

华南燕山晚期构造-岩浆事件与成矿作用

——来自广西大瑶山龙头山金矿床的地球化学约束

段瑞春^{1, 2)}, 凌文黎¹⁾, 李青³⁾, 陈子万¹⁾, 杨红梅²⁾, 刘立芬⁴⁾

1) 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉, 430074; 2) 武汉地质矿产研究所, 武汉, 430205;
3) 广西地质矿产勘查开发局, 南宁, 530023; 4) 黑龙江省地质调查研究总院, 哈尔滨, 150036

内容提要:广西贵港大瑶山成矿带位于华南东南沿海成矿带西南端,对矿带内龙头山金矿黄铁矿化斑岩进行定年的结果为 96.1 ± 3.0 Ma,与区域内邻近的平天山侵入岩体(96.2 ± 0.4 Ma)相同。龙头山矿床的 Sr 同位素组成与其锆石的 REE 特征表明,成矿作用伴随有大量的流体参与;矿化斑岩与区内侵入相岩石相同的形成时代以及矿化斑岩中锆石 Ce 的正异常明显强于侵入岩锆石的现象指示,成矿过程经历了快速的区域地壳抬升和体系氧逸度大幅增高;两类岩浆岩 Nd 同位素组成与华南低 Nd 模式年龄带相当,反映岩浆活动有不同比例的幔源物质参与。因此,大量成矿流体的参与、区域地壳抬升、流体沿深大断裂上迁过程中的突然冷却以及氧逸度增高是导致龙头山金矿成矿作用发生的重要条件;中生代古太平洋板块的低角度俯冲作用导致了区域地壳较大范围的流体释放,而地幔岩浆物质的板底垫托作用导致高溶解度成矿流体沿构造通道向上迁移,应是华南中生代大规模成矿发生的重要背景。

关键词:龙头山金矿;U-Pb 年代学;地球化学;成矿作用;华南成矿带

我国东部沿海是金-银贵金属矿床和 Cu-Pb-Zn 等多金属矿床的重要产地,在我国矿产资源勘查及基础地质科学研究中具有重要的地位(毛景文, 2003)。前人对我国东部大陆成矿作用的特点进行了长期和系统的研究,并对大规模成矿作用与区域岩石圈构造演化的关系进行了探讨(南京大学地质系, 1981;地矿部南岭项目花岗岩专题组, 1989;任纪舜等, 1990;姚凤良等, 1990;Zhou et al., 2002;毛景文等, 2005;华仁民等, 2005)。全球大多数金矿形成于太古宙和新生代(Frimmel, 2008),但中国金矿形成的峰期为古生代和中生代(包括加里东期、印支期和燕山期),并以燕山期为主;在空间上,与世界其他地区重要金矿床位于克拉通内部(如南非、澳大利亚和加拿大)不同,我国主要金矿形成于各前寒武纪大陆地块边缘的显生宙碰撞带或活动带中(Zhou et al., 2002),且成矿作用不同程度地伴随有区域构造性质转折、克拉通活化、板块俯冲或碰撞造山等事件(Pirajno and Bagas, 2002; Qiu et al., 2002;

Zaw et al., 2007)。由于这些金矿床多在空间上与岩浆岩存在不同程度的共生关系,故常将其归为岩浆热液型矿床。Au 在地幔和地壳中的平均丰度仅约为 1×10^{-9} (Palme and O'Neill, 2003; Rudnick and Gao, 2003),其与铂族元素相似而具亲铁和亲硫性,即在部分熔融作用过程中,表现为弱不相容元素或相容元素,在岩浆形成和结晶分异过程中发生相对富集的能力有限(Oshin and Crocket, 1982; Righter et al., 2004),单一的岩浆作用过程通常难以导致大规模金矿的形成。因此,了解成矿作用的区域构造和岩石圈演化动力学背景,正确认识岩浆作用与金矿床成因之间的相互关系,将不仅为探讨显生宙晚期中国东部大陆构造演化的性质提供新线索,且对促进区域金矿床勘查具有现实意义。

龙头山金矿床位于桂东金(银)贵金属-多金属成矿带内(图1),属华南褶皱带西南端,被划分为燕山晚期岩浆热液型矿床(黄民智, 1999;陈开礼, 2002;朱桂田, 2002)。本文报道了龙头山金矿床矿化斑岩、不含

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 40873017, 40673025)资助的成果。

收稿日期:2010-12-21;改回日期:2011-05-03;责任编辑:周健。

作者简介:段瑞春,女,1984年生。研究助理员,主要从事同位素地球化学和矿床学研究。Email: duanruichun_123@163.com。通讯作者:凌文黎,Email: lingwenli2008@126.com。

DOI:CNKI:11-1951/P. 20110923. 1427. 005 网络出版时间:2011-9-23 14:27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20110923.1427.005.html>

矿的平天山岩体系统的 U-Pb 年代学、元素及 Sr-Nd 同位素地球化学研究结果,分析了成矿作用与岩浆作用的关系,探讨了中—新生代以来区域构造-岩浆演化为成矿带形成所提供的动力学背景。

1 区域地质和矿床学特征

龙头山金矿床位于广西大瑶山隆起山系西段,区域内出露的主要地层为震旦系、寒武系、泥盆系和石炭系,寒武纪与泥盆纪地层之间呈不整合接触。大瑶山山系地层呈近 NE—SW 向展布,以复式背斜(鼻状背斜)的形式向 SW 端倾伏(图 1a)。区域断裂构造主要有 NE、NW 和 SN 向三组,其中 NE 向凭祥—大黎深大断裂带贯穿全区。相对于其东南侧的云开地区和大容山地区,大瑶山隆起区出露的岩浆岩规模较小,且主要为燕山期花岗闪长质侵入岩株和少量潜火山—火山岩系。值得指出,在矿田范围内发育少量中-酸性侵入岩墙(脉),其中出露于砵矿沟矿区的长英质岩脉,经锆石 U-Pb 同位素定年(LA-ICP-MS),获得了 243 ± 1 Ma 的年龄(95%置信度,MSWD=1.7,本文作者未发表数据),表明研究区存在印支期岩浆作用。

龙头山矿床属龙山—龙头山矿区,矿体产于潜火

山岩相岩系中(图 2),矿区范围内的其他金矿床(如六梅、砵矿沟和新民)则多数产于寒武系黄洞口组、部分产于下泥盆统莲花山组内。龙头山矿床中金主要以自然金、金银矿形式呈微粒状赋存于以黄铁矿为主的硫化物中,其他硫化物有辉铜矿、铜蓝、黄铜矿等,脉石矿物主要有石英、电气石、绿帘石等,主要矿石类型为细脉网状或以充填相存在于爆破角砾岩和构造角砾岩中(黄民智等,1999;朱桂田,2002)。

2 分析方法

将挑纯锆石颗粒制成环氧树脂样品靶,磨至锆石颗粒中心部位后抛光,在进行 CL 显微结构观察后,对锆石进行 U-Pb 年龄测定。锆石 U-Pb 同位素和微量元素组成采用激光剥蚀—等离子体质谱(LA-ICPMS)联机技术在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。U-Pb 同位素分析采用 91500 国际标准锆石为外标,元素含量测定以 NIST SRM610 为外标。激光束斑为 $32 \mu\text{m}$,剥蚀深度 $20 \sim 40 \mu\text{m}$ (详见 Yuan et al., 2004)。样品同位素比值及元素含量采用 Glitter (Ver 4.0) 程序计算,U-Pb 年龄则由 Isoplot/Ex (rev. 3. 23) 版本的 Excel 模板(Ludwig, 2001) 计算获得。

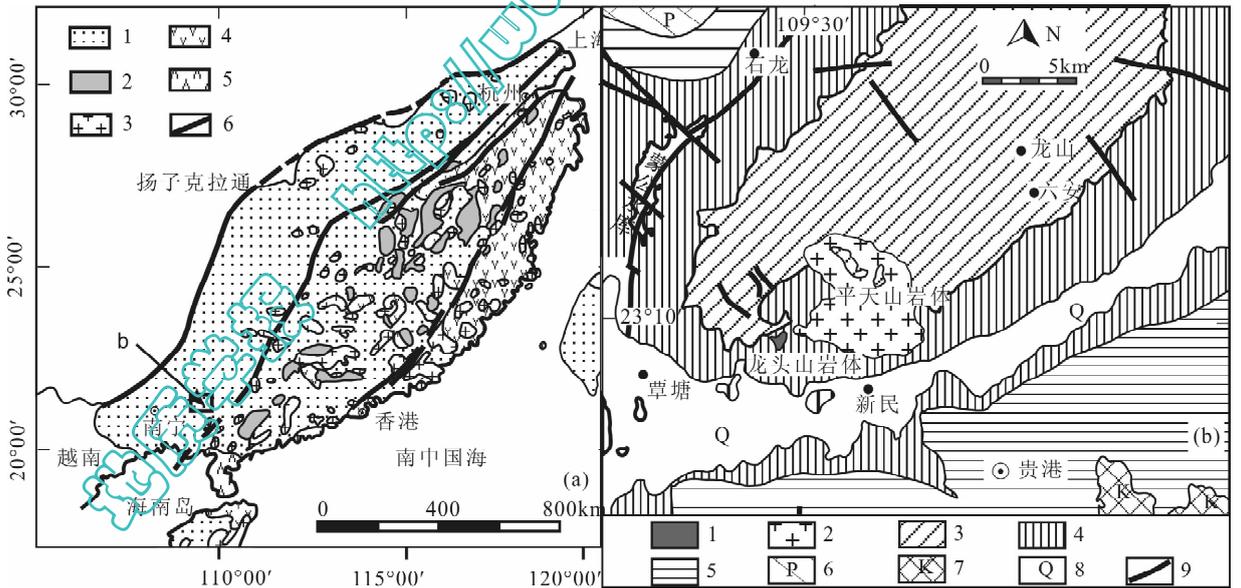


图 1 华南(a)和龙头山地区(b)地质简图(据王德滋和沈渭洲,2003)

Fig. 1 Geological sketch map of South China (a) and the Longtoushan area (b) (modified after Wang and Shen, 2003)
 (a): 1—元古宙—显生宙变沉积岩; 2—华夏地块元古宙内窗层; 3—燕山期花岗岩; 4—燕山期火山岩; 5—始新世—更新世火山岩; 6—断裂; (b): 1—潜火山岩; 2—中-酸性侵入岩; 3—寒武系; 4—泥盆纪; 5—石炭系; 6—二叠系; 7—白垩系; 8—第四系; 9—断裂
 (a): 1—Proterozoic—Phanerozoic strata; 2—Proterozoic fenster; 3—Yanshanian granite; 4—Yanshanian volcanic rock; 5—Eocene—Pleistocene volcanic rock; 6—fault; (b): 1—subvolcanic rock; 2—intermediate-acid intrusive; 3—Cambrian; 4—Devonian; 5—Carboniferous; 6—Permian; 7—Cretaceous; 8—Quaternary; 9—fault

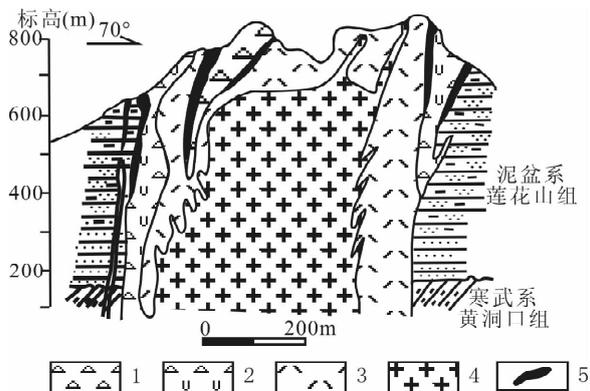


图2 龙头山金矿床剖面地质图(据陈开礼,2002 修改)

Fig.2 Sketch section map of the Longtoushan gold deposit (modified after Chen, 2002)

1—隐爆角砾岩;2—流纹岩;3—扉细斑岩;4—花岗岩斑岩;5—金矿体
1—Cryoexplosive breccia; 2—rhyolite; 3—felsophyre;
4—granitic-porphry; 5—ore bodies

主量元素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室采用碱熔玻璃片法制样、用 RIGAKU2100 型 XRF 分析。微量元素和 Sr-Nd 同位素分析在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。样品经高压 Teflon 溶样弹溶解,定容后在 Agilent 7500a ICP-MS 上完成微量元素测试(胡圣虹等,2000);经高压 Teflon 溶样弹溶解、AG50X12 树脂-LN 特效树脂分离和纯化流程制样后,样品的 Sr、Nd 同位素组成用 Triton-Ti TIMS 分析,国际标样 La Jolla 和 NBS987 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的测量结果分别为 0.511847 ± 2 和 0.710272 ± 6 。

3 锆石 U-Pb 年代学特征

对龙头山矿床黄铁矿矿化斑岩(LTS06-01,GPS: $\text{N}23^{\circ}09.191'$, $\text{E}109^{\circ}29.180'$)和平天山岩体(XM06-01,GPS: $\text{N}23^{\circ}08.866'$, $\text{E}109^{\circ}32.362'$)进行了锆石 U-Pb 同位素定年。锆石均呈无色—淡黄色,多为自形长柱状,其 CL 图像显示其内部具有震荡环带结构(图 3a、c)。样品的锆石 U-Pb 同位素组成列于表 1。对 XM06-01 样品中 30 粒锆石进行了 30 个点的分析,其中 26 粒具谐和组成,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 96.2 ± 0.4 Ma (MSWD=1.08),与这些点拟合的交点年龄 96.8 ± 0.6 Ma (MSWD=0.82) 在误差范围内一致(图 3b)。对 LTS06-01 样品 29 粒锆石进行了 30 个点的分析,其中 13 粒谐和锆石给出了 96.1 ± 3.0 Ma (MSWD=6.7) 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均表面年龄,与这些点拟合的交点年龄 94.6 ± 4.6 Ma (MSWD=2.9) 在误差范围内一致(图 3d)。另外三粒

锆石同位素组成基本谐和,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄分别为 252 ± 2 Ma、 352 ± 3 Ma 和 584 ± 4 Ma(图 3c)。两件样品锆石的稀土元素组成列于表 2。样品 XM06-01 中锆石 REE 总含量为 $330 \times 10^{-6} \sim 1172 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 0.05~0.49,具有 LREE 相对平坦、HREE 相对富集的特征,而样品 LTS06-01 中锆石 REE 总含量为 $564 \times 10^{-6} \sim 2169 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 0.04~0.074,明显亏损 LREE, HREE 相对富集,且具有程度明显强于前者的 Ce 正异常(图 4)。

4 地球化学特征

平天山岩体和龙头山潜火山岩体共 17 件样品的主量、微量元素和 Sr-Nd 同位素组成列于表 3。平天山岩体与龙头山潜火山岩的 SiO_2 含量范围分别为 64%~71%和 64%~69%,在 TAS(全碱-二氧化硅)图解上,前者主要落入花岗闪长岩、部分样品落入花岗岩区域,而后者表现为低碱英安质火山岩特征(图 5a)。平天山岩体的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值范围为 0.9~1.03,显示出 Na_2O 和 K_2O 含量相近或轻度富钾的特点,而龙头山潜火山岩的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 5.2~38.2,具相对高富钠特征;在 SiO_2 - K_2O 图解(图 5b)上,龙头山潜火山表现为低钾岩系,而平天山岩体则为高钾岩系。平天山岩体的铝饱和指数 A/CNK 值为 1~1.8 之间,显示出一定程度的过铝质特征,而龙头山潜火山岩体则为 5~12,即使与大多数典型的 S 型花岗岩相比也显得较高(图 5c)。在 Harker 图解(图 6)中,龙头山潜火山岩与平天山花岗闪长岩的主量元素组成变化范围有限,两套岩浆岩的 MnO 、 K_2O 和 Na_2O 与 SiO_2 之间存在弱的正相关,且龙头山潜火山岩中 TiO_2 、 MgO 与 SiO_2 之间存在弱的负相关。此外,龙头山潜火山岩的 TFe_2O_3 含量(6.1%~7.0%)明显高于平天山岩体的 TFe_2O_3 含量(2.8%~3.2%)。

龙头山潜火山岩(图 7a)的 REE 组成特征与显生宙花岗岩(Hamilton,2000)基本相似,具明显的铕负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.36 \sim 0.60$), LREE/HREE 为 4.0~19.2,且部分样品具有一定程度的 HREE 富集(如样品 GG07-15 和 GG07-19,其 Dy_N/Yb_N 分别为 0.53 和 0.45)。REE 总含量为 $32 \times 10^{-6} \sim 123 \times 10^{-6}$,与显生宙花岗岩相比,略显偏低且不同样品间含量变化较大。平天山岩体(图 7b)的 REE 配分形式也与显生宙花岗岩相似,具不同程度的铕负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.54 \sim 0.63$),REE 总含量为 $87 \times 10^{-6} \sim 208 \times 10^{-6}$ 。与龙头山潜火山岩不同,平天

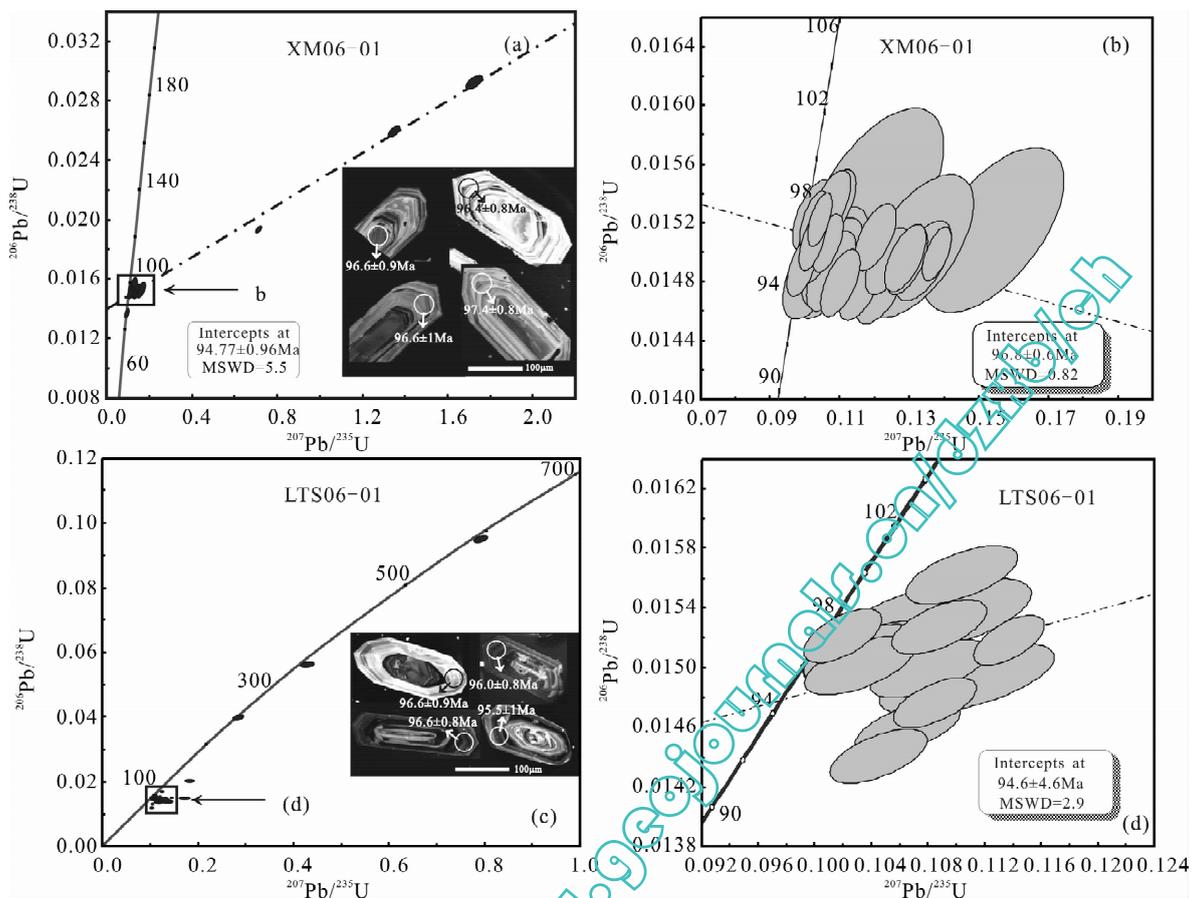


图 3 龙头山矿化斑岩(LTS06-01)和平天山岩体(XM06-01)锆石 CL 图像及其 U-Pb 谐和图
 Fig. 3 Cathodoluminescence images and U-Pb concordia diagrams of zircons from the Longtoushan mineralized porphyry (LTS06-01) and the Pingtianshan pluton (XM06-01)

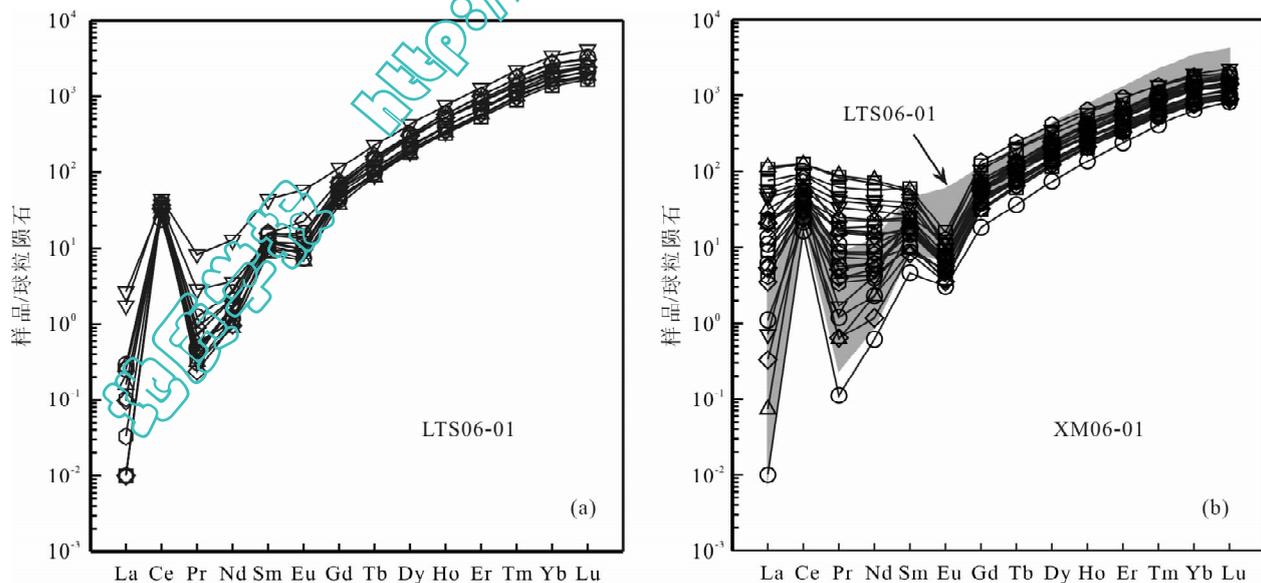


图 4 龙头山矿化斑岩(a)和平天山岩体(b)锆石稀土元素配分模式图
 Fig. 4 Chondrite normalized REE patterns of zircons from the Longtoushan mineralized porphyry (a) and the Pingtianshan pluton (b)

表 1 平天山岩体和龙头山矿化斑岩锆石 U-Pb 同位素组成及其表面年龄

Table 1 U-Pb composition and apparent ages of zircons from the Pingtianshan pluton and the Longtoushan mineralized porphyry

分析号	测量比值									表面年龄(Ma)							
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm 1\sigma$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm 1\sigma$			
	XM06-01																
XM06-01.1	0.0502	0.0030	0.1029	0.0061	0.01488	0.00022	0.00526	0.00018	0.482	203	135	99.4	5.6	95.2	1.4	106.1	3.5
XM06-01.2	0.0638	0.0054	0.1324	0.0108	0.01504	0.00032	0.00556	0.00027	0.526	736	159	126.2	9.7	96.3	2.0	112.0	5.4
XM06-01.3	0.0484	0.0015	0.0995	0.0030	0.01491	0.00014	0.00477	0.00007	0.872	117	93	96.3	2.8	95.4	0.9	96.3	1.3
XM06-01.4	0.0497	0.0012	0.1044	0.0023	0.01522	0.00012	0.00482	0.00006	0.615	182	54	100.8	2.1	97.4	0.8	97.3	1.2
XM06-01.5	0.0599	0.0025	0.1219	0.0048	0.01477	0.00017	0.00505	0.00008	1.140	598	86	116.8	4.3	94.5	1.1	101.9	1.6
XM06-01.6	0.0486	0.0019	0.1023	0.0038	0.01525	0.00016	0.00518	0.00011	0.527	30	89	98.9	3.5	97.6	1.0	104.4	2.1
XM06-01.7	0.0494	0.0016	0.1027	0.0032	0.01510	0.00014	0.00484	0.00007	0.826	164	74	99.3	2.9	96.6	0.9	97.5	1.4
XM06-01.8	0.0492	0.0013	0.1023	0.0026	0.01507	0.00013	0.00486	0.00007	0.656	158	63	98.9	2.4	96.4	0.8	98.0	1.3
XM06-01.9	0.0651	0.0027	0.1341	0.0054	0.01494	0.00018	0.00560	0.00011	0.833	777	86	127.7	4.8	95.6	1.1	112.8	2.2
XM06-01.10	0.0525	0.0024	0.1076	0.0048	0.01487	0.00018	0.00487	0.00009	1.176	307	101	103.8	4.4	95.1	1.1	98.2	1.8
XM06-01.11	0.0499	0.0022	0.1036	0.0045	0.01504	0.00017	0.00496	0.00012	0.514	191	101	100.0	4.1	96.3	1.1	100.0	2.4
XM06-01.12	0.0565	0.0065	0.1196	0.0135	0.01534	0.00042	0.00574	0.00038	0.635	472	238	114.7	12.2	98.1	2.6	115.7	6.6
XM06-01.13	0.0482	0.0033	0.0903	0.0060	0.01357	0.00021	0.00450	0.00013	0.837	111	154	87.8	5.6	86.9	1.4	90.8	2.6
XM06-01.14	0.0489	0.0014	0.1027	0.0027	0.01522	0.00013	0.00488	0.00007	0.671	143	64	99.2	2.5	97.4	0.8	98.3	1.4
XM06-01.15	0.0541	0.0020	0.1103	0.0038	0.01479	0.00015	0.00504	0.00011	0.451	374	79	106.2	3.5	94.6	1.0	101.6	2.2
XM06-01.16	0.4288	0.0082	1.7275	0.0264	0.02922	0.00033	0.01699	0.00049	0.747	4013	28	1018.8	9.8	185.6	2.1	910.8	9.5
XM06-01.17	0.2674	0.0039	0.7093	0.0082	0.01924	0.00016	0.01835	0.00015	0.870	3291	23	544.3	4.9	122.8	1.0	367.6	2.9
XM06-01.18	0.0579	0.0020	0.1204	0.0040	0.01510	0.00015	0.00522	0.00009	0.704	524	74	115.5	3.6	96.6	1.0	105.2	1.8
XM06-01.19	0.0570	0.0021	0.1162	0.0042	0.01478	0.00016	0.00524	0.00009	0.898	491	81	111.6	3.8	94.6	1.0	105.6	1.7
XM06-01.20	0.0739	0.0067	0.1543	0.0134	0.01515	0.00037	0.00613	0.00027	0.776	1038	172	145.7	11.8	96.9	2.4	123.4	5.4
XM06-01.21	0.0628	0.0020	0.1295	0.0040	0.01494	0.00015	0.00558	0.00009	0.707	703	67	123.6	3.6	95.6	0.9	112.5	1.8
XM06-01.22	0.0510	0.0018	0.1077	0.0036	0.01533	0.00015	0.00483	0.00008	0.706	239	79	103.8	3.3	98.1	1.0	97.4	1.7
XM06-01.23	0.3778	0.0063	1.3474	0.0178	0.02586	0.00025	0.05157	0.00049	0.530	3823	25	866.4	7.7	164.6	1.6	1016.4	9.4
XM06-01.24	0.0515	0.0020	0.1088	0.0040	0.01532	0.00016	0.00511	0.00010	0.619	262	85	104.8	3.6	98	1.0	102.9	2.0
XM06-01.25	0.0514	0.0015	0.1067	0.0029	0.01506	0.00013	0.00499	0.00007	0.651	258	64	102.9	2.6	96.4	0.8	100.5	1.5
XM06-01.26	0.0521	0.0037	0.1073	0.0073	0.01493	0.00025	0.00485	0.00017	0.719	290	153	103.5	6.7	95.6	1.6	97.8	3.3
XM06-01.27	0.0524	0.0029	0.1079	0.0059	0.01493	0.00020	0.00537	0.00014	0.737	303	123	104	5.4	95.6	1.3	108.3	2.7
XM06-01.28	0.0668	0.0015	0.1380	0.0028	0.01499	0.00012	0.00542	0.00006	0.939	832	45	131.3	2.5	95.9	0.8	109.3	1.1
XM06-01.29	0.0601	0.0022	0.1233	0.0042	0.01494	0.00015	0.00528	0.00009	0.849	607	76	118.5	3.8	95.6	1.0	106.5	1.8
XM06-01.30	0.0625	0.0020	0.1290	0.0040	0.01496	0.00015	0.00550	0.00010	0.600	692	67	123.2	3.6	95.7	0.9	110.9	2.0

分析号	测量比值									表面年龄(Ma)							
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm 1\sigma$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm 1\sigma$	
LTS06-01																	
LTS06-01.01	0.0533	0.0011	0.1248	0.0023	0.01699	0.00013	0.00564	0.00007	0.358	340	45	119.4	2.1	108.6	0.8	113.7	1.4
LTS06-01.02	0.0578	0.0012	0.1060	0.0020	0.01329	0.00010	0.00433	0.00005	0.420	523	44	102.3	1.8	85.1	0.7	87.2	1.1
LTS06-01.03	0.0635	0.0018	0.1188	0.0032	0.01357	0.00013	0.00451	0.00009	0.361	725	59	114	2.9	86.9	0.8	91.0	1.8
LTS06-01.04	0.0499	0.0016	0.1040	0.0032	0.01510	0.00014	0.00499	0.00010	0.396	192	33	100.4	2.9	96.6	0.9	100.6	1.9
LTS06-01.05	0.0517	0.0014	0.2845	0.0074	0.03989	0.00035	0.01236	0.00026	0.255	273	62	254.2	5.8	252.1	2.2	248.4	5.2
LTS06-01.06	0.0555	0.0013	0.4290	0.0093	0.05607	0.00047	0.02386	0.00047	0.161	432	51	362.5	6.6	351.7	2.9	476.6	9.3
LTS06-01.07	0.0517	0.0012	0.1088	0.0022	0.01527	0.00012	0.00496	0.00006	0.468	274	50	104.9	2.0	97.7	0.8	100.0	1.3
LTS06-01.08	0.0533	0.0011	0.1085	0.0019	0.01476	0.00011	0.00468	0.00006	0.419	342	44	104.6	1.8	94.5	0.7	94.4	1.1
LTS06-01.09	0.0499	0.0013	0.1032	0.0026	0.01501	0.00013	0.00484	0.00008	0.421	188	61	99.7	2.4	96	0.8	97.6	1.5
LTS06-01.10	0.0571	0.0013	0.1201	0.0026	0.01525	0.00013	0.00528	0.00007	0.406	496	51	115.2	2.3	97.6	0.8	106.4	1.5
LTS06-01.11	0.0496	0.0014	0.1033	0.0027	0.01509	0.00013	0.00474	0.00006	0.475	178	64	99.8	2.5	96.6	0.8	95.5	1.3
LTS06-01.12	0.0606	0.0015	0.1250	0.0029	0.01497	0.00013	0.00436	0.00007	0.516	624	52	119.6	2.6	95.8	0.8	87.9	1.3
LTS06-01.13	0.0523	0.0014	0.1081	0.0028	0.01499	0.00013	0.00486	0.00007	0.513	298	61	104.2	2.5	95.9	0.8	97.9	1.5
LTS06-01.14	0.0530	0.0013	0.1066	0.0025	0.01459	0.00012	0.00454	0.00006	0.483	328	55	102.8	2.3	93.4	0.8	91.5	1.3
LTS06-01.15	0.0629	0.0017	0.1039	0.0026	0.01198	0.00011	0.00392	0.00006	0.571	706	55	100.4	2.4	76.7	0.7	79.2	1.2
LTS06-01.16	0.0695	0.0013	0.1441	0.0023	0.01504	0.00012	0.00637	0.00007	0.459	912	37	136.7	2	96.3	0.7	128.4	1.3
LTS06-01.17	0.0526	0.0012	0.1045	0.0023	0.01440	0.00012	0.00507	0.00007	0.344	313	53	100.9	2.1	92.2	0.8	102.3	1.5
LTS06-01.18	0.0714	0.0038	0.1367	0.0069	0.01389	0.00021	0.00551	0.00017	0.502	969	104	130.1	6.2	88.9	1.3	111.0	3.3
LTS06-01.19	0.0486	0.0010	0.1020	0.0018	0.01521	0.00012	0.00489	0.00006	0.396	130	46	98.6	1.7	97.3	0.7	98.6	1.2
LTS06-01.20	0.0539	0.0021	0.1108	0.0041	0.01492	0.00016	0.00507	0.00010	0.518	365	85	106.7	3.8	95.5	1.0	102.2	2.1
LTS06-01.21	0.0607	0.0009	0.7935	0.0098	0.09487	0.00063	0.02863	0.00024	0.592	627	31	593.2	5.5	584.3	4.0	570.6	4.7
LTS06-01.22	0.0513	0.0023	0.1084	0.0046	0.01533	0.00018	0.00495	0.00010	0.669	252	99	104.5	4.2	98.1	1.1	99.9	2.1
LTS06-01.23	0.0591	0.0020	0.1143	0.0036	0.01403	0.00014	0.00491	0.00010	0.398	569	71	109.8	3.3	89.8	0.9	98.9	2.1
LTS06-01.24	0.0513	0.0013	0.1104	0.0026	0.01562	0.00013	0.00526	0.00006	0.546	252	57	106.4	2.4	99.9	0.8	106.1	1.3
LTS06-01.25	0.0544	0.0009	0.1138	0.0017	0.01518	0.00011	0.00497	0.00005	0.398	386	37	109.4	1.5	97.1	0.7	100.2	1.0
LTS06-01.26	0.0652	0.0026	0.1831	0.0069	0.02036	0.00024	0.00971	0.00021	0.423	782	81	170.7	5.9	129.9	1.5	195.2	4.2
LTS06-01.27	0.0647	0.0028	0.1301	0.0053	0.01459	0.00018	0.00555	0.00013	0.495	763	87	124.1	4.8	93.4	1.1	111.9	2.7
LTS06-01.28	0.0839	0.0039	0.1725	0.0075	0.01492	0.00021	0.00607	0.00018	0.452	1289	88	161.6	6.6	95.5	1.4	122.4	3.7
LTS06-01.29	0.0666	0.0015	0.1272	0.0026	0.01385	0.00011	0.00464	0.00007	0.413	825	45	121.6	2.3	88.7	0.7	93.6	1.3

表 2 平天山岩体和龙头山矿化斑岩锆石中的稀土元素组成 ($\times 10^{-6}$)Table 2 REE compositions ($\times 10^{-6}$) of zircons from the Pingtianshan pluton and the Longtoushan mineralized porphyry

分析点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	(Eu/Eu*) _N	(Ce/Ce*) _N
XM06-01																
XM06-01.1	<0.0082	15.6	0.02	0.43	1.07	0.26	5.61	2.10	27.9	11.6	59.2	14.7	161	31.5	0.26	269
XM06-01.2	0.41	20.7	0.16	1.63	1.98	0.44	9.86	3.79	47.4	18.0	83.0	18.7	194	35.9	0.25	19.0
XM06-01.3	21.2	88.1	6.34	29.4	9.07	0.83	23.9	7.87	91.2	33.9	151	32.9	321	56.9	0.16	1.80
XM06-01.4	0.03	44.5	0.09	1.62	3.69	0.51	20.6	7.70	93.8	35.5	165	37.3	380	67.2	0.14	134
XM06-01.5	28.0	89.8	8.33	39.7	13.8	1.38	36.8	11.3	120	41.1	171	35.0	324	55.1	0.18	1.00
XM06-01.6	3.33	28.8	1.02	4.84	2.33	0.34	9.46	3.52	44.2	17.5	84.1	20.1	215	39.1	0.19	4.00
XM06-01.7	1.96	38.2	0.70	4.31	4.08	0.68	18.3	6.80	81.9	31.0	141	31.2	310	54.9	0.20	7.60
XM06-01.8	1.28	44.4	0.54	3.67	4.17	0.49	21.0	7.66	92.7	35.1	160	35.6	357	63.3	0.18	13.0
XM06-01.9	42.0	120	12.1	55.2	13.0	0.94	22.4	6.34	67.8	23.8	103	21.9	211	37.5	0.17	1.20
XM06-01.10	0.26	39.1	0.23	2.92	5.72	1.09	31.6	11.3	133	50.3	227	48.5	472	85.2	0.20	34.3
XM06-01.11	8.04	42.9	3.10	15.6	5.20	0.48	12.8	4.39	53.3	20.9	99.2	23.0	241	45.4	0.17	2.00
XM06-01.12	3.30	40.1	1.14	5.79	4.34	0.46	16.5	5.57	69.4	24.8	111	24.8	242	42.7	0.15	5.00
XM06-01.13	0.02	31.6	0.19	1.29	3.26	0.50	18.1	6.55	75.4	27.8	124	27.0	265	44.7	0.16	46.4
XM06-01.14	4.04	49.2	1.20	6.19	4.35	0.57	20.9	7.81	96.0	36.6	166	37.1	371	65.8	0.15	5.20
XM06-01.15	2.25	30.6	0.76	4.31	3.38	0.69	17.4	6.97	88.5	34.9	166	38.6	342	71.4	0.22	5.00
XM06-01.16	0.13	28.9	0.08	1.05	2.16	0.31	11.5	4.43	53.6	20.1	90.2	26.1	202	36.1	0.15	66.0
XM06-01.17	7.88	79.4	3.28	19.4	12.2	3.18	39.5	12.6	140	48.5	205	43.3	418	71.2	0.40	3.65
XM06-01.18	18.6	66.5	5.64	26.4	7.63	0.83	19.2	6.33	73.7	28.0	127	28.4	285	50.3	0.20	1.50
XM06-01.19	7.42	43.9	2.29	10.5	4.09	0.63	13.8	4.72	55.6	20.9	95.2	21.1	211	37.6	0.23	2.50
XM06-01.20	8.03	37.1	2.34	11.4	3.54	0.50	13.4	4.69	54.8	20.8	83.3	20.9	196	35.9	0.19	2.00
XM06-01.21	39.0	120	11.4	50.2	12.1	0.92	22.7	6.81	76.7	28.8	129	29.2	292	51.1	0.17	1.30
XM06-01.22	7.62	49.0	2.14	10.1	4.12	0.62	16.7	6.16	75.3	28.0	133	29.5	295	54.2	0.20	2.80
XM06-01.23	48.5	146	15.9	76.7	19.4	2.78	27.1	7.47	81.5	30.5	142	32.9	338	63.3	0.37	1.23
XM06-01.24	0.12	22.9	0.09	0.83	1.88	0.30	10.0	3.72	46.8	17.9	82.6	18.7	191	34.0	0.17	49.5
XM06-01.25	11.8	56.0	3.39	16.2	5.62	0.69	17.4	6.17	74.4	28.6	132	30.1	307	54.2	0.20	2.10
XM06-01.26	16.6	58.0	4.64	21.5	5.98	0.52	14.2	4.50	52.8	19.6	87.5	19.8	195	34.7	0.17	1.50
XM06-01.27	1.51	27.9	0.46	2.72	2.45	0.32	12.0	4.17	50.8	19.3	86.9	19.2	192	34.3	0.15	8.00
XM06-01.28	8.63	77.2	2.49	13.5	10.3	1.12	41.5	14.3	157	54.9	231	47.7	438	75.0	0.14	3.90
XM06-01.29	4.98	37.1	1.50	7.71	4.14	0.48	16.2	5.66	65.6	24.1	107	23.0	226	39.3	0.15	3.00
XM06-01.30	1.96	23.6	0.56	3.04	2.35	0.41	11.6	4.28	51.7	19.6	89.3	20.4	207	37.7	0.20	5.20
LTS06-01																
LTS06-01.01	<0.024	37.6	0.04	0.83	2.87	0.80	20.2	8.86	123	53.0	275	67.1	729	146	0.23	271
LTS06-01.02	0.364	36.9	0.58	5.77	9.62	0.84	54.1	19.2	220	82.4	388	93.1	1002	184	0.72	14.7
LTS06-01.03	0.149	21.4	0.13	1.38	2.20	1.09	12.4	5.29	73.6	32.4	174	45.6	520	100	0.50	33.0
LTS06-01.04	0.093	23.0	0.07	0.85	2.24	0.64	13.5	5.78	80.4	34.0	173	43.3	479	89.9	0.27	64.2
LTS06-01.05	<0.0162	0.98	0.06	1.24	4.35	0.10	31.4	14.4	191	75.7	344	73.9	701	118	0.02	4.70
LTS06-01.06	<0.016	3.22	0.05	1.20	3.21	0.15	24.8	11.9	165	69.8	334	74.7	737	132.8	0.04	18.7
LTS06-01.07	<0.0125	31.1	0.06	1.20	2.75	1.00	16.1	6.39	85.4	34.4	169	41.2	439	79.2	0.35	137
LTS06-01.08	0.641	42.2	1.14	9.05	10.2	5.08	34.8	13.1	163	65.1	321	78.4	846	156	0.74	8.80
LTS06-01.09	0.058	27.6	0.04	0.63	1.97	0.59	11.5	5.07	68.6	28.8	145	35.9	390	71.9	0.29	121
LTS06-01.10	0.0254	31.2	0.08	1.15	2.36	1.04	13.6	5.39	69.9	29.0	144	36.0	386	71.9	0.44	99.6
LTS06-01.11	<0.0119	39.8	0.06	1.11	2.77	0.99	14.6	5.48	69.7	27.6	134	32.0	343	63.7	0.38	186
LTS06-01.12	0.079	35.8	0.10	1.06	3.05	1.12	19.9	8.61	120	49.5	250	62.0	674	126	0.33	81.8
LTS06-01.13	<0.0109	36.0	0.05	1.25	3.40	1.16	21.6	8.50	111	44.3	212	50.6	526	93.0	0.31	197
LTS06-01.14	0.036	32.1	0.12	1.50	3.68	1.96	22.8	9.44	116	44.4	208	48.4	506	91.5	0.50	66.6
LTS06-01.15	0.173	40.8	0.76	13.1	52.5	32.5	156	43.4	358	97.1	370	78.6	803	123	1.02	14.1
LTS06-01.16	0.341	40.7	0.66	5.18	7.18	3.48	27.1	10.2	129	50.7	252	62.1	680	124	0.67	14.8
LTS06-01.17	<0.0095	35.4	0.03	0.69	2.77	0.85	19.1	8.59	119	49.6	249	62.7	686	117	0.26	298
LTS06-01.18	0.0095	28.0	0.06	0.90	2.14	0.81	11.3	4.03	53.6	20.9	102	26.0	282	50.1	0.40	123
LTS06-01.19	0.101	32.0	0.08	0.77	2.54	0.72	17.9	7.80	107	45.1	224	54.4	581	106	0.24	79.9
LTS06-01.20	0.976	35.9	0.39	2.54	2.70	0.83	13.4	5.28	70.8	28.7	142	34.5	376	69.1	0.34	13.7
LTS06-01.21	<0.0136	35.6	0.06	0.92	1.70	0.84	8.88	3.03	37.9	16.2	85.9	23.2	288	62.2	0.53	162
LTS06-01.22	0.0121	37.9	0.10	1.48	3.71	1.23	18.1	6.68	85.3	34.5	169	40.0	424	80.9	0.38	102
LTS06-01.23	0.149	30.2	0.15	1.47	3.48	1.27	22.3	8.84	117	47.8	243	60.3	659	120	0.33	42.4
LTS06-01.24	0.038	31.8	0.04	0.84	2.21	0.81	14.2	5.70	75.1	30.3	147	35.0	372	68.2	0.33	162
LTS06-01.25	0.106	31.2	0.17	1.83	3.49	1.37	20.5	8.77	120	50.2	253	61.9	662	125	0.38	42.7
LTS06-01.26	0.092	35.6	0.13	1.19	3.72	1.24	27.4	11.9	161	66.5	339	78.4	819	152	0.27	60.4
LTS06-01.27	<0.0135	24.1	0.05	1.16	2.75	0.89	13.6	5.22	66.5	26.5	130	30.7	328	61.0	0.36	137
LTS06-01.28	0.59	28.8	1.04	7.62	12.7	15.8	74.6	28.4	291	75.5	307	59.1	598	107	1.21	6.55
LTS06-01.29	0.306	29.7	0.81	6.70	8.58	3.96	28.6	10.4	133	54.5	278	69.6	776	149	0.70	9.22

注: (Eu/Eu*)_N和(Ce/Ce*)_N为球粒陨石标准化后的值,球粒陨石值参考 Sun and McDonough(1989)。

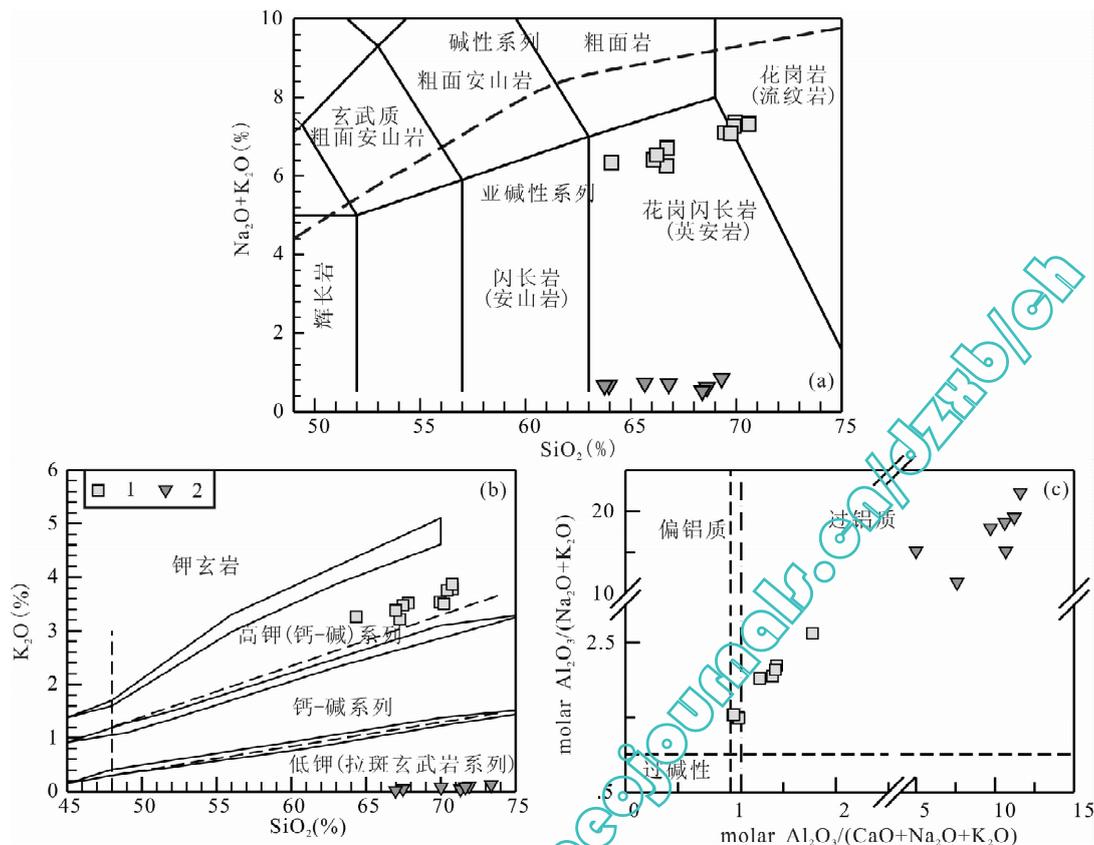


图 5 龙头山潜火山岩及平天山岩体 TAS 图解(据 Wilson, 1989)及 SiO_2 - K_2O 和 A/CNK-A/NK 图解(据 Le Maitre et al., 1989)

Fig. 5 Plots of TAS (a) (after Wilson, 1989), SiO_2 - K_2O (b) and A/CNK-A/NK (c) (after Le Maitre et al., 1989)

for the Longtoushan subvolcanic suite and the Pingtianshan pluton

1—平天山岩体; 2—龙头山潜火山岩

1—Pingtianshan pluton; 2—Longtoushan subvolcanic suite

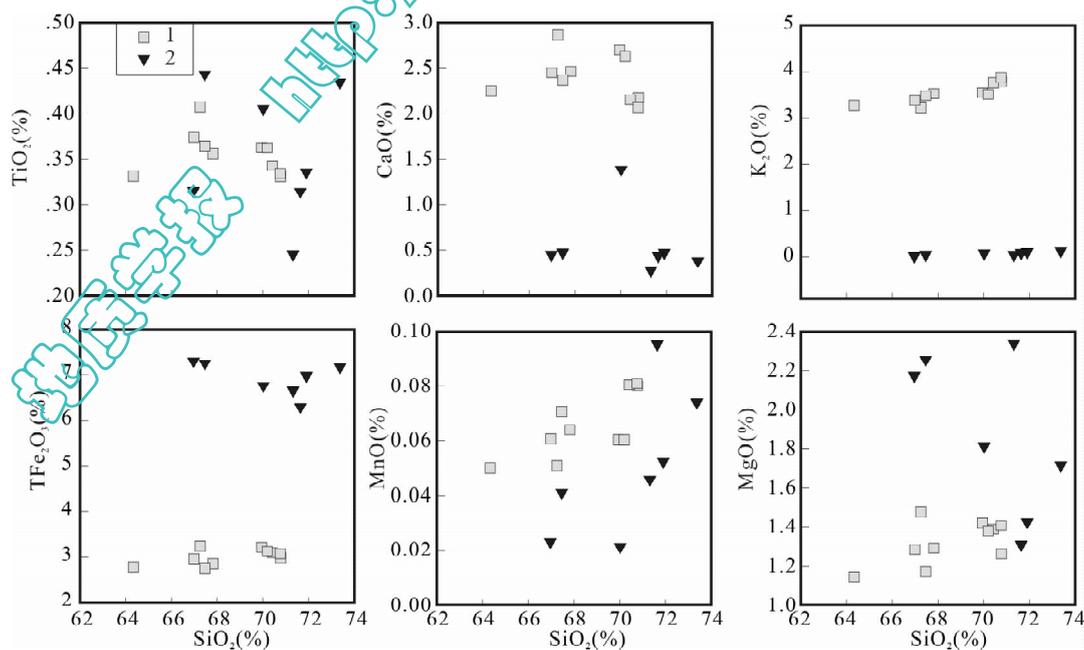


图 6 龙头山潜火山岩及平天山岩体 SiO_2 -氧化物 Harker 图解(图例同图 5)

Fig. 6 Harker plots for the Longtoushan subvolcanic suite and the Pingtianshan pluton (symbol the same as Fig. 5)

表3 龙头山潜火山岩和平天山岩体主量(%)、微量($\times 10^{-6}$)元素含量和Sr-Nd同位素组成
 Table 3 Major (%), trace ($\times 10^{-6}$) elemental and Sr-Nd isotopic compositions of samples
 from the Longtoushan subvolcanic suite and the Pingtianshan pluton

样号	GG07-13	GG07-14	GG07-15	GG07-16	GG07-17	GG07-18	GG07-19	GG07-20	GG07-21
单元	龙头山	平天山	平天山						
SiO ₂	66.8	68.6	65.7	68.4	69.3	64.0	63.8	64.1	66.7
TiO ₂	0.23	0.32	0.38	0.30	0.41	0.42	0.30	0.33	0.35
Al ₂ O ₃	17.1	17.3	17.6	18.4	15.1	20.2	21.0	22.5	18.3
TFe ₂ O ₃	6.23	6.66	6.34	6.01	6.77	6.88	6.95	2.77	2.81
MnO	0.04	0.05	0.02	0.09	0.07	0.04	0.02	0.05	0.06
MgO	2.19	1.36	1.70	1.25	1.62	2.14	2.07	2.14	1.27
CaO	0.26	0.45	1.30	0.42	0.36	0.45	0.43	2.24	2.42
Na ₂ O	0.66	0.52	0.66	0.45	0.73	0.63	0.65	3.09	2.80
K ₂ O	0.04	0.10	0.07	0.08	0.12	0.05	0.02	3.25	3.46
P ₂ O ₅	0.07	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.14	0.15
LOI	1.59	1.27	1.36	1.20	0.80	1.41	1.18	0.75	0.84
Rb	1.34	3.74	1.09	3.25	4.68	1.67	0.39	187	184
Sr	122	90.0	64.8	81.2	130	128	109	209	227
Y	9.96	22.4	12.3	21.7	14.0	22.3	22.5	28.1	25.2
Zr	108	131	142	144	182	151	129	156	143
Nb	5.11	12.5	13.8	14.6	12.8	14.9	6.85	15.3	15.7
Cs	0.55	0.51	0.61	0.72	0.53	0.88	0.25	33.0	21.8
Ba	37.1	53.1	31.2	42.3	59.6	13.7	3.06	626	694
La	45.6	21.4	12.5	29.3	13.4	21.8	15.6	52.3	46.5
Ce	38.5	35.1	9.65	43.0	26.3	26.9	11.1	76.3	75.0
Pr	7.10	4.11	0.98	4.84	2.33	3.19	1.19	8.00	8.04
Nd	22.0	15.3	3.56	16.7	3.36	12.4	4.40	29.0	29.0
Sm	3.29	3.00	0.76	2.94	1.51	2.67	0.77	5.36	5.42
Eu	0.49	0.34	0.087	0.55	0.25	0.33	0.16	0.87	0.95
Gd	2.11	2.56	0.74	3.46	1.31	2.50	0.86	4.24	4.20
Tb	0.29	0.46	0.14	0.43	0.23	0.41	0.19	0.62	0.64
Dy	1.56	3.04	1.00	2.71	1.67	2.71	1.70	3.55	3.65
Ho	0.27	0.64	0.23	0.57	0.40	0.55	0.49	0.68	0.70
Er	0.74	1.76	0.83	1.64	1.29	1.58	1.77	1.86	1.94
Tm	0.12	0.26	0.15	0.25	0.21	0.24	0.33	0.28	0.28
Yb	0.88	1.79	1.26	1.77	1.37	1.71	2.51	1.79	1.84
Lu	0.14	0.25	0.21	0.26	0.18	0.25	0.44	0.27	0.28
Hf	3.06	3.65	4.01	4.06	4.60	4.28	3.57	4.46	4.03
Ta	0.76	1.63	1.81	2.00	1.21	1.34	0.94	1.96	1.93
Pb	35.9	9.20	13.4	19.2	9.94	28.1	93.3	84.3	66.4
Th	7.64	7.2	19.1	20.4	8.98	20.1	15.0	22.8	22.4
U	4.46	6.20	2.71	6.21	2.02	2.76	3.80	7.26	10.0
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.721349	0.720051	0.715859	0.718908	0.722206	0.717918	0.722474	0.713887	0.713588
2 σ_m	5	7	10	11	7	3	10	8	10
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512202	0.512229	0.512217	0.512218	0.512218	0.512245	0.512220	0.512218	0.512222
2 σ_m	2	4	3	3	4	1	5	4	1
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.032	0.121	0.049	0.116	0.105	0.038	0.010	2.588	2.350
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.0904	0.1189	0.1292	0.1065	0.1089	0.1304	0.1064	0.1118	0.1130
I _{Sr}	0.721305	0.719887	0.715792	0.718750	0.722063	0.717867	0.722460	0.710356	0.710382
I _{Nd}	0.512145	0.512154	0.512136	0.512151	0.512150	0.512163	0.512153	0.512148	0.512151
t _{2DM} (Ga)	1.27	1.26	1.29	1.27	1.27	1.25	1.26	1.27	1.27
$\epsilon_{Nd}(t=96\text{Ma})$	-7.20	-7.03	-7.39	-7.09	-7.12	-6.86	-7.05	-7.16	-7.09

山岩体的REE含量水平与显生宙花岗岩相近,且不同样品间差异较小。

在原始地幔标准化多元素蛛网图中,相对于典型的显生宙花岗岩,龙头山潜火山岩表现出明显

续表 3

样号	GG07-22	GG07-23	GG07-24	XM06-01	XM06-02	XM06-06	PTS06-01	PTS06-02	
单元	平天山								
SiO ₂	66.1	66.7	66.2	70.6	69.9	69.9	69.5	69.7	
TiO ₂	0.40	0.36	0.37	0.33	0.34	0.33	0.36	0.36	
Al ₂ O ₃	17.7	18.7	18.9	14.9	14.9	14.6	14.9	14.9	
TFe ₂ O ₃	3.18	2.73	2.92	2.97	3.08	3.04	3.19	3.11	
MnO	0.05	0.07	0.06	0.08	0.08	0.08	0.06	0.06	
MgO	1.45	1.16	1.27	1.26	1.38	1.39	1.41	1.37	
CaO	2.81	2.34	2.42	2.17	2.14	2.04	2.68	2.61	
Na ₂ O	3.25	3.27	3.20	3.55	3.63	3.45	3.59	3.5	
K ₂ O	3.16	3.44	3.34	3.77	3.73	3.82	3.51	3.48	
P ₂ O ₅	0.15	0.15	0.14	0.15	0.15	0.15	0.15	0.14	
LOI	0.54	0.59	0.48	0.61	0.75	0.76	0.43	0.37	
Rb	171	192	186	133	191.5	92.1	103	152	
Sr	279	216	229	149	223.3	121	186	270	
Y	25.4	27.5	26.8	20.6	19.07	18.4	20.8	30.8	
Zr	151	156	148	182	132.2	169	151	265	
Nb	15.7	15.8	16.3	11.0	15.07	7.85	8.25	20.8	
Cs	14.4	25.7	25.5	23.5	17.28	18.2	15.7	20.6	
Ba	760	671	689	632	801	565	689	972	
La	48.3	46.2	49.0	28.9	38.54	17.8	29.0	47.9	
Ce	78.9	75.0	77.8	50.0	80.27	33.0	50.4	82.4	
Pr	8.54	7.84	8.38	6.28	8.833	4.28	6.52	10.4	
Nd	31.0	28.5	30.4	24.1	29.12	16.9	24.4	39.1	
Sm	5.62	5.33	5.61	4.59	5.557	3.55	4.75	7.18	
Eu	1.09	0.96	1.00	0.80	1.021	0.63	0.89	1.35	
Gd	4.44	4.41	4.49	3.59	4.484	2.88	3.66	5.54	
Tb	0.66	0.67	0.68	0.58	0.7006	0.48	0.57	0.87	
Dy	3.80	3.93	3.92	3.52	4.729	3.10	3.44	5.39	
Ho	0.72	0.75	0.73	0.68	0.6695	0.58	0.67	1.05	
Er	2.05	2.06	2.08	1.79	2.167	1.57	1.73	2.71	
Tm	0.30	0.32	0.36	0.28	0.313	0.25	0.25	0.41	
Yb	2.04	2.05	1.91	2.05	2.043	1.74	1.85	3.07	
Lu	0.30	0.31	0.28	0.28	0.3256	0.24	0.26	0.43	
Hf	4.27	4.41	4.34	4.71	4.273	4.24	3.84	7.10	
Ta	1.87	1.98	2.00	1.24	2.108	0.47	0.28	2.14	
Pb	36.6	95.4	68.8	100	88.96	84.0	32.0	55.7	
Th	24.3	22.6	23.8	18.4	21.45	14.6	17.4	29.8	
U	6.33	9.31	9.15	7.96	5.237	8.78	7.80	12.0	
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.711718	0.713754	0.713440	0.714080	0.713942	0.713957	0.711853	0.711754	
2σ _m	6	5	3	3	2	4	5	4	
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512240	0.512207	0.512215	0.512225	0.512208	0.512219	0.512242	0.512244	
2σ _m	1	2	1	2	2	1	1	4	
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	1.777	2.567	2.344	2.569	2.483	2.206	1.597	1.628	
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.1096	0.1131	0.1115	0.1154	0.1154	0.1272	0.1175	0.1110	
I _{Sr}	0.709294	0.710253	0.710243	0.710575	0.710555	0.710948	0.709674	0.709533	
I _{Nd}	0.512171	0.512136	0.512145	0.512153	0.512136	0.512139	0.512168	0.512174	
t _{2DM} (Ga)	1.24	1.29	1.27	1.26	1.29	1.28	1.24	1.23	
ε _{Nd} (t=96Ma)	-6.70	-7.38	-7.21	-7.06	-7.39	-7.32	-6.76	-6.64	

注: ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 和 ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 比值据 ICP-MS 测试的 Rb、Sr、Sm、Nd 含量和 Sr、Nd 同位素组成计算; 球粒陨石均一储库 (CHUR) 组成: ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr=0.0827, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.7045, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.1967, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512638; 亏损地幔 (DM) 取值: ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.2137, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.51315; 大陆地壳 (CC) 取值: ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd=0.118; λ_{Rb}=1.42×10⁻¹¹ a⁻¹; λ_{Sm}=6.54×10⁻¹² a⁻¹; 同位素初始比值为 t=96 Ma 时比值; I_{Sr} 和 I_{Nd} 分别代表初始 Sr 和 Nd 同位素比值。

Rb、Ba 负异常, 且多数元素的含量水平低于显生宙 花岗岩 (图 7c)。平天山岩体具有与现代花岗岩相

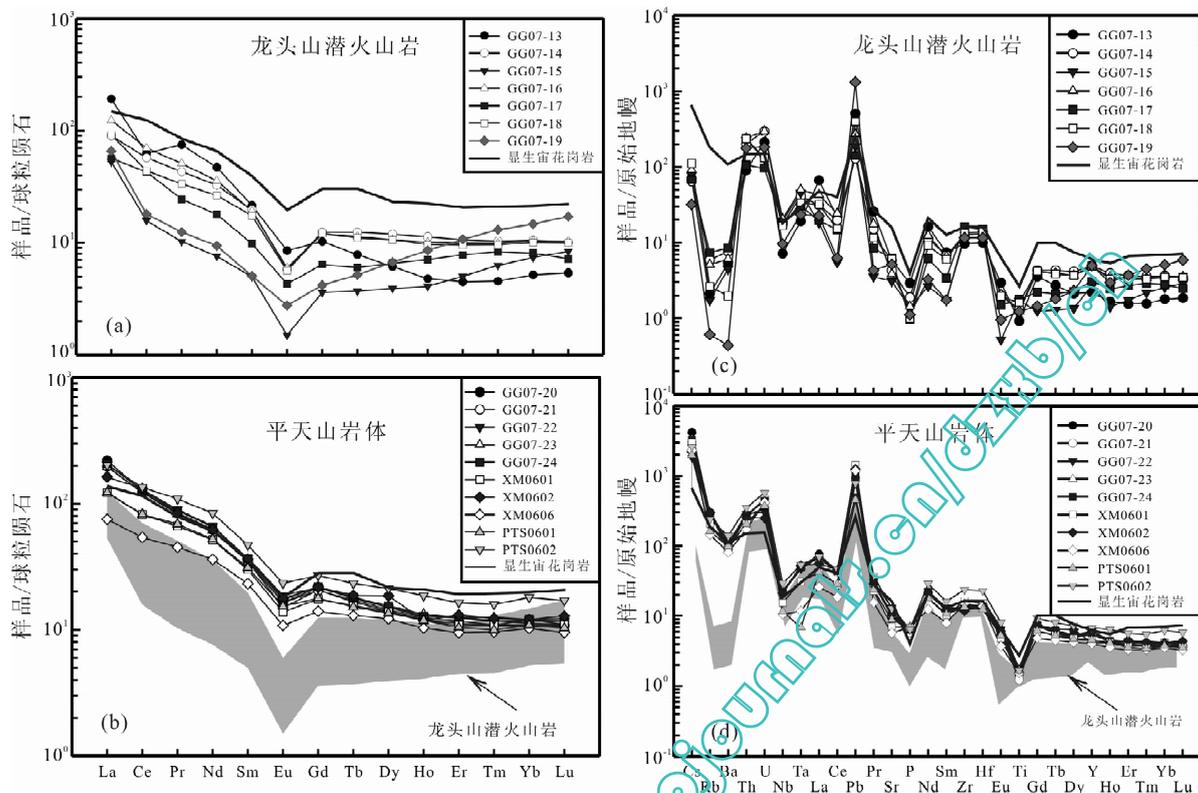


图7 龙头山潜火山岩及平天山岩体稀土元素配分模式图及微量元素蛛网图

(球粒陨石和原始地幔组成引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite normalized REE and primitive mantle normalized multi-element patterns for the Longtoushan subvolcanic suite (a, c) and the Pingtianshan pluton (b, d) (chondrite and primitive mantle data from Sun and McDonough, 1989)

近的组成特点,包括高场强元素亏损和 Pb 正异常(图 7d)。但相对龙头山潜火山岩,平天山岩体具有明显较高的元素含量水平,且无 Rb-Ba 亏损。

龙头山潜火山岩体和平天山岩体具有相似且变化范围较小的 ϵ_{Nd} 值(图 8),分别为 $-6.86 \sim -7.39$ 和 $-6.64 \sim -7.38$,相应的 t_{2DM} (两阶段模式年龄)值范围分别为 $1.45 \sim 1.49$ Ga 和 $1.43 \sim 1.50$ Ga,但两类岩浆岩的 Sr 同位素组成差异明显,其中平天山岩体的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值相对较低且范围有限,为 $0.7092 \sim 0.7106$,而龙头山潜火山岩的比值相对较高且变化范围大,为 $0.7158 \sim 0.7225$ 。

5 讨论

5.1 平天山岩体的源区性质与成因

本次锆石 U-Pb 定年表明,平天山岩体形成于晚白垩纪的燕山晚期(96.2 ± 0.4 Ma),与前人报道的约 96 Ma (K-Ar 法)年龄(黄民智等,1999)相近。

对区内寒武纪—泥盆纪碎屑锆石的研究表明,本研究区具有华夏地块的属性(李青等,2009)。

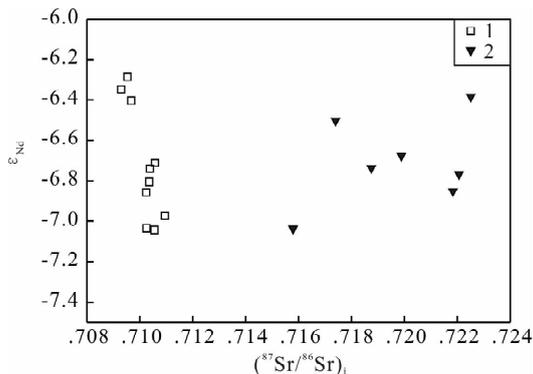


图8 龙头山潜火山岩及平天山岩体 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 与 ϵ_{Nd} 关系图

Fig. 8 ϵ_{Nd} versus $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ diagram for the Longtoushan subvolcanic suite and the Pingtianshan pluton

1—平天山岩体;2—龙头山潜火山岩

1—Pingtianshan pluton; 2—Longtoushan subvolcanic suite

Gilder 等(1996)以及 Chen 和 Jahn(1998)对华夏陆块及周边地区进行的 Nd-Sr 同位素填图显示,区内大多数岩浆岩的 Nd 两阶段模式年龄为 1.84 ± 0.07

Ga,但其内部存在近北东向的约 1.5 Ga 的低值带(初始 Sr 同位素比值 0.704~0.730),被解释为地壳岩浆活动受到不同程度幔源岩浆加入的结果。平天山岩体 t_{2DM} 值的范围为 1.43~1.50 Ga、初始 Sr 同位素比值为 0.7092~0.7095,显然与华夏陆块内的低值带相当。上述特征表明,平天山岩体的岩浆源区以古元古代华夏基底岩系为主,并受到了底侵地幔岩浆物质的加入。

5.2 龙头山潜火山岩成因

陈富文等(2008)近期也报道了龙头山岩浆岩的锆石 U-Pb SHRIMP 年代学研究,定年结果(103~100 Ma)与本文结果在误差范围内相似,并认为成矿作用与岩浆活动的时代相同。相似的 Nd 同位素组成表明,龙头山潜火山岩与平天山岩体具相似源岩,即以古元古代基底岩系为主。虽然龙头山矿化斑岩与平天山岩体具有相同的锆石 U-Pb 年龄,且其锆石间具有相似的 HREE 特征,但其 LREE 中的变价元素存在显著差异(图 4):平天山岩体具明显的 Eu 负异常($Eu/Eu^* = 0.13 \sim 0.26$)和程度相对较低的 Ce 正异常(大多数 Ce/Ce^* 比值为 1.2~7.8),相对而言,龙头山矿化斑岩锆石的 Eu 负异常程度($Eu/Eu^* = 0.24 \sim 0.74$)略低、Ce 正异常强烈($Ce/Ce^* = 9.0 \sim 298$)。类似现象与澳大利亚东部的 Mole Granite 铜-金矿床的岩浆成因和热液成因锆石的 REE 组成特征相似(Hoskin and Schaltegger, 2003),即龙头山矿化斑岩锆石的组成特征与 Mole Granite 矿床中的热液成因锆石相近。

决定锆石微量元素组成的重要因素包括了流体源区、组成和环境的氧逸度(Hoskin et al., 1998)。若龙头山潜火山岩来自与平天山岩体相同或相似初始岩浆的高度分异演化,则由于 LREE 的不相容程度高于 HREE,将导致晚期结晶形成的龙头山锆石相对平天山锆石更加富集 LREE,而实际情况则正好相反,说明两岩浆体系的物质组成存在差异,而非同源熔体的演化关系;SiO₂-氧化物的 Harker 图解(图 6)中两岩体相似的 SiO₂ 含量范围,亦证实他们并非同源熔体的演化关系。高 Ce 正异常和弱化的 Eu 负异常均指示了龙头山潜火山岩形成环境氧逸度的增高,即加剧了+4 价 Ce 的形成并抑制了+2 价 Eu 的形成。据此可知,不同的熔体(流体)化学组成和环境氧化条件的差异是导致两岩浆岩体系锆石具有不同 REE 组成特征的重要原因。因此,大量流体的参与和相对氧化的环境是指示龙头山金矿寄主潜火山岩形成的重要标志。

5.3 流体作用

龙头山潜火山岩和平天山岩体具有相似的 Nd 同位素组成,但其 Sr 同位素初始比值差异显著,分别为 0.7158~0.7225 和 0.7093~0.7109。REE 为不相容元素,硅酸岩熔体是体系中 REE 的主要储库,而水溶液流体中的 REE 溶解度极低,流体的加入对岩浆体系的 REE 影响有限。但 Sr 在水溶液流体中具较高溶解度,流体在流经不同的围岩时发生的水-岩作用对流体中的 Sr 同位素组成产生明显影响。沉积岩中具有较高含量的富碱金属粘土矿物(即富集 Rb 而导致高放射成因 Sr 同位素),其高吸附性质和易于元素交换的层状结构决定了经水-岩作用后,流体将具有高放射成因 Sr。因此,龙头山潜火山岩范围变化大的高放射成因 Sr 同位素特征指示了成岩-成矿体系中存在来自深部、流经了多种岩性围岩的热液流体。

岩浆过程金的分配系数决定了单一的岩浆作用难以导致成规模金矿的形成(Oshin and Crocket, 1982; Richter et al., 2004),热液作用的参与是大幅提高元素金发生富集、迁移和成矿的重要因素(Mikucki, 1998)。流体具有相对于岩浆更为广泛的运移区域,因此也代表了更广范围内的源区性质。导致大多数金矿床形成的典型地质过程可总结为成矿流体的绝热骤冷、与围岩间发生水-岩反应以及流体上升时压力降低导致的相离析作用使 Au 发生沉淀(Mikucki, 1998)。二硫化物络合物是 Au 在水溶液流体中的重要存在形式,且其溶解度与流体的温度成正比,因此引发高热梯度的区域岩浆作用将极大地提高流体对 Au 的吸收、溶解和搬运能力,而急剧的温度下降和硫化物沉积,是导致 Au 的二硫化物络合物分解并从溶液中沉积成矿的重要因素(Zotov et al., 1991)。

5.4 区域构造演化与成矿作用

龙头山矿床硫化物金矿体与储矿潜火山岩系空间关系谐和,指示矿化作用与位于岩体边部的潜火山岩同时形成(陈富文等, 2008)。前人的研究表明,矿化斑岩中的锆石 U-Pb 年龄和辉钼矿 Re-Os 年龄可以对比(Li et al., 2010),龙头山矿化斑岩与平天山侵入岩体具相同的结晶年龄,表明成矿作用与岩浆作用基本同时发生,且同时代超浅成潜火山岩与深成侵入岩在地表距离仅数百米的区域同时出现,指示了在约 96 Ma 的燕山晚期区域地壳经历了快速抬升,该现象与前人提出的华南褶皱带中的燕山期隆起成矿带相吻合(Pirajno and Bagas, 2002)。

已有的研究表明区域地壳自古生代晚期以来发生了多期岩浆事件,包括以马山杂岩体为代表的燕山早期岩浆作用(李献华等,1999;郭新生等,2001及作者未发表数据)。大瑶山地区经历的多期与拉张构造环境有关、有地幔物质参与的高热流值岩浆事件,不仅可诱发区域流体的大规模对流,且有利于易呈络合物形式迁移的 Au 在区域流体迁移体系(包括流体本身及其围岩)内发生逐级富集。区域地壳的快速隆升,对高温热液的突然冷却并成矿具有重要意义。值得指出的是,区域深大断裂及其次级断裂是促进成矿流体发生迁移并沿有限空间集中成矿的另一控制因素(Mikucki,1998; Zhou et al., 2002; Li,2000),而龙山—龙头山金矿带内 Au-Cu 多金属矿床局限于沿凭祥-大黎深大断裂及其次级断裂分布和寒武纪—泥盆纪不整合面分布的空间特征(盛志华,2005)也充分反映了构造带对 Au 矿形成的重要影响。

5.5 对华南金-多金属矿带形成的指示

毛景文等(2004)提出华南金-多金属矿床形成于 170~150 Ma、140~125 Ma 和 110~80 Ma 三个阶段,对应了太平洋板块向华南陆块俯冲引起的多阶段弧后岩石圈伸展。通过华南白垩纪花岗岩岩浆活动与岩石圈伸展关系的研究,李献华(1999)认为花岗质侵入岩类形成于 164~153 Ma,146~136 Ma,129~122 Ma,109~101 Ma 和 97~87 Ma 共 5 期事件。这些研究说明至少于约 170 Ma 至中生代末期,华南岩石圈发生了持续的构造-岩浆演化,且华南成矿带内大多数金-多金属矿床在空间上显示出与花岗质岩浆活动不同程度共生关系。中生代华南岩石圈处于拉张环境的认识得到了多数研究者的认同,但对该构造背景的形成机制仍存在争议(Hsü et al.,1990; Gilder et al.,1996; Sewell and Campbell,1997; Li,2000; Zhou and Li,2000)。古太平洋的俯冲作用被认为导致了华南中生代构造-岩浆事件,但缺乏相应的典型岛弧岩浆岩系的现象指示了该俯冲作用可能具有特殊性质。典型的大洋板片俯冲形成的岛弧岩浆岩多位于距海沟约 300 km 的有限范围,但低角度的俯冲作用则可导致较大范围的岩浆岩分布(Gutscher et al.,2000)。据此,Li 和 Li(2007)提出了古太平洋板块俯冲模式,以解释华南中生代岩浆岩由海岸向内陆 >1000 km 范围内其组成、成因分带及其随时间的演化。本文认为,低角度俯冲作用不仅引发了岩浆岩在空间上的广泛展布,弧后或俯冲板片的拆离作用诱发的拉张环境使地幔岩浆上侵、区域热流值提高,是

华南金-多金属矿带形成的重要条件。而事实上,包括龙头山矿床在内的大瑶山矿带正是分布于典型的 t_{2DM} 低值带内。

6 结论

(1)龙头山金矿床形成于燕山晚期 96 Ma,与区域同期岩浆事件相伴生。

(2)岩浆-成矿事件发生于拉张的构造环境,并有一定比例的地幔岩浆物质加入。

(3)成矿过程伴随大量成矿流体,区域地壳抬升和沿深大断裂带上迁过程中的突冷却及氧逸度增高是导致成矿作用发生的重要条件。

(4)中生代古太平洋板块的低角度俯冲作用导致了区域地壳较大范围的流体释放,而地幔岩浆物质的板底垫托作用导致沿构造通道高溶解度成矿流体的向上迁移,应是华南中生代成矿带的主要机制。

致谢:野外地质工作期间得到了广西贵港第六地质大队大力支持;西北大学地质系柳小明老师、张红硕士及王建其老师协助完成了锆石 U-Pb 同位素年代学及主量元素分析;审稿人和编辑对本文提出了宝贵意见;特此致谢。

参 考 文 献

- 陈富文,李华芹,梅玉萍.2008.广西龙头山斑岩型金矿成岩成矿锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究.地质学报,82(7):921~926.
- 陈开礼.2002.广西金矿地质.南宁:广西科学技术出版社,357.
- 地矿部南岭项目花岗岩专题组.1989.南岭花岗岩地质及其成因和成矿作用.北京:地质出版社,1~471.
- 郭新生,陈江峰,张巽,汤加富,谢智,周泰禧,刘玉龙.2001.桂东南富钾岩浆杂岩的 Nd 同位素组成:华南中生代地幔物质上涌事件.岩石学报,17(1):19~27.
- 胡圣虹,陈爱芳,林守麟,袁洪林,高山.2000.地质样品中 40 个微量、痕量、超痕量元素的 ICP-MS 分析研究.地球科学—中国地质大学学报,25(2):186~190.
- 华仁民,陈培荣,张文兰,姚军明,林锦富,张展适,顾晟彦.2005.南岭与中生代花岗岩类有关的成矿作用及其大地构造背景.高校地质学报,11(3):291~304.
- 黄民智,陈伟十,李蔚铮,许仿实,李先粤.1999.广西龙头山次火山—隐爆角砾岩型金矿床.地球学报,20(1):39~46.
- 李青,段瑞春,凌文黎,胡明安,张军波,杨振.2009.桂东早古生代地层碎屑锆石 U-Pb 同位素年代学及其对华夏陆块加里东构造事件性质的约束.地球科学—中国地质大学学报,34(1):189~202.
- 李献华,周汉文,刘颖,李寄,孙敏,陈正宏.1999.桂东南钾质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征.科学通报,44(18):1992~1998.
- 李献华.1999.华南白垩纪岩浆活动与岩石圈伸展——地质年代学与地球化学限制.见:中国科学院地球化学研究所.资源环境与可

- 持续发展. 北京: 科学出版社, 264~275.
- 毛景文. 2003. 中国东部中生代浅成热液金矿的类型、特征及其地球动力学背景. 高校地质学报, 4(9): 620~637.
- 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. 地学前缘, 11(1): 45~55.
- 毛景文, 谢桂青, 张作衡, 李晓峰, 王义天, 张长青, 李永峰. 2005. 中国北方中生代大规模成矿作用的期次及其地球动力学背景. 岩石学报, 21(1): 169~188.
- 南京大学地质系. 1981. 华南不同时代花岗岩类及其与成矿关系. 北京: 科学出版社, 1~395.
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚, 刘凤仁. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社, 1~103.
- 盛志华. 2005. 大瑶山成矿带金矿成矿规律. 地质找矿论丛, 20(增刊): 61~63.
- 王德滋, 沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. 地学前缘, 10(3): 209~220.
- 姚凤良, 刘连登, 孔庆存, 宫润潭. 1990. 胶东西北部脉状金矿. 长春: 吉林科学技术出版社, 1~234.
- 朱桂田. 2002. 广西龙头山金矿床地质特征及成因研究. 矿产与地质, 16(5): 266~272.
- Chen J F, Jahn B M. 1998. Crustal evolution of southeastern China: evidence from Nd and Sr isotopic composition of rocks. *Tectonophysics*, 284: 101~133.
- Frimmel H E. 2008. Earth's continental crustal gold endowment. *Earth and Planetary Science Letters*, 267: 45~55.
- Gilder S A, Gill J, Coe R S, Zhao X X, Liu Z W, Wang G X, Yuan K R, Liu W L, Kuang G, Wu G R. 1996. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China. *Journal of Geophysical Research*, 101: 16137~16154.
- Gutscher M A, Maury R, Eissen J P, Bourdon E. 2000. Can slab melting be caused by flat subduction? *Geology*, 28: 535~538.
- Hamilton E I. 2000. Environmental variables in a holistic evaluation of land contaminated by historic mine wastes: a study of multi-element mine wastes in West Devon, England using arsenic as an element of potential concern to human health. *The Science of the Total Environment*, 249: 171~221.
- Hoskin P W O, Kinny P D, Wyborn D. 1998. Chemistry of hydrothermal zircon: investigating timing and nature of water-rock interaction. In: Aehart G B, Hulston J R, eds. *Water-Rock Interaction WRI-9*. Rotterdam: AA Balkema, 545~548.
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. Review in *Mineralogy and Geochemistry*, 53: 27~62.
- Hsü K J, Li J L, Chen H H, Wang Q C, Sun S, Sengör A M C. 1990. Tectonics of South China: key to understanding west Pacific geology. *Tectonophysics*, 183: 9~39.
- Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B, Le Bas M J, Bonin B, Bateman P. 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms: recommendations of the international union of geological sciences subcommission on the systematics of igneous rocks. Oxford: Blackwell Scientific, 1~193.
- Li X H. 2000. Cretaceous magmatism and lithospheric extension in southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 293~305.
- Li X H, Li W X, Wang X C, Li Q L, Liu Y, Tang G Q, Gao Y Y, Wu F Y. 2010. SIMS U-Pb zircon geochronology of porphyry Cu-Au-(Mo) deposits in the Yangtze River Metallogenic Belt, eastern China: magmatic response to early Cretaceous lithospheric extension. *Lithos*, 119: 427~468.
- Li Z X, Li X H. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: a flat-slab subduction model. *Geology*, 35(2): 179~182.
- Ludwig K R. 2001. *Isoplot/Ex, rev. 2.49*. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No. 1a, 1~56.
- Mikucki E J. 1998. Hydrothermal transport and depositional processes in Archean lode-gold systems: a review. *Ore Geology Review*, 13: 307~321.
- Oshin I O, Crocket J H. 1982. Noble metals in Thetford Mines ophiolites, Quebec: Part 1. Distribution of gold, iridium, platinum, and palladium in the ultramafic and gabbroic rocks. *Economic Geology*, 77: 1556~1570.
- Palmé H, O'Neill H S C. 2003. Cosmochemical estimates of mantle composition. In: Carlson R W, ed. *The Mantle and Core. Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1~38.
- Pirajno F, Bagas L. 2002. Gold and silver metallogeny of the South China fold belt: a consequence of multiple mineralizing events? *Ore Geology Reviews*, 20: 109~126.
- Qiu Y M, Groves D I, McNaughton N J, Wang L G, Zhou T H. 2002. Nature, age, and tectonic setting of granite-hosted, orogenic gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China. *Mineral Deposita*, 37: 283~305.
- Righter K, Campbell A J, Humayun M, Hervig R L. 2004. Partitioning of Ru, Rh, Pd, Re, Ir and Au between Cr-bearing spinel, olivine, pyroxene and silicate melts. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 867~880.
- Rudnick L J, Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Rudnick R L, ed. *The Crust Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1~64.
- Sewell R J, Campbell S D G. 1997. Geochemistry of coeval Mesozoic plutonic and volcanic suites in Hong Kong. *Journal Geological Society of London*, 154: 1053~1066.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geo. Soc. Special Pub., 313~345.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London: Unwin Hyman, 1~466.
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, Li H M, G nther D, Wu F Y. 2004. Accurate U-Pb age and rare element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28: 353~370.

- Zaw K, Peters S G, Cromie P, Burrett C, Hou Z Q. 2007. Nature, diversity of deposit types and metallogenic relations of South China. *Ore Geology Reviews*, 31: 3~47.
- Zhou T H, Goldfarb R J, Phillips G N. 2002. Tectonics and distribution of gold deposits in China — an overview. *Mineral Deposita*, 37: 249~282.
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: implications for lithosphere subduction and

underplating of mafic magmas. *Tectonophysics*, 326: 269 ~ 287.

- Zotov A, Baranova N, Dar'yina T, Bannykh L. 1991. The solubility of gold in aqueous chloride fluids at 350~500 °C and 500~1500 atm. Thermodynamic parameters of AuCl₂ (sol) up to 750 °C and 5000 atm. *Geochemistry International*, 28: 63~71.

Correlations of the Late Yanshanian Tectonomagmatic Events with Metallogenesis in South China: Geochemical Constraints from the Longtoushan Gold Ore Deposit of the Dayaoshan Area, Guangxi Province

DUAN Ruichun^{1,2)}, LING Wenli¹⁾, LI Qing³⁾, CHEN Ziwan¹⁾, YANG Hongmei²⁾, LIU Lifan⁴⁾

1) *Faculty of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan, 430074;*

2) *Wuhan Institute of Geology and Mineral Resources, Wuhan, 430205;*

3) *Guangxi Bureau of Geology, Mineral Prospecting and Exploration, Nanning, 530023;*

4) *HeiLongjiang Institute of Geological Survey, Harbin, 150036*

Abstract

The Dayaoshan golden metallogenic zone in the Gungang area, Guangxi province, is located at the southwest end of the southeastern coast polymetallic mineralization belt of the North China. LA-ICP-MS U-Pb dating for zircons from the pyrite-mineralized porphyry of the Longtoushan gold deposit in this region yielded a weighted mean ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of 96.1 ± 3.0 Ma, consistent with the results obtained from nearby Pingtianshan pluton (96.2 ± 0.4 Ma) within the analytical error. Host rock Sr isotopic compositions and zircon REE features of the Longtoushan deposit reveal that the mineralization was accompanied with involvement of massive fluids. Mineralized porphyry, contemporaneous intrusive rocks, and distinctly higher Ce positive anomalies of zircons from mineralized porphyry than those from the intrusion imply a rapid uplifting of regional crust and pronounced rise of oxygen fugacity in magmatic system during the process of mineralization. Nd isotopic compositions of two magmatic rocks are similar to the low Nd model age belt of South China, indicating involvement of mantle-derived magmatic material with varied proportions during magmatic activities. Therefore, large-scale fluid involvement, rapid regional crustal uplift, abrupt cooling of ore-forming fluid upward along deep-seated fault, and oxygen fugacity increasing are key factors to result in the metallogenesis of the Longtoushan gold deposit. The low-angle subduction of the Mesozoic Pacific plate resulted in large-scale discharge of fluid in regional crust, and the underplating of mantle-derived magma resulted in the ascending of high-solubility mineralized fluid along the tectonic channels, which are the critical setting responsible for the large-scale metallogenesis along the southeastern coast of South China during the Mesozoic.

Key words: Longtoushan gold deposit; U-Pb geochronology; geochemistry; metallogenesis; metallogenic belt in South China