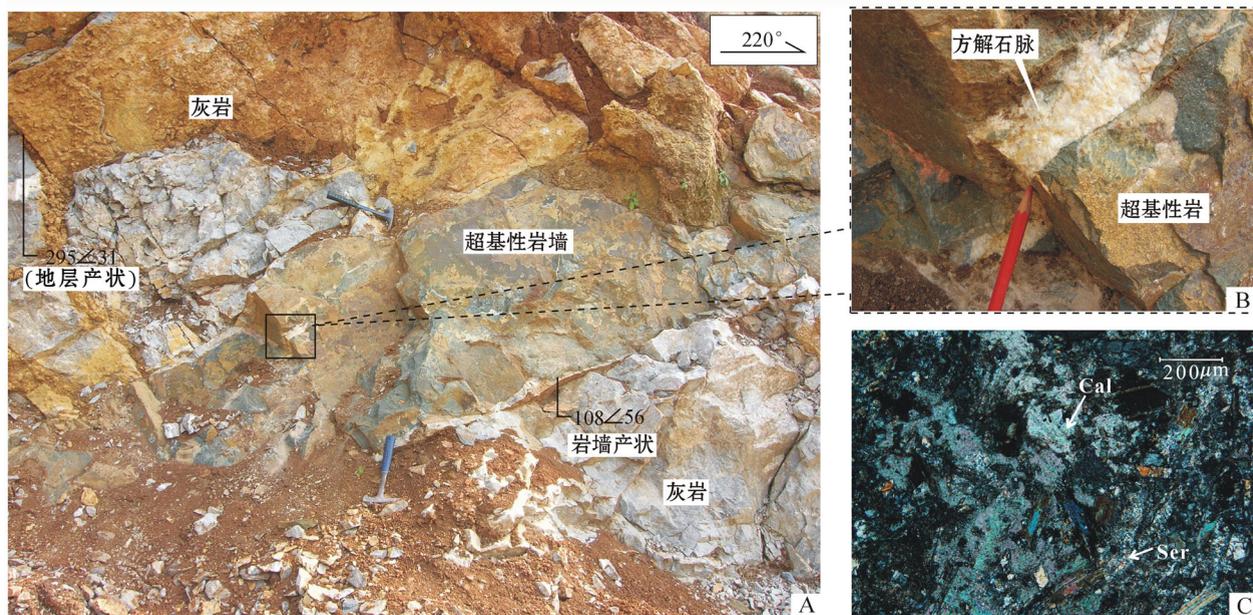


图 2 超基性岩墙产状和岩石学特征

- A. 沿二叠系吴家坪组灰岩中节理充填的超基性岩墙；B. 充填于超基性岩中的后期方解石脉；
C. 岩石基质大部分被方解石(Cal)和绢云母(Ser)交代，指示后期的热液蚀变

Fig. 2 Attitude and petrologic characteristics of ultrabasic dykes

- A. Ultrabasic dykes filling joints of Permian Wujiaping Formation limestone; B. Late stage calcite veins filling ultrabasic rock;
C. Matrix of ultrabasic rock mostly replaced by calcite (Cal) and sericite (Ser), suggesting strong alteration at the late stage

间为 27 s。测定时采用锆石 GJ1 做外标，其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值平均为 $0.282008 \pm 27 (2\sigma)$ ，分析流程及 Yb、Lu 校正方法详见侯可军等(2007)和 Wu 等(2006)。测试时为标准锆石(GJ1)进行了 10 个点的分析， $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值的变化范围和平均值分别为 $0.281984 \sim 0.282034$ 和 0.282015 ，与标准结果在误差范围内一致。

3.2 测试结果

3.2.1 锆石分类和 SHRIMP U-Pb 测年

根据锆石显微结构特征和测年结果，可以将样品中的锆石分为 A、B 两组。

A 组锆石颗粒数量较多，呈不规则粒状，粒径 $60 \sim 200 \mu\text{m}$ 不等。阴极发光图像上大部分颗粒具不完整的宽大条带(图 3 中的测点 1、3、4、5、6、11)，其中一个锆石具有继承核和细密环带构造(图 3 中的测点 2)。从部分锆石碎块的宽大条带可以推测其完整晶体的粒度较大，可能大于 $500 \mu\text{m}$ 。少部分锆石碎块为黑色，呈均质结构(图 3 中的测点 7、8、9、10、12)，既无内核，也无明显生长韵律环带；在背反射图像上表现为亮白色，内部成分均一，裂纹不发育，无溶蚀结构。由于大部分基性-超基性岩中的锆石粒

径较大，经过样品粉碎后，锆石不容易保存完整的晶形而呈不规则碎块。此外，锆石中较宽的结晶环带指示高温条件下微量元素扩散快，锆石无分带或弱分带的特征则常指示地幔来源(吴元保等，2004)。因此，A 组锆石具有幔源岩浆锆石特点，这与其产于超基性岩墙的地质背景相吻合。

对 A 组锆石中的 12 个颗粒进行了 SHRIMP U-Pb 分析，结果(表 1)表明锆石 U 和 Th 含量较高(大多数分析点 $\text{U} > 500 \mu\text{g/g}$ ， $\text{Th} > 1000 \mu\text{g/g}$)，Th/U 比值主要集中在 $1.39 \sim 7.02$ ，为典型的岩浆锆石比值(吴元保等，2004)。在一致曲线图中(图 4)，获得 12 个数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $(84 \pm 1)\text{Ma}$ (MSWD = 0.75，置信度 95%)，代表了白层超基性岩的形成时代。

B 组锆石数量较少，晶体呈自形，细长柱状，长 $60 \sim 200 \mu\text{m}$ ，宽 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 。阴极发光图像上生长环带清晰细密，晶面简单，晶棱尖锐(图 3 中的测点 13、14、15)，与普通中酸性岩浆锆石十分相似。对其中的 3 颗锆石进行了 SHRIMP U-Pb 分析，结果(表 1)表明，B 组锆石 U 含量也较高，一般为 $400 \sim 1000 \mu\text{g/g}$ ，但 Th 含量相对较低，仅在 $200 \sim 400 \mu\text{g}$ 左右，

表 1 黔西南白层超基性岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年分析结果

Table 1 Zircon SHRIMP U-Pb dating results of Baiceng ultrabasic rock in southwestern Guizhou

测点	U($\mu\text{g/g}$)	Th($\mu\text{g/g}$)	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/(\mu\text{g/g})$	Pb普通/%	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^* \pm \%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U} \pm \%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U} \pm \%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	
A组	1	857	2723	3.28	10.3	3.06	0.0506 ± 12	0.094 ± 12	0.01352 ± 2	86.6 ± 1.9
	2	996	1350	1.40	11.9	2.16	0.0545 ± 6	0.1027 ± 7	0.01366 ± 2	87.5 ± 1.9
	3	805	2849	3.66	9.68	6.66	0.0309 ± 31	0.056 ± 31	0.01306 ± 2	83.7 ± 1.9
	4	1237	5675	4.74	14.4	0.56	0.0532 ± 4	0.0988 ± 4	0.01346 ± 2	86.2 ± 1.7
	5	1275	4526	3.67	15.2	4.08	0.0426 ± 12	0.0782 ± 13	0.01331 ± 2	85.2 ± 1.8
	6	760	1021	1.39	8.69	1.50	0.0495 ± 8	0.0894 ± 8	0.01311 ± 2	84.0 ± 1.7
	7	2091	14196	7.02	23.4	0.84	0.0455 ± 3	0.0810 ± 4	0.01290 ± 2	82.6 ± 1.6
	8	2300	7790	3.50	25.9	0.46	0.0483 ± 2	0.0868 ± 3	0.01305 ± 2	83.6 ± 1.6
	9	2281	9349	4.23	26.0	2.24	0.0562 ± 10	0.101 ± 11	0.01297 ± 2	83.1 ± 1.7
	10	2086	11472	5.68	23.9	1.04	0.0479 ± 6	0.0872 ± 6	0.01321 ± 2	84.6 ± 1.7
	11	189	4171	22.75	2.26	6.57	0.034 ± 49	0.061 ± 49	0.01300 ± 3	83.2 ± 2.5
	12	500	15059	31.11	5.68	1.97	0.0509 ± 12	0.091 ± 13	0.01297 ± 2	83.1 ± 1.8
B组	13	629	263	0.43	37.5	0.47	0.0582 ± 2	0.555 ± 3	0.0691 ± 2	430.5 ± 8.4
	14	968	314	0.34	54.9	0.76	0.0543 ± 3	0.490 ± 4	0.0655 ± 2	408.9 ± 8.4
	15	394	408	1.07	24.6	0.64	0.0556 ± 3	0.554 ± 4	0.0722 ± 2	449.5 ± 8.7

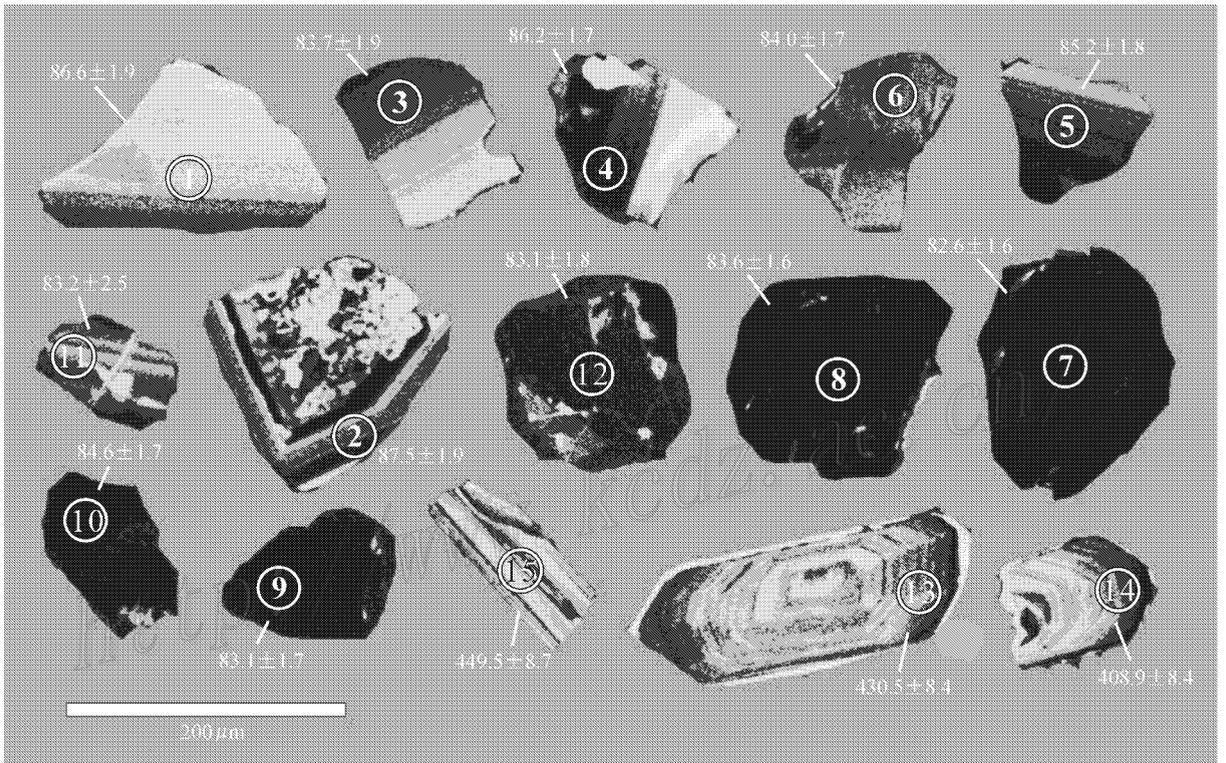


图 3 黔西南白层超基性岩锆石的阴极发光图像

(圆圈代表分析点位置及编号,数值代表该点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄)

Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircon grains from ultrabasic rocks in southwestern Guizhou

(circle represents location of analytical point and its serial number, numeral means $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of this point)

Th/U 比值主要集中在 0.34~1.07。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄大致在 408~449 Ma 之间,明显与超基性岩的地质特征不符,可能代表了基底加里东期中酸性岩浆活动的产物,推测是超基性岩墙在侵位过程中捕获

的地下壳岩浆锆石。

3.2.2 锆石 Hf 同位素数据

在 SHRIMP U-Pb 定年的基础上,对相同锆石颗粒进行了 Hf 同位素组成原位分析(其中 1 号颗粒

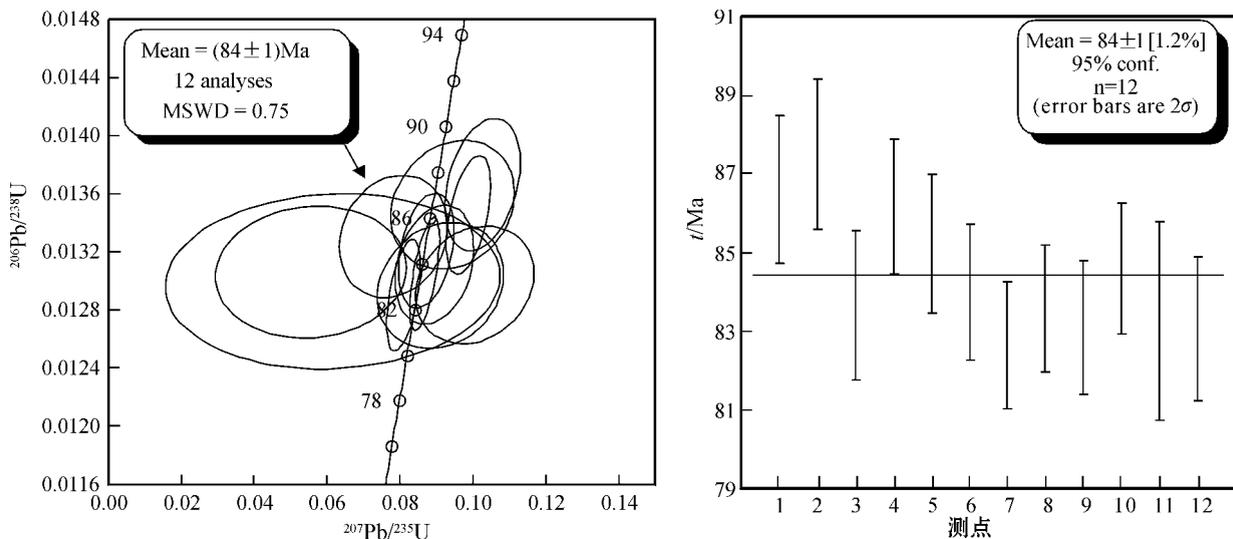


图 4 黔西南白层超基性岩中锆石 SHRIMP U-Pb 谐和图

Fig. 4 SHRIMP U-Pb concordia diagram of zircon grains from ultrabasic rocks in Baiceng, southwestern Guizhou

表 2 黔西南白层超基性岩锆石 Lu-Hf 同位素原位分析结果

Table 2 LA-MC-ICP-MS in-situ zircon Lu-Hf isotopic analytical results of Baiceng ultrabasic rocks

测点	<i>t</i> /Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	ε _{Hf} (0)	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>T</i> _{DMI}	<i>T</i> _{DM2}	<i>f</i> _{Lu/Hf}
1A	84	0.053753	0.000623	0.001024	0.000026	0.282616	0.000022	-5.534	-3.748	901.612	1133.101	-0.969
1B	84	0.062591	0.000630	0.001218	0.000031	0.282632	0.000021	-4.936	-3.161	882.324	1103.054	-0.963
2	84	0.064688	0.001267	0.001862	0.000053	0.282789	0.000048	0.586	2.325	672.207	821.868	-0.944
3	84	0.043030	0.001437	0.000990	0.000032	0.282561	0.000031	-7.446	-5.659	976.880	1230.723	-0.970
4	84	0.037487	0.000083	0.000818	0.000031	0.282720	0.000024	-1.846	-0.049	750.377	943.748	-0.975
5	84	0.051194	0.000743	0.001285	0.000019	0.282501	0.000032	-9.580	-7.810	1069.996	1340.339	-0.961
A 组 6	84	0.011113	0.000219	0.000245	0.000029	0.282602	0.000026	-6.025	-4.196	902.514	1156.091	-0.993
7	84	0.046446	0.000632	0.001016	0.000021	0.282613	0.000025	-5.617	-3.832	904.748	1137.350	-0.969
8	84	0.022237	0.000219	0.000431	0.000029	0.282582	0.000026	-6.728	-4.910	934.479	1192.542	-0.987
9	84	0.013855	0.000240	0.000310	0.000042	0.282599	0.000018	-6.135	-4.310	908.336	1161.892	-0.991
10	84	0.060455	0.001513	0.001561	0.000053	0.282668	0.000061	-3.682	-1.927	839.778	1039.860	-0.953
11	84	0.087427	0.000399	0.002438	0.000022	0.282632	0.000026	-4.934	-3.227	911.92	1106.257	-0.927
12	84	0.032576	0.000256	0.000742	0.000015	0.282589	0.000017	-6.460	-4.659	931.545	1179.685	-0.978
13	431	0.040487	0.000316	0.000968	0.000044	0.282380	0.000014	-13.870	-4.666	1230.961	1557.885	-0.971
B 组 14	410	0.034287	0.000191	0.000919	0.000031	0.282409	0.000015	-12.824	-4.056	1188.026	1504.579	-0.972
15	450	0.089094	0.000948	0.002495	0.000043	0.282440	0.000025	-11.734	-2.575	1194.615	1453.146	-0.925

注：A 组中的 2 号和 5 号测点未参与平均值计算。ε_{Hf}(0)、ε_{Hf}(*t*)、*T*_{DMI}、*T*_{DM2}、*f*_{Lu/Hf} 值根据吴福元等(2007)给出的公式计算出。

分析了 2 个点) 结果列于表 2, 表中 ε_{Hf}(0)、ε_{Hf}(*t*)、*T*_{DMI}、*T*_{DM2}、*f*_{Lu/Hf} 值根据吴福元等(2007)给出的公式计算得出。

由表 2 可以看出, A 组锆石除 2 号和 5 号测点外, 其余的 10 个测点 Hf 同位素组成比较均一。大部分锆石的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值小于 0.002, 说明锆石形成后放射性成因 Hf 的积累较小。¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值为 0.282561~0.282720, 平均值为 0.282619。2 号测点值比较高, 估计与环带较窄, 激光熔样时部分核部锆石污染有关; 5 号测点可能属离群数据, 它们不

具代表性, 因此未参与平均值计算和讨论。其余测点按照 84 Ma 进行年龄校正后的 ε_{Hf}(*t*) 为 -0.049~-5.659, 主要集中在 -3.16~-4.91 之间, 平均值为 -3.61; ε_{Hf}(0) 平均值为 -5.395。

B 组锆石 3 个测点 Hf 同位素组成也比较均一, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值为 0.282380~0.282440, 平均值为 0.282409, 明显比 A 组低。ε_{Hf}(*t*) 在 -2.575~-4.666 之间, 平均值为 -3.77, 与 A 组相近; ε_{Hf}(0) 平均值为 -12.809, 明显低于 A 组。

4 讨论

4.1 超基性岩墙的形成时代

前人曾采用全岩 K-Ar 法获得黔西南贞丰白层一带的超基性岩年龄为 77.5~97 Ma,但又认为岩石后期蚀变强烈,该数据可能偏小,从而依据区域地质背景将其侵位时代推断为中三叠世,为印支运动的产物(贵州省地质矿产局,1987)。不过,大多数学者认为中三叠世右江盆地处于前陆盆地阶段,整个盆地的应力状态是挤压而不是伸展(曾允孚等,1995),因此中三叠世末或晚三叠世初发生的印支造山运动不是表征地壳伸展被动侵位的超基性岩墙形成的构造背景。同时,三叠纪时白层地区处于右江盆地腹地,距离那坡岛弧有相当远的距离,也不存在形成岛弧超基性岩的构造环境。因此,从盆地构造演化的关系分析,白层超基性岩不会形成于三叠纪。

前述岩石学特征表明,本区超基性岩墙遭受了后期的热液蚀变,因此全岩 K-Ar 法年龄的地质意义模糊,它或者代表了岩墙的冷却年龄,或者由于热液蚀变导致岩石的 K-Ar 同位素时钟重置而产生较新的年龄。锆石 U-Pb 体系是目前已知矿物同位素体系中封闭温度最高的,可高达 900°C(Lee et al., 1997; Cherniak et al., 2000)不易遭受后期变质作用的影响。该岩墙蚀变类型主要以碳酸盐化和绢云母化为主,可以判别热液蚀变以低温蚀变为主,远未达到锆石的封闭温度值,没有扰乱锆石的同位素体系,锆石的显微构造也证明了这一点。因此,本文获得的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(84±1)Ma 代表了白层超基性岩墙的侵位年龄。

4.2 岩浆源区示踪

由于 Zr 和 Hf 的地球化学性质相似,因此锆石具有较高的 Hf 含量(1%~2%的 HfO₂),同时 Lu 的含量极低,从而导致¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 的比值非常低(通常小于 0.002)。由于锆石形成后随时间积累的由放射性同位素¹⁷⁶Lu 衰变而形成的¹⁷⁶Hf 很少,因此所测样品的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值基本上可以代表其形成时体系的 Hf 同位素组成,这就使锆石可以记录岩浆源区不同性质的源岩特征,通过与锆石 U-Pb 定年相结合,则能够为揭示地壳演化和示踪岩浆源区提供重要信息。

一般而言,不同地球化学储源库的 Hf 同位素组成明显不同,如球粒陨石和亏损地幔的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf

比值较大(≥0.282772), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为零或正值;而不同类型富集地幔及地壳的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值较小, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值(吴福元等,2007)。

A 组锆石获得的平均¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值为 0.282619,低于球粒陨石的比值,但明显高于上地壳的比值,两阶段模式年龄平均值分别为 895 Ma 和 1126 Ma,远大于其形成年龄(84 Ma), $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主要集中在 -3.16~-4.91 之间,平均值为 -3.61。在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -t 图解上(图 5),数据点大多落在球粒陨石演化线之下,而且相对集中,显示弱富集的特点。上述 Hf 同位素特征表明,白层超基性岩的岩浆源区可能是以富集地幔为主,并受到部分地壳物质的混染。由于幔源岩浆锆石中 Hf 同位素初始比主要取决于壳幔相互作用中地壳物质的贡献和参与混合作用的地壳年龄,因此根据 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 弱富集的特点,可以大致判断地壳的混染量可能有限。

B 组锆石的年龄(409~450 Ma)表明参与岩浆混染的变质地壳岩石大致形成于加里东期。华南加里东运动伴随有大量的花岗岩侵位,如南岭的越城岭、猫儿山、海洋山等花岗岩体,同位素年龄 377~418 Ma(广西壮族自治区地质矿产局,1985),与 B 组锆石年龄大致吻合。因此,可以推断本区地壳深部有可能存在经高级变质作用改造的加里东期岩浆岩,后来在 84 Ma 左右,被来自富集地幔的基性-超基性岩浆混染并带到现在的位置上。

根据以上 A、B 两组锆石的年龄和 Hf 同位素组成,推测 84 Ma 左右由于华南岩石圈伸展,软流圈地

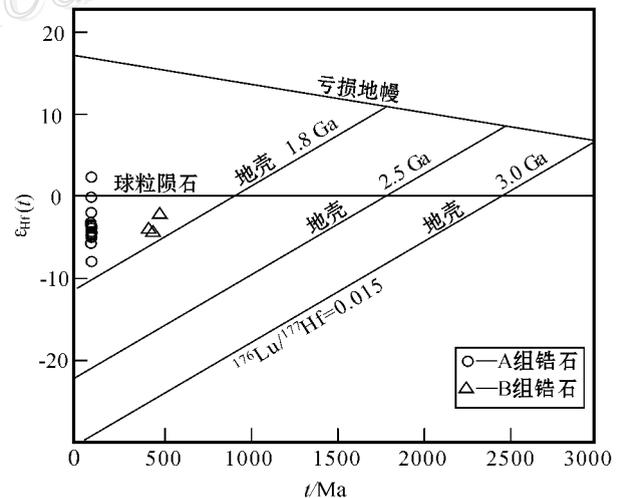


图 5 白层超基性岩锆石 Hf 同位素特征

Fig. 5 Zircon Hf isotopic features of ultrabasic rocks in Baiceng

幔上涌,导致岩石圈富集地幔部分熔融,熔体上升过程中与 409~450 Ma 左右形成的少量地壳岩石相互作用并混染,随后快速侵位冷凝而形成基性-超基性岩墙。更详细的岩浆演化过程则需要在今后的工作中结合其他地球化学资料进行探讨。

4.3 地质意义

4.3.1 岩浆作用与成矿作用

从目前已有的资料和认识来看,黔西南白层 84 Ma 的超基性岩浆活动在右江地区并不是一次孤立的岩浆活动事件,而是华南西部燕山晚期岩浆活动的一部分。

首先,右江褶皱带内部燕山晚期岩浆岩除了白层超基性岩墙外,桂西的巴马、凤山、凌云等地还有石英斑岩和花岗斑岩出露,白云母 K-Ar 法年龄为 80.9~90 Ma(广西壮族自治区地质矿产局,1985)。可见,右江褶皱带内燕山晚期超基性岩墙与中酸性岩脉的侵位方式类似,侵位时代相同,是同一次岩浆作用的产物。

其次,相同时代的岩浆活动在右江盆地周缘深大断层附近则更为广泛。例如盆地东部边界都安-紫云断裂带共有 4 个岩墙群出露,由北往南分别为南丹、大厂、都安和大明山岩群,岩性包括酸性岩、中性岩和煌斑岩,年龄为 89~104 Ma(陈懋弘等,2008)。值得注意的是,晚白垩世初在这些岩墙群附近的都安、武鸣陆相盆地中还伴有中性火山喷发活动(广西壮族自治区地质矿产局,1985)。右江盆地的西部边缘,则有著名的个旧花岗岩群、都龙隐伏花岗岩和薄竹山花岗岩,年龄为 85~92 Ma(陈懋弘等,2008)。

可见,无论右江褶皱带的内部还是边缘,都存在燕山晚期(80~90 Ma)的酸性-超基性岩浆活动。右江褶皱带内部出露的少量岩墙是深部岩浆活动的指示,重磁资料也证实褶皱带内部有相当数量的隐伏花岗岩体(周永峰,1993)。因此,80~90 Ma 的岩浆活动可能普遍存在于整个右江褶皱带。

右江褶皱带边缘的燕山晚期岩浆活动,均伴有大规模的 Sn、W、Ag、Cu、Pb、Zn 等成矿作用(毛景文等,2007,2008;华仁民等,1997,2005),如东侧有大厂锡多金属矿田、大明山钨多金属矿田;西侧有个旧锡多金属矿田、老君山锡锌多金属矿田和白牛厂银多金属矿田。这些多金属矿床的成矿时代以 80~95 Ma 为主(陈懋弘等,2008),与相关的岩浆岩年龄吻合。

至于右江褶皱带内部的燕山晚期岩浆活动是否

与卡林型金矿以及 Sb、Hg、As 等中低温热液矿床有关,则争议较大。从目前的研究成果来看,卡林型金矿本身尚缺乏令人信服的高精度测年数据,前人获得的同位素年龄跨度很大(206~50 Ma)(陈懋弘等,2006),而且其中 80~50 Ma 的成矿年龄数据均是利用石英裂变径迹法(张峰等,1992)和石英顺磁共振(朱赖民等,1998;刘建中等,2006)获得的,是否受到燕山晚期岩浆活动的影响值得考虑。最近陈懋弘等(2007)获得烂泥沟金矿含砷黄铁矿 Re-Os 法年龄(193 ± 13) Ma, Su 等(2009)获得水银洞金矿方解石脉的 Sm-Nd 等时线年龄为(134 ± 3) Ma 和(136 ± 3) Ma,胡瑞忠等(2007)认为该区低温成矿域的大规模铽成矿作用主要发生在中燕山期(140~160 Ma 之间),这说明包括卡林型金矿在内的低温矿床系列的成矿时期主要是早-中燕山期,要早于燕山晚期的超基性-酸性岩浆活动。由于缺乏合适的测年矿物,尚未获得卡林型矿床的精确年龄,因此,右江褶皱带内部燕山晚期岩浆活动与卡林型金矿等低温矿床成矿作用之间的关系尚需更多的矿床年代学资料的证实。

4.3.2 地球动力学背景

右江褶皱带在晚白垩世(80~90 Ma)发生了大规模的岩石圈伸展减薄事件,主要的地质依据有:存在 80~90 Ma 侵位的超基性-碱性-酸性岩墙;于 86~78 Ma 形成的都龙-Song Chay 变质核杂岩(颜丹平等,2005);大厂锡多金属矿田中伸展剪切褶皱、层间滑脱构造带等一套反映横向构造置换的构造(蔡明海等,2004)等。

对于包括右江褶皱带在内的华南晚中生代岩石圈伸展减薄的构造背景和形成机制,目前仍存在较大的分歧。一种观点认为岩石圈伸展减薄与太平洋板块向西俯冲有关(吴福元等,2003;谢桂青等,2005);第二种观点则认为是软流圈地幔上涌导致板内岩石圈伸展减薄(范蔚茗等,2003;李献华等,2001;袁学诚,2007);第三种观点认为动力学背景可能随着时间和空间的推移而不断地变化(陈卫锋,2005;汪强等,2005)。毛景文等(2007)曾从南岭地区 W、Sn 成矿作用的类型和时限等方面讨论了这种变化,认为南岭地区在中、晚侏罗世(165~150 Ma)以钨锡大规模成矿作用为主,构造背景为古太平洋板块向西俯冲而形成的大陆边缘弧后伸展带;而在晚白垩世(80~90 Ma)以陆内盆地边缘的锡多金属成矿为主,大规模岩浆活动及成矿作用主要与软流

圈地幔上涌有关。

从目前的资料来看,华南地区侏罗纪以来发生的多阶段岩石圈伸展减薄和地壳拉张事件在东部和西部表现形式不一样(毛景文等,2004)。右江褶皱带位于华南西部,毛景文等(2005,2007)曾推测其动力学背景为中生代特提斯大洋板块向东俯冲的增生大陆边缘弧后形成的伸展盆地。不过,右江褶皱带的南西端都安、武鸣陆相盆地中有白垩纪中性火山喷发活动,作为古特提斯洋板块缝合线的哀牢山-红河断裂在燕山期和喜马拉雅期主要表现为大规模的走滑剪切运动,没有大规模的岩浆活动痕迹,仅在红河剪切带内部出现角闪钾长花岗岩岩墙[(64±2)Ma,熊家镛等,1998];右江盆地周缘出现华南地区特有的与花岗岩有关的大规模W、Sn多金属成矿作用。这些特点显示右江褶皱带燕山晚期的地球动力学背景更类似于华南中东部。

本文获得的白层超基性岩锆石Hf同位素组成也支持岩浆活动主要与软流圈地幔上涌有关,这与华南地区中西部晚白垩世的地球动力学背景一致。

5 结 论

(1) 首次获得黔西南白层超基性岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄为(84±1)Ma,确定其形成于燕山晚期。锆石Hf原位分析表明,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf比值从0.282561到0.282720,平均ε_{Hf}(84 Ma)值为-3.61,表明岩浆源区主要以富集地幔为主,并受到部分地壳物质的混染。

(2) 岩墙中少量锆石(B组)的SHRIMP U-Pb模式年龄为409~450 Ma,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf比值和平均ε_{Hf}(t)值均低于A组锆石,被认为是岩浆上侵过程中捕获的地壳锆石。

(3) 白层地区84 Ma的超基性岩浆活动是整个华南西部燕山晚期(80~90 Ma)岩浆活动的一部分。右江褶皱带周缘的燕山晚期岩浆活动主要与大规模的Sn、W、Ag、Cu、Pb、Zn等矿床有关,但右江褶皱带内部的燕山晚期岩浆活动是否与以卡林型金矿为代表的低温热液矿床有成因上的联系,尚需更多矿床年代学资料的证实。

志 谢 野外采样得到了澳华黄金有限公司宁支祥、秦运忠和陈文斌等员工的大力协助,论文撰写过程中得到谢桂青博士的帮助,审稿人对本文提出

了富有建设性的意见,谨致谢忱。

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region. 1985. Regional geology of Guangxi Zhuang Autonomous Region[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1-96 (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guizhou. 1987. Guizhou regional geology[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 557p (in Chinese with English abstract).
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan province. 1990. Yunnan regional geology[M]. Beijing: Geol. Publ. House (in Chinese with English abstract).
- Cai M H, Liang T, Lu G D and Huang H M. 2004. Structure characteristics and mineralization controls of the Nandan-Hechi metallogenic belt in Guangxi province[J]. Geology and Prospecting, 40(6): 5-10 (in Chinese with English abstract).
- Chen M H, Mao J W, Wu L L and Zheng J M. 2006. A review on the chronology of micro-disseminated gold deposits in Yunnan-Guizhou Guangxi[J]. Journal of Guilin University of Technology, 26(3): 334-340 (in Chinese with English abstract).
- Chen M H, Mao J W, Qu W J, Wu L L, Phillip J U, Tony N, Zheng J M and Qin Y Z. 2007. Re-Os dating of pyrites in Jinfeng (Lannigou) gold deposit, Guizhou Province, China and its geological significance[J]. Geological Review, 53(3): 371-382 (in Chinese with English abstract).
- Chen M H, Cheng Y B, Zhang W, Yang Z X and Lu G. 2008. Primary study on the relationship between Yanshanian magma activity and mineralization in Youjiang Folded Belt[A]. In: Chen Y C, Xuan C J and Zhang C Q, ed. Main attacking deep, pushing forward western and scanning widely world[C]. 9th National Deposit Meeting. Beijing: Geol. Pub. House. 241-242 (in Chinese).
- Chen W F, Chen P R, Xu X S and Zhang M. 2005. The geochemistry characters of Cretaceous basalt in South China and its constraints on the subducting of Pacific Plate[J]. Science in China (Ser. D), 35(11): 1007-1018 (in Chinese).
- Cherniak D J and Watson E B. 2000. Pb diffusion in zircon[J]. Chemical Geology, 172: 5-24.
- Fan W M, Wang Y J, Guo F and Peng T P. 2003. Mesozoic mafic magmatism in Hunan-Jiangxi provinces and the lithospheric extension[J]. Earth Science Frontiers, 10(3): 15-25 (in Chinese with English abstract).
- Han Z J, Wang Y G, Feng J Z, Chen T J and Liu Y H. 1999. Geology and exploration of sedimentary-rock-hosted disseminated gold deposits in southwestern Guizhou[M]. Guiyang: Guizhou Sci. and Tech. Pub. House. 1-60 (in Chinese with English abstract).
- Hou K J, Li Y H, Zou T R, Qu X M, Shi Y R and Xie G Q. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. Acta Petrologica Sinica, 23

- (10):2595-2604 (in Chinese with English abstract).
- Hu R Z, Su W C, Bi X W, Tu G C and Hofstra A. 2002. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China [J]. *Mineralium Deposita*, 37(3):378-392.
- Hu R Z, Peng J T, Ma D S, Su W C, Shi C H, Bi X W and Tu G C. 2007. Epoch of large-scale low-temperature mineralizations in southwestern Yangtze massif [J]. *Mineral Deposits*, 26(6):583-596 (in Chinese with English abstract).
- Hua R M, Zhu J C, Zhao Y Y, Zhou J P, Wu Y Y and Chen X D. 1977. Preliminary study on metallogenetic series of nonferrous metal deposits in Youjiang fold belt [J]. *Geological Journal of China Universities*, 3(2):183-191 (in Chinese with English abstract).
- Hua R M, Chen P R, Zhang W L and Lu J J. 2005. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China [J]. *Mineral Deposits*, 24(2):99-107 (in Chinese with English abstract).
- Lee J, Williams I and Ellis D. 1997. Pb, U and Th diffusion in nature zircon [J]. *Nature*, 390(13):159-162.
- Li X H, Zhou H W, Liu Y, Li J Y, Chen Z H, Yu J S and Gui X T. 2001. Mesozoic shoshonitic intrusives in the Yangchun Basin, western Guangdong, and their tectonic significance: II. Trace elements and Sr-Nd isotopes [J]. *Geochimica*, 31(1):57-65 (in Chinese with English abstract).
- Liu H Z, Zhong Z Y and Yao M. 1986. Preliminary study of Youjiang rift zone [J]. *Journal of Guilin College of Geology*, 6(1):9-19 (in Chinese with English abstract).
- Liu J Z, Deng Y M, Liu C Q, Xia Y, Zhang X C and Tao Y. 2006. Geochemical studies on the inclusion and isotopes of the Shuiyindong gold deposit [J]. *Guizhou Geology*, 23(1):51-56 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2001. Users manual for Isoplot/Exrev. 2. 49: A geochronological tool kit for Microsoft Excel [R]. Berkeley Geochronology Center Special Publication No. La. 1-55.
- Mao J W, Xie G Q, Li X F, Zang C Q and Mei Y X. 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in south China [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1):45-55 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Li X F, Zhang Z H, Wang Y T, Wang Z L, Zhao C S, Yang F Q and Li H M. 2005. Geodynamic process and metallogeny: History and present research trend, with a special discussion on continental accretion and related metallogeny throughout geological history in South China [J]. *Mineral Deposits*, 24(3):193-205 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Xie G Q, Guo C L and Chen Y C. 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nangling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10):2329-2338 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Cheng Y B, Guo C L, Yang Z X and Feng J R. 2008. Gejiu tin polymetallic ore field: deposit model and discussion for several points concerned [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(11):1455-1467 (in Chinese with English abstract).
- Ren J S, Jiang C F and Zhang Z S. 1980. Chinese geotectonics and its environment [M]. Beijing: Science Press. 1-140 (in Chinese with English abstract).
- Song B, Zhang Y H and Wang Y S. 2002. The target doing, dating of zircon SHRIMP and the relational phenomena discussion [J]. *Geological Review*, 48(Supp.):26-30 (in Chinese with English abstract).
- Su W C, Hu R Z, Xia B, Xia Y and Liu Y P. 2009. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China [J]. *Chemical Geology*, 258:269-274.
- Suo S T, Hou G J, Zhang M F and Wang K. 1993. The large Panjiang river multi-level sheeted thrust-nappe structure in southwestern Guizhou [J]. *Regional Geology of China*, 3:239-247 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Zhao Z H, Jian P, Xiong X L, Bao Z W, Dai T M, Xu J F and Ma J L. 2005. Geochronology of Cretaceous A-type granitoids or alkaline intrusive rocks in the hinterland, South China: constraints for late-Mesozoic tectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3):795-808 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y G, Suo S T and Zhang M F. 1994. Tectonics and Carlin-type gold deposits in southwestern Guizhou, China [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 512-516 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Ge W C, Sun D Y and Guo C L. 2003. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China [J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3):51-60 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Yang Y H and Xie L W. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. *Chem. Geol.*, 234:105-126.
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):185-220 (in Chinese with English abstract).
- Wu Y B and Zheng Y F. 2004. Zircon mineralogy and its constraints on the explanation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16):1589-1604 (in Chinese).
- Xie G Q, Mao J W, Hu R Z, Li R L and Cao J J. 2005. Discussion on some problems of Mesozoic and Cenozoic geodynamics of southeast China [J]. *Geological Review*, 51(6):613-620 (in Chinese with English abstract).
- Xiong J Y, Zhang Z B, Cai L S, Hu J J and Zhang W M. 1998. Study on the method of 1:50000 regional geological mapping in the inboard continental orogen- taking Ailaoshan orogen as sample [M]. Wuhan: China University of Geoscience Pub. House. 117-144. (in Chinese).
- Yan D P, Zhou M F, Wang Y, Wang C L and Zhao T P. 2005. Structural styles and chronological evidences from Dulong-Song Chay tectonic dome: Earlier spreading of South China Sea Basin due to late Mesozoic to early Cenozoic extension of South China Block [J]. *Earth Science*, 30(4):402-412 (in Chinese with English abstract).
- Yuan X C. 2007. Mushroom structure of the lithospheric mantle and its genesis at depth: Revisited [J]. *Geology in China*, 34(5):737-758 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Y F, Liu W J, Chen H D, Zheng R C, Zhang J Q, Li X Q and Jiang T C. 1995. Evolution of sedimentation and tectonics of the Youjiang composite basin, south China [J]. *Acta Geologica Sinica*,

69(2):113-124(in Chinese with English abstract).

Zhang F and Yang K Y. 1992. Metallogenic geochronology for the micro-grain disseminated gold deposits in southwestern Guizhou Province [J]. Chinese Science Bulletin, 27(17):1593~1595(in Chinese).

Zhou Y F. 1993. The application of regional gravity to the deep geology and mineralization prognosis in Guangxi [J]. Guangxi Geology, 6(2):15-24(in Chinese with English abstract).

Zhu L M, Liu X F, Jin J F and He M Y. 1998. The study of the time-space distribution and source of ore-forming fluid for the fine-disseminated gold deposits in the Yunnan-Guizhou-Guangxi area [J]. Scientia Geologica Sinica, 33(4):463-474(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

蔡明海, 梁婷, 吴德成, 黄惠民. 2004. 广西丹池成矿带构造特征及其控矿作用 [J]. 地质与勘探, 40(6):5-10.

陈懋弘, 毛景文, 吴六灵, 郑建民. 2006. 滇黔桂矿集区微细浸染型金矿成矿年代学研究 [J]. 桂林工学院学报, 26(3):334-340.

陈懋弘, 毛景文, 屈文俊, 吴六灵, Phillip J U, Tony Norman, 郑建民, 秦运忠. 2007. 贵州贞丰烂泥沟卡林型金矿床含砷黄铁矿 Re-Os 同位素测年及地质意义 [J]. 地质论评, 53(3):371-382.

陈懋弘, 程彦博, 章伟, 杨宗喜, 陆刚. 2008. 右江褶皱带燕山期岩浆作用与成矿作用初步研究 [A]. 见: 陈毓川, 薛春纪, 张长青, 主编. 主攻深部, 挺进西部, 放眼世界. 第九届全国矿床会议论文集 [C]. 北京: 地质出版社. 241-242.

陈卫锋, 陈培荣, 徐夕生, 张敏. 2005. 华南白垩纪玄武质岩石的地球化学特征及其对太平洋板块俯冲作用的制约 [J]. 中国科学(D 辑), 35(11):1007-1018.

范蔚茗, 王岳军, 郭锋, 彭头平. 2003. 湘赣地区中生代镁铁质岩浆作用与岩石圈伸展 [J]. 地学前缘, 10(3):15-25.

广西壮族自治区地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社. 1-96.

贵州省地质矿产局. 1987. 贵州省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社. 557页.

韩至钧, 王砚耕, 冯济舟, 陈潭钧, 刘远辉. 1999. 黔西南金矿地质与勘探 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社. 1-69.

侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用 [J]. 岩石学报, 23(10):2595-2604.

胡瑞忠, 彭建堂, 冯东升, 苏文超, 施春华, 毕献武, 涂光炽. 2007. 扬子地块西南缘大面积低温成矿时代 [J]. 矿床地质, 26(6):583-596.

华仁民, 朱金初, 赵一英, 周建平, 吴燕玉, 陈晓东. 1997. 右江褶皱带有色金属矿床成矿系列初步研究 [J]. 高校地质学报, 3(2):183-191.

华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 2005. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用 [J]. 矿床地质, 24(2):99-107.

李献华, 周汉文, 刘颖, 李寄, 陈正宏, 于津生, 桂训唐. 2001. 粤西阳春中生代高钾碱性侵入岩及其构造意义: II. 微量元素和 Sr-Nd 同位素地球化学 [J]. 地球化学, 31(1):57-65.

刘建中, 邓一明, 刘川勤, 夏勇, 张兴春, 陶琰. 2006. 水银洞金矿

床包裹体和同位素地球化学研究 [J]. 贵州地质, 23(1):51-56.

柳淮之, 钟白云, 姚明. 1986. 右江裂谷初探 [J]. 桂林冶金地质学院学报, 1(1):9-19.

毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展 [J]. 地学前缘, 11(1):45-55.

毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张作衡, 王义天, 王志良, 赵财胜, 杨富全, 李厚民. 2005. 大陆动力学演化与成矿研究: 历史与现状——兼论华南地区在地质历史演化期间大陆增生与成矿作用 [J]. 矿床地质, 24(3):193-205.

毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景 [J]. 岩石学报, 23(10):2329-2338.

毛景文, 程彦博, 郭春丽, 杨宗喜, 冯佳睿. 2008. 云南个旧锡矿田矿床模型及若干问题讨论 [J]. 地质学报, 82(11):1455-1467.

任纪舜, 姜春发, 张正伸. 1980. 中国大地构造及其演化 [M]. 北京: 科学出版社. 1-140.

宋彪, 张玉海, 万渝生. 2002. 锆石 SHRIMP 靶制作、年龄测定及有关现象讨论 [J]. 地质论评, 48(增刊):26-30.

索书田, 侯光久, 张明发, 王琨. 1993. 黔西南盘江大型多层次席状逆冲-推覆构造 [J]. 中国区域地质, 3:239-247.

王强, 赵振华, 简平, 熊小林, 包志伟, 戴撞漠, 许继峰, 马金龙. 2005. 华南腹地白垩纪 A 型花岗岩类或碱性侵入岩年代及其对华南晚中生代构造演化的制约 [J]. 岩石学报, 21(3):795-808.

王砚耕, 索书田, 张明发. 1994. 黔西南构造与卡林型金矿 [M]. 北京: 地质出版社. 512-516.

吴福元, 葛文春, 孙德有, 郭春丽. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题 [J]. 地学前缘, 10(3):51-60.

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 [J]. 岩石学报, 23(2):185-220.

吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. 科学通报, 49(16):1589-1604.

谢桂青, 毛景文, 胡瑞忠, 李瑞玲, 曹建劲. 2005. 中国东南部中生代地球动力学背景若干问题的探讨 [J]. 地质论评, 51(6):613-620.

熊家铺, 张志斌, 蔡麟芬, 胡建军, 张伟明. 1998. 陆内造山带 150 000 区域地质填图方法研究——以哀牢山造山带为例 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 117-144.

颜丹平, 周美夫, 王焰, 汪昌亮, 赵太平. 2005. 都龙-Song Chay 变质穹隆体变形与构造年代——南海盆地北缘早期扩张作用始于华南地块张裂的证据 [J]. 地球科学, 30(4):402-412.

袁学诚. 2007. 再论岩石圈地幔蘑菇云构造及其深部成因 [J]. 中国地质, 34(5):737-758.

云南省地质矿产局. 1990. 云南省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社. 573页.

曾允孚, 刘文均, 陈洪德, 郑荣才, 张锦泉, 李孝全, 蒋廷操. 1995. 华南右江复合盆地的沉积构造演化 [J]. 地质学报, 69(2):113-124.

张峰, 杨科佑. 1992. 黔西南微细浸染金矿裂变迹成矿时代研究 [J]. 科学通报, 27(17):1593-1595.

周永峰. 1993. 区域重力资料研究在广西深部地质和成矿预测中的应用 [J]. 广西地质, 1(2):15-24.

朱赖民, 刘显凡, 金景福, 何明友. 1998. 滇黔桂微细浸染型金矿床时空分布与成矿流体来源研究 [J]. 地质科学, 33(4):463-474.