

藏南亚东地区片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩 LA-ICP-MS锆石U-Pb测年及其地质意义

时超^{1,2}, 李荣社², 何世平², 王超², 潘术娟^{1,2}, 刘银^{1,2}, 辜平阳²
SHI Chao^{1,2}, LI Rong-she², HE Shi-ping², WANG Chao²,
PAN Shu-juan^{1,2}, LIU Yin^{1,2}, GU Ping-yang²

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国地质调查局西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054

1. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

2. *Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China*

摘要:亚东岩组是高喜马拉雅地区重要的前寒武纪变质地层之一。利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年技术对侵入亚东岩组的片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩进行了测年, 获得岩浆结晶年龄为 (499.2 ± 3.9) Ma (中寒武世), 提供了泛非构造-岩浆事件的记录。岩石地球化学分析表明, 黑云花岗闪长岩 SiO_2 含量为 68.04%~68.92%, 在 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ 图解上样品点落入亚碱性系列的花岗闪长岩区, A/CNK 指数均大于 1.1, 在 Shand 指数图解上落入过铝质系列区。稀土元素配分模式属轻稀土元素富集的右倾曲线, 出现弱 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu}=0.62\sim0.79$); 微量元素表现出 Ba、Nb、Ta、Sr 亏损和 Rb、Th、U 相对富集的特征。通过 Rb-(Y+Nb) 和 Rb-Hf-Ta 图解判别, 认为亚东地区片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩形成于后碰撞构造阶段。

关键词: 片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩; 亚东岩组; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄; 泛非运动; 西藏亚东地区

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2010)12-1745-09

Shi C, Li R S, He S P, Wang C, Pan S J, Liu Y, Gu P Y. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for gneissic garnet-bearing biotite granodiorite in the Yadong area, southern Tibet, China and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(12):1745-1753

Abstract: Yadong Formation-complex is an important precambrian metamorphic strata of the Yadong area in Tibet. LA-ICP-MS method is used to determined the zircon U-Pb isotope age for gneissic biotite granodiorite with garnet insert the Yadong Formation-complex of the Yadong area, Tibet. It's magmatic crystallization age of (499.2 ± 3.9) Ma (Middle Cambrian), provides a Pan-African tectonic - magmatic event record. Geochemical analysis shows that SiO_2 content of 68.04%~ 68.92%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ diagram into granodiorite region of the sub-alkaline series, A/CNK index greater than 1.1, Shand index diagram in the area fall into peraluminous series. REE patterns show light rare earth enrichment right-inclined curve, and slightly negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu}=0.62\sim0.79$); Trace elements showed the features of Ba, Nb, Ta, Sr loss, and Rb, Th and U relative enrichment. It is considered that the gneissic biotite granodiorite with garnet insert the Yadong Formation-complex of the Yadong area formed in the post-collisional stage though Rb-(Y+Nb) and Rb-Hf-Ta discriminant diagrams.

Key words: Gneissic garnet-bearing biotite granodiorite; Yadong Formation-complex; LA-ICP-MS zircon U-Pb isotope age; Pan-African movement; Yadong area of Tibet

收稿日期: 2010-07-09; 修订日期: 2010-08-05

地质项目: 中国地质调查局国土资源大调查项目《青藏高原前寒武纪地质、古生代构造-古地理综合研究》(编号: 1212010610102)资助

作者简介: 时超(1986-), 男, 在读硕士, 构造地质学专业。E-mail: fancyboy88@163.com

通讯作者: 何世平(1963-), 男, 研究员, 从事大地构造和地球化学研究。E-mail: xakeyi@163.com

位于西藏南缘的高喜马拉雅地区具地球上最高的海拔,大面积出露着有丰富地质信息的中下地壳岩石,是探讨西藏地区早期构造演化的有利窗口,历来为地质工作者所关注^[1-19]。近年来,青藏高原南部发现大量泛非运动的年龄记录。许志琴等^[17]对不同类型片麻岩进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年,在西藏亚东、聂拉木、吉隆、康玛等地区获得大量 529~457Ma 的泛非期变质年龄数据;1:25 万安多县幅^①在聂荣地块获得侵入聂荣岩群的片麻状二长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 515Ma±14Ma,是目前在青藏高原发现的位置最靠北的泛非事件年龄记录;李才等^[18]在八宿县同卡地区卡穷岩群中获得细粒黑云母碱长花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 507Ma±10Ma;宋述光等^[19]在滇西北怒江一带获得片麻状花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 487Ma±11Ma。

显而易见,青藏高原泛非事件的波及范围、作用时间及其性质已成为众多研究者关注的焦点^[17-22]。笔者对西藏亚东县侵入亚东岩组的片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和岩石地球化学研究,为探讨高喜马拉雅地区泛非运动增添了新的基础资料。

1 区域地质背景

研究区属于高喜马拉雅造山带,南侧以主中央逆冲断层(MCT)与低喜马拉雅相隔,北侧以著名的藏南拆离系(STDS)为界与北喜马拉雅相邻^[16](图1)。分布于亚东地区的亚东岩组是1:25万江孜县幅、亚东县幅(中国部分)区域地质调查时从聂拉木岩群中解体出来的,主要为条带状角闪黑云斜长片麻岩、含矽线石榴黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩、黑云斜长变粒岩夹石英岩及黑云母片岩,其层位相当于原来聂拉木岩群下部的友谊桥岩组^[4]。亚东地区侵入亚东岩组的中酸性岩体较多,形态大小不一,出露面积约为300km²。亚东县东北部侵入岩体规模较大,南部侵入岩体较小。本文研究的重点为亚东县下亚东区片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩,其平面形态呈岩枝状,东西长约4km,南北宽约0.5km,与亚东岩组一样发育透入性片麻理,片麻理产状210°∠42°,两者呈侵入接触关系^②。

2 岩体岩相学特征

侵入亚东岩组的片麻状含石榴子石黑云花岗闪

长岩为灰色,半自形—他形粒状结构、蠕虫结构,片麻状构造。主要矿物有斜长石(35%~40%)、石英(25%~30%)、钾长石(15%~17%),次要矿物为黑云母(10%~13%)、石榴子石(5%~6%),副矿物有磷灰石(1%)、锆石(1%)。其中部分石英发生碎裂,可见波状消光,少数小颗粒石英(0.1mm)被包裹在斜长石内部。钾长石可分为正长石和正条纹长石,部分正长石发生了泥化,单偏光显微镜下正长石内部可见土黄色小斑点。黑云母总体沿片麻理方向定向排列,部分黑云母发生绿泥石化。

3 岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

3.1 采样

测年样品(07NL-6)采自西藏亚东县下亚东区侵入亚东岩组的片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩中,地理坐标为N27°25′51.6″、E88°54′44.9″,样品重量大约10kg。将岩石破碎至20~30目,用常规方法分选后得到约1000粒锆石。在双目镜下挑选出形态较为完整、无裂痕、无包裹体的锆石约120粒作为测定对象。

3.2 测试方法

将分选出的锆石晶体制成样品靶,打磨使得锆石中心暴露出来,然后进行锆石可见光显微照相、阴极发光(CL)显微图像和LA-ICP-MS锆石微区U-Pb同位素组成测定。

锆石的阴极发光(CL)照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,采用美国Gatan公司生产的阴极荧光谱仪(型号Mono CL3+)进行锆石内部结构显微照相分析。LA-ICP-MS法锆石微区U-Pb年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室的Agilent 7500型ICPMS、德国Lambda Physik公司的ComPex 102 ArF准分子激光器(工作物质ArF,波长193nm)和MicroLas公司的GeoLas 200M光学系统联机上进行。激光束斑直径为30μm,激光剥蚀深度为20~40μm。实验中采用He作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质NIST SRM610进行仪器最佳化,采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式,每完成4~5个待测样品测定,插入测标样一次。在所测锆石样品15~20个点前后各测2次NIST SRM 610。锆石年龄采用标准锆石91500作为外部标准物质,元素含量采用NIST SRM 610作为外标。由于SiO₂在锆石中的含量较

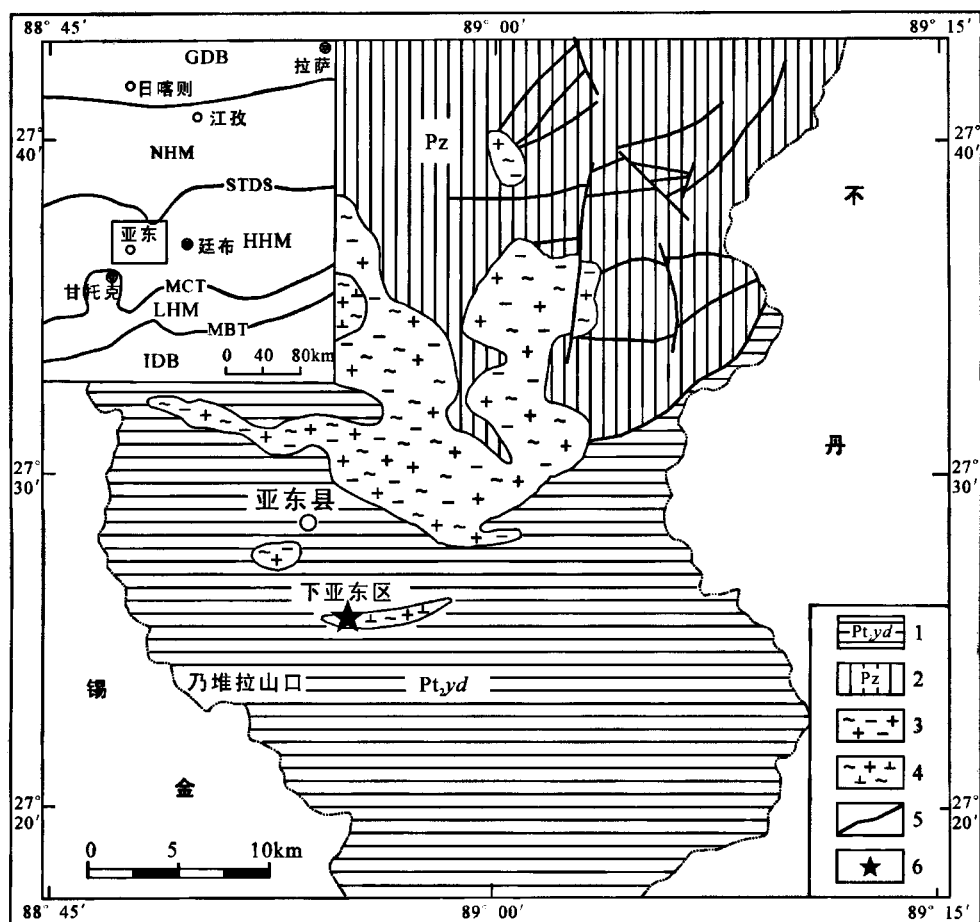


图 1 西藏亚东地区地质简图(据参考文献①修编)

Fig. 1 Geological sketch map of the Yadong area in Tibet

1—中元古代亚东岩组;2—古生界;3—片麻状黑云花岗岩;4—片麻状花岗闪长岩;5—断层;6—采样地点;
STDs—藏南拆离系;MCT—主中央断裂;MBT—主边界断裂;GDB—冈底斯地块;
NHM—北喜马拉雅;HHM—高喜马拉雅;LHM—低喜马拉雅;IDB—印度地块

恒定,选择 ^{29}Si 作为内标来消除激光能量在点分析过程中和分析点之间的漂移,对于大多数元素单点分析的相对标准偏差为5%~15%。详细分析步骤和数据处理方法参见相关文献[23-24]。采用Glitter(ver 4.0, Macquarie University)程序对锆石的同位素比值和元素含量进行计算,并按照Andersen Tom的方法^[25],用LAMICPMS Common Lead Correction(ver 3.15)进行普通铅校正,年龄计算和谐和图采用Isoplot(ver 3.0)程序完成^[26]。

3.3 锆石特征

侵入亚东岩组的片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩中获得的锆石呈浅黄色—无色透明柱状或粒状,自形程度较高(部分残缺锆石属于碎样时机械破

损所致),锆石粒度变化于80~280 μm 之间。

锆石的阴极发光(CL)图像如图2所示,根据锆石的外部形态、内部的环带结构和锆石的测点位置,可将所有锆石分为3组,分别代表了捕获锆石、岩浆结晶锆石和变质锆石。第一组锆石共6个(分别是测点5、7、8、16、21、24所在锆石),粒径相对较小,内部为灰白色发育环带结构的内核,外部为灰色或暗色加大边,Th/U比值(表1)一般为0.26~1.24,表现出岩浆锆石的特征。由于测点位于锆石核部,反映出捕获锆石的年龄特征。第二组锆石共8个(分别是测点2、9、10、13、14、19、23、29所在锆石),结晶较好,多数内部发育清晰密集的振荡环带结构(测点19、23、29),外围有生长加大边,



图2 西藏亚东地区侵入亚东岩组的片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩锆石 CL 图像

Fig. 2 CL images of zircons for gneissic garnet-bearing biotite granodiorite in the Yadong Formation-complex, Yadong area, Tibet

锆石中的圆圈为同位素测年激光剥蚀的示意范围,数字编号为测点号;大于1000的数字为 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$ 年龄(Ma),小于1000的数字为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(Ma)

Th/U 比值一般为 0.06~0.8,表现出典型岩浆锆石的特征,测点位于锆石的振荡环带部位,能较好地反映岩浆结晶的特征。第三组锆石数量相对较多,共 9 个(分别是测点 6、11、12、15、20、25、26、27、30 所在锆石),呈粒状,CL 图像显示其内部呈暗色,结构不清楚,外围有较宽的生长加大边(测点 12、20、30),锆石的 Th/U 比值变化较大(0.03~1.01),具有早期岩浆成因并经历后期变质叠加的锆石特征,测点位于锆石边部。

3.4 锆石 U-Pb 年龄

样品(07NL-6)中的锆石颗粒共分析测试了 30 个点(表 1),去掉明显不谐和的数据点(4、7、17、18、22、28 测点)和捕获锆石的数据点(5、8、16、21、24 测点)后获得第一组 8 个测试点锆石的平均年龄为 $499.2\text{Ma} \pm 3.9\text{Ma}$ (MSWD=1.06)(图 3);第二组 9 个

测试点锆石的平均年龄为 $478.7\text{Ma} \pm 3.6\text{Ma}$ (MSWD=1.04)(图 3)。综合考虑 CL 图像的特征,Th、U 同位素含量、比值和区域地质背景,本文将 $499.2\text{Ma} \pm 3.9\text{Ma}$ 定为西藏亚东县下亚东区侵入亚东岩组的片麻状含石榴子石黑云母花岗闪长岩的主体岩浆结晶年龄,时代为中寒武世。第二组锆石的平均年龄 $478.7 \pm 3.6\text{Ma}$ 为后期变质作用的年龄。

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素特征

西藏亚东地区侵入亚东岩组的片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩岩石化学分析数据经过去除烧失量和数据均一化处理后列于表 2。岩石的 SiO_2 含量在 68.04%~68.92%之间, $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 含量在 5.32%~

表1 西藏亚东地区片麻状含石榴子石黑云花岗岩闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素测定结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic analysis of gneissic garnet-bearing biotite granodiorite from the Yadong area, Tibet

样点 编号	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		^{206}Pb	^{232}Th	^{238}U	Th/U	谐和度	采用年 龄/Ma	1 σ
	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	比值	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ	年龄/Ma	1 σ	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶	/10 ⁻⁶				
07NL-6-01	0.06	0.001	0.56	0.01	0.07	0.001	0.03	0.000	487	28	454	8	447	5	499	8	110	168	390	0.43	92	447	5
07NL-6-02	0.06	0.001	0.63	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	498	13	497	5	497	5	471	7	1176	81	3556	0.02	100	497	5
07NL-6-03	0.06	0.001	0.59	0.01	0.07	0.001	0.02	0.000	548	14	471	5	455	5	439	5	368	428	1261	0.34	83	455	5
07NL-6-04	0.10	0.002	2.91	0.04	0.21	0.002	0.06	0.001	1615	34	1385	11	1240	13	1216	13	1046	198	1479	0.13	77	1615	34
07NL-6-05	0.06	0.001	0.73	0.01	0.09	0.001	0.02	0.000	503	13	557	6	570	6	461	6	1261	462	3389	0.14	113	570	6
07NL-6-06	0.06	0.001	0.61	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	492	16	480	6	478	5	496	6	166	364	540	0.67	97	478	5
07NL-6-07	0.09	0.001	1.92	0.03	0.16	0.002	0.05	0.001	1369	12	1087	9	951	10	912	11	592	414	873	0.47	69	951	10
07NL-6-08	0.11	0.004	4.33	0.15	0.29	0.004	0.09	0.001	1749	71	1699	29	1659	20	1651	19	231	238	191	1.24	95	1749	71
07NL-6-09	0.06	0.001	0.63	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	536	14	499	5	490	5	469	6	527	133	1732	0.08	91	490	5
07NL-6-10	0.06	0.001	0.64	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	528	15	503	6	497	5	438	6	444	296	1386	0.21	94	497	5
07NL-6-11	0.06	0.001	0.60	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	475	15	477	6	477	5	426	6	218	278	693	0.40	100	477	5
07NL-6-12	0.06	0.001	0.59	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	470	15	473	5	473	5	432	6	698	234	2964	0.08	101	473	5
07NL-6-13	0.06	0.001	0.63	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	468	15	494	6	499	6	485	7	306	130	957	0.14	107	499	6
07NL-6-14	0.06	0.001	0.63	0.01	0.08	0.001	0.03	0.000	483	15	497	6	500	6	677	9	624	115	2082	0.06	104	500	6
07NL-6-15	0.06	0.001	0.59	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	464	16	471	6	473	5	444	6	260	881	870	1.01	102	473	5
07NL-6-16	0.09	0.001	3.03	0.04	0.25	0.003	0.07	0.001	1411	13	1415	11	1417	15	1302	16	2261	846	2104	0.40	100	1411	13
07NL-6-17	0.14	0.003	4.63	0.07	0.24	0.003	0.07	0.001	2225	34	1755	13	1389	15	1327	15	1024	144	1069	0.13	62	2225	34
07NL-6-18	0.12	0.003	3.17	0.06	0.19	0.002	0.05	0.001	1973	38	1450	13	1120	12	1070	13	1069	365	1407	0.26	57	1973	38
07NL-6-19	0.06	0.001	0.62	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	431	16	491	6	504	6	431	5	643	1602	1995	0.80	117	504	6
07NL-6-20	0.06	0.001	0.59	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	420	16	473	6	484	6	459	7	622	91	2677	0.03	115	484	6
07NL-6-21	0.06	0.001	0.96	0.02	0.11	0.001	0.03	0.000	659	16	685	8	693	8	671	9	568	330	1268	0.26	105	693	8
07NL-6-22	0.13	0.003	4.49	0.08	0.26	0.003	0.07	0.001	2058	40	1730	15	1472	16	1426	17	580	153	600	0.26	72	2058	40
07NL-6-23	0.06	0.001	0.63	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	437	17	494	6	507	6	494	7	436	309	1369	0.23	116	507	6
07NL-6-24	0.07	0.001	1.38	0.02	0.15	0.002	0.04	0.001	851	16	880	10	892	10	802	11	549	279	932	0.30	105	892	10
07NL-6-25	0.06	0.001	0.60	0.01	0.08	0.001	0.03	0.000	455	18	475	6	479	6	526	7	375	273	1253	0.22	105	479	6
07NL-6-26	0.06	0.001	0.61	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	537	20	486	7	475	6	472	7	282	529	936	0.57	88	475	6
07NL-6-27	0.06	0.001	0.61	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	463	53	484	8	489	6	490	6	360	171	1159	0.15	106	489	6
07NL-6-28	0.05	0.001	0.65	0.01	0.09	0.001	0.02	0.000	380	19	506	7	535	6	487	8	400	87	1176	0.07	141	535	6
07NL-6-29	0.05	0.001	0.62	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	407	22	488	8	506	6	471	7	205	405	639	0.63	124	506	6
07NL-6-30	0.05	0.001	0.59	0.01	0.08	0.001	0.02	0.000	390	20	469	7	486	6	442	7	290	77	944	0.08	125	486	6

注: LA-ICP-MS U-Pb 同位素含量和年龄测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 使用 Andersen 等的软件进行了普通铅校正, 谐和度: $100 \times (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \text{ 年龄}) / (^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \text{ 年龄})$

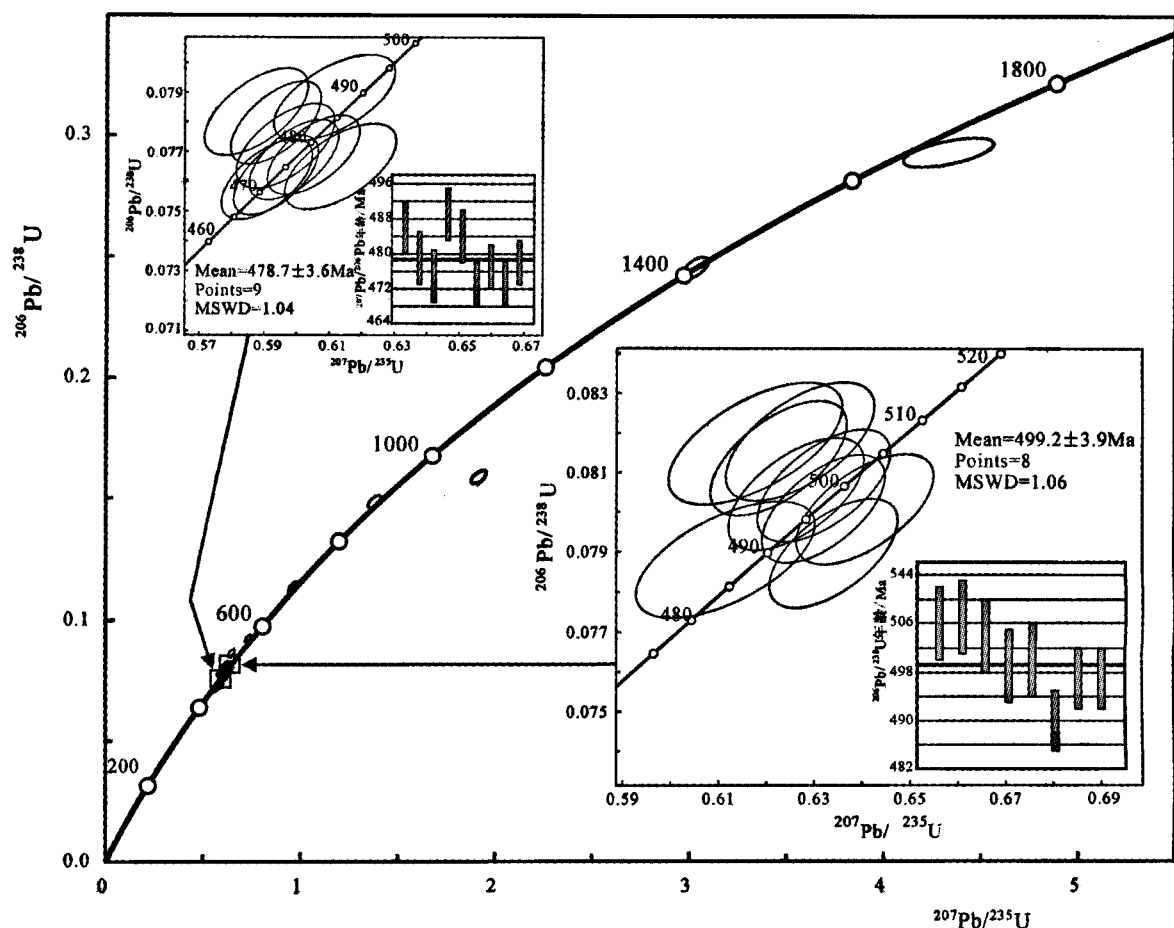


图 3 片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩 U-Pb 谐和图

Fig. 3 U-Pb concordia diagram for gneissic garnet-bearing biotite granodiorite

5.91%之间, $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, 在 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ 图解 (图 4-a) 中, 样品投点全部落入亚碱性系列的花岗闪长岩区。A/CNK 指数均大于 1.1 (介于 2.06~2.30 之间), 具有 S 型花岗岩类的特征; 在 Shand 指数图解 (图 4-b) 中, 投点全部落入过铝质区, 属于过铝质花岗闪长岩。

4.2 稀土元素和微量元素特征

西藏亚东地区侵入亚东岩组的片麻状含石榴子

石黑云花岗闪长岩的稀土和微量元素分析数据如表 3、表 4 所示。该岩体稀土元素总量较高 ($136.6 \times 10^{-6} \sim 206.7 \times 10^{-6}$), 稀土元素配分模式为轻稀土元素富集的右倾曲线 (图 5-a), $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 5.4~25.3, 出现弱 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.62 \sim 0.79$)。Eu 的负异常可能是斜长石、钾长石的分离引起的^[30]。由表 3 和微量元素蛛网图 (图 5-b) 可知, 片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩的 Ba、Nb、Ta、Sr 亏损, 尤其

表 2 片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩石化学分析结果

Table 2 Petrochemistry analyses for gneissic garnet-bearing biotite granodiorite

样品编号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	总量	AR	TFeO	A/NKC
07NL-6-(1)	68.81	0.48	16.09	0.67	2.93	0.07	1.54	3.99	3.42	1.92	0.09	100.00	1.99	3.53	2.30
07NL-6-(3)	68.92	0.49	15.76	0.92	2.91	0.07	1.60	3.91	3.22	2.10	0.09	100.00	2.01	3.74	2.23
07NL-6-(5)	68.04	0.50	16.14	0.05	3.96	0.09	1.67	3.55	3.64	2.27	0.09	100.00	2.15	4.00	2.06

注: 主量元素含量%。岩石化学分析在西安地质矿产研究所测试中心完成

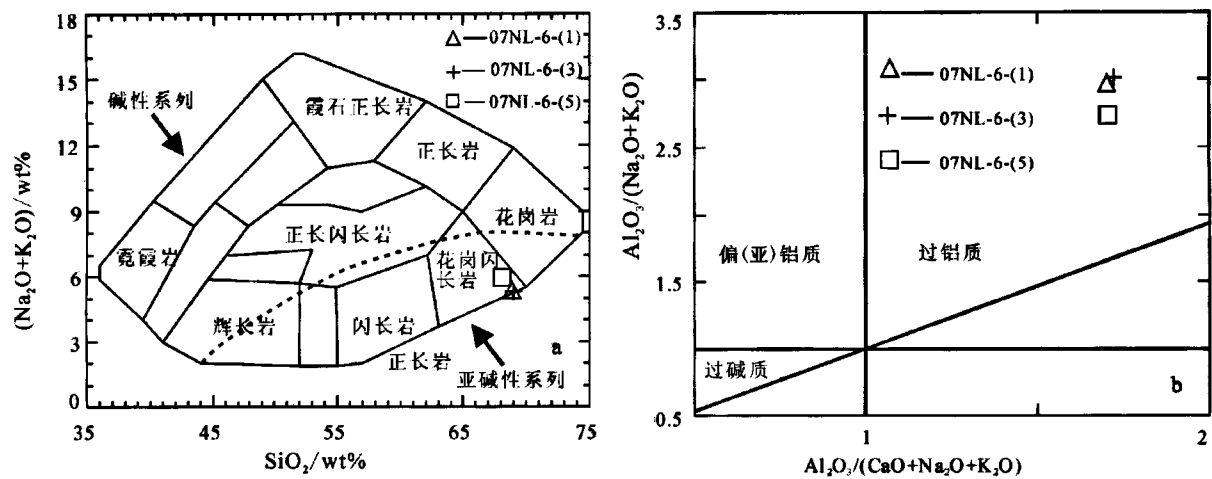


图 4 片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩的(K₂O+Na₂O)-SiO₂图解^[27]和 Shand 指数^[28]
Fig. 4 K₂O+Na₂O vs. SiO₂ diagram and Shand index of gneissic garnet-bearing biotite granodiorite

表 3 片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩微量元素含量
Table 3 Trace elements analyses for gneissic garnet-bearing biotite granodiorite

样品编号	Ba	Rb	Sr	Co	V	Cr	Ni	Nb	Ta	Zr	Hf	Y	Cs	Th	U
07NL-6-(1)	534.2	120.3	269.6	149.6	64.80	27.01	10.90	5.87	0.63	106.8	3.33	20.44	6.18	15.81	1.45
07NL-6-(2)	354.5	288.2	219.8	58.2	22.55	28.64	10.33	5.17	0.81	111.5	3.48	28.63	7.19	12.11	2.57
07NL-6-(3)	567.6	125.2	261.7	186.0	65.51	24.63	11.03	9.90	1.34	139.2	4.25	20.40	7.36	14.89	1.72
07NL-6-(4)	253.9	179.3	193.9	67.6	23.69	25.08	9.36	7.78	1.17	109.7	3.50	40.88	12.14	19.69	3.62
07NL-6-(5)	371.7	151.9	240.6	137.9	69.50	35.44	12.94	6.75	0.65	103.6	3.06	15.42	6.81	26.24	4.64

注:微量元素含量 10⁻⁶

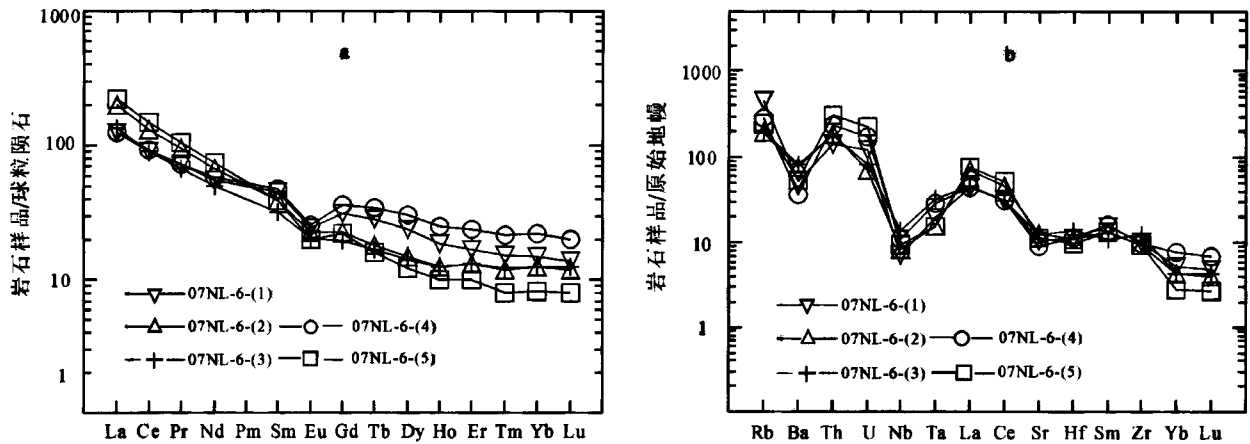


图 5 片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b)^[29]
Fig. 5 Chondrite-normalized REE pattern and trace element spider diagrams for gneissic garnet-bearing biotite granodiorite

是 Nb 和 Ta, 出现较明显的 Nb-Ta 槽, 而大离子亲石元素 Rb、Th 和 U 相对富集, 总体表现为 S 型花岗岩类的特征。

5 讨 论

泛非运动是指主要发生在 600~500Ma 的一次

表 4 片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩稀土元素含量
Table 4 Rare earth elements analyses for gneissic garnet-bearing biotite granodiorite

样品编号	Pb	Li	Be	Sc	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	La/Yb _N	δEu
07NL-6-(1)	20.4	42.5	2.6	9.5	47.9	80.8	9.1	31.7	5.9	1.3	4.6	0.7	3.8	0.7	2.2	0.3	2.1	0.3	191.4	176.7	14.7	15.3	0.74
07NL-6-(2)	51.0	52.0	12.8	3.5	30.0	55.9	6.9	26.1	6.9	1.4	6.4	1.1	6.1	1.1	2.8	0.4	2.5	0.4	147.7	127.1	20.7	7.9	0.64
07NL-6-(3)	20.2	46.8	2.7	10.5	31.7	55.2	6.4	23.4	4.9	1.2	4.0	0.6	3.6	0.7	2.2	0.3	2.2	0.3	136.6	122.7	13.9	9.9	0.79
07NL-6-(4)	42.8	54.5	9.4	4.6	30.0	56.2	6.8	26.8	7.2	1.5	7.5	1.3	7.8	1.4	4.0	0.5	3.8	0.5	155.4	128.6	26.8	5.4	0.62
07NL-6-(5)	22.1	49.1	3.7	10.9	52.8	90.0	10.0	34.5	6.0	1.2	4.5	0.6	3.1	0.6	1.6	0.2	1.4	0.2	206.7	194.4	12.3	25.3	0.65

注:稀土元素含量 10⁻⁶。稀土元素分析在西安地质矿产研究所测试中心完成

重要地质事件,受其影响的非洲大陆及相邻的冈瓦纳大陆的部分地区被称为泛非造山带^[31]。西藏亚东县下亚东区侵入亚东岩组的片麻状含石榴子石黑云母花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示,其岩浆结晶时代为(499.2±3.9)Ma(MSWD=1.04),与泛非运动的时限基本吻合。

花岗岩类是组成大陆地壳的主要岩石,在造山演化的各个阶段都可以产生。一些学者曾认为过铝质花岗质岩石是陆-陆碰撞过程中早期挤压环境下地壳加厚发生部分熔融的产物^[32-34]。最新研究发现,大量原来认为是同碰撞的过铝质花岗质岩石是后碰撞期的产物^[35],形成于碰撞高峰期后的岩石圈伸展背景^[36-38]。西藏亚东地区片麻状含石榴子石黑云母花岗闪长岩在 Rb-(Y+Nb)图解(图 6-a)和 Rb-Hf-Ta 三角图解(图 6-b)中,投点分别落入火山弧花岗岩(VAG)、后碰撞花岗岩(Post-COLG)重叠区域内及二者的交界附近,显示西藏亚东地区片麻状含石榴子石黑云母花岗闪长岩可能形成于后碰撞构造阶段。从多元素多方法图解中可以看出西藏亚东地区片麻状含石榴子石黑云母花岗闪长岩可能是后造山阶段形成的。根据本文所获得的片麻状含石榴子石黑云母花岗闪长岩的主量元素、稀土元素、微量元素和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果,认为西藏亚东地区侵入亚东岩组的片麻状含石榴子石黑云母花岗闪长岩是 S 型花岗岩类,可能是在 499.2Ma±3.9Ma(即中寒武世)碰撞后阶段形成的。

6 结 论

(1)利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年方法对西藏亚东地区侵入亚东岩组的片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩体进行了测年,获得其岩浆结晶年龄 499.2Ma±3.9Ma(中寒武世)(MSWD=1.04),后期变质作用的年龄 478.7Ma±3.6Ma。

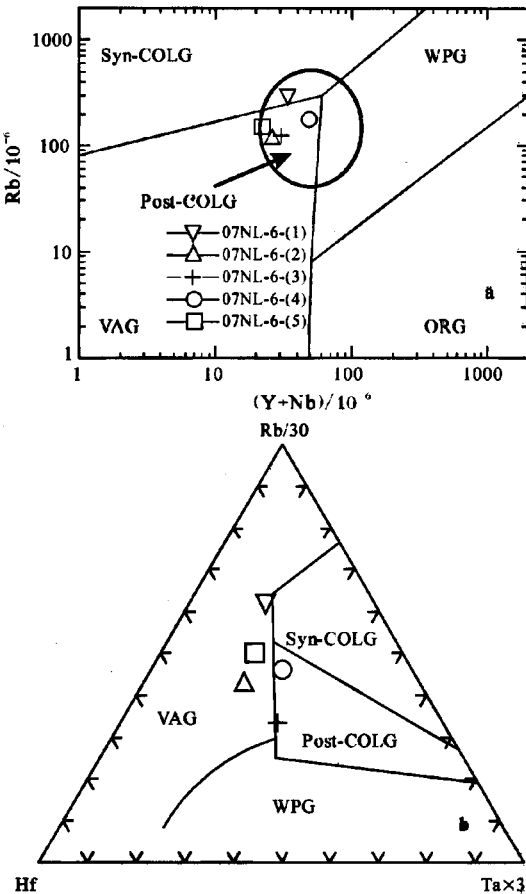


图 6 片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩微量元素构造环境判别图

Fig. 6 Diagrams of the tectonic setting of trace elements for gneissic garnet-bearing biotite granodiorite
VAG—火山弧花岗岩;ORG—大洋脊花岗岩;WPG—板内花岗岩;Syn-COLG—同碰撞花岗岩;Post-COLG—后碰撞花岗岩

(2)主量元素、稀土元素和微量元素分析测试结果表明:岩石 SiO₂ 含量为 68.04%~68.92%,A/CNK 指数大于 1.1,属于过铝质花岗岩类。稀土元素配分模式为轻稀土富集的右倾曲线,出现弱 Eu 负异常

($\delta\text{Eu}=0.29\sim0.79$),微量元素表现出 Ba、Nb、Ta、Sr 亏损和 Rb、Th、U 相对富集的分布特征,具有典型的 S 型花岗岩类的特征。

(3)本文获得的 $499.2\text{Ma}\pm3.9\text{Ma}$ 的年龄是泛非运动在亚东地区的地质记录之一,根据环境判别图和区域地质背景分析,认为西藏亚东地区侵入亚东岩组的片麻状含石榴子石黑云花岗闪长岩是在后碰撞构造阶段形成的。

致谢:在成文的过程中,计文化老师和陈守建老师给予指导和鼓励,镜下鉴定得到李向民教授的帮助,数据测试得到柳小明教授和李平、武鹏同志的帮助,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 应思淮. 珠穆朗玛峰地区的岩浆岩、变质岩和混合岩[C]//中国科学院西藏科学考察队. 珠穆朗玛地区科学考察报告(2). 北京: 科学出版社, 1974: 103-132.
- [2] 张旗. 西藏岩浆活动和变质作用[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 271-312.
- [3] 尹集祥. 震旦—寒武系[C]//中国科学院西藏科学考察队. 西藏地层. 北京: 科学出版社, 1984: 1-70.
- [4] 茅燕石, 卫管一, 张伯南, 等. 西藏喜马拉雅地区前寒武系变质岩系的地质构造特征[C]//地质矿产部青藏高原地质文集编委会. 青藏高原地质文集 17 号. 北京: 地质出版社, 1985.
- [5] 卫管一, 石绍清, 茅燕石. 喜马拉雅地区前寒武系地质构造与变质作用[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1989: 1-176.
- [6] 西藏自治区地质矿产局. 西藏自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 1-32.
- [7] 西藏自治区地质矿产局. 西藏岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- [8] 邹光富, 朱同兴, 贾保江, 等. 西藏南部聂拉木地区前寒武纪结晶基底的组成及其特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2006, 26(1): 13-21.
- [9] 许荣华, 成忠礼, 桂训堂, 等. 西藏聂拉木群主要变质时代讨论[J]. 岩石学报, 1986, 2(2): 13-22.
- [10] 潘桂棠, 丁俊, 王立全, 等. 青藏高原及邻区地质图(1:150 万)[M]. 成都: 成都地图出版社, 2004.
- [11] 陈智梁, 刘宇平. 藏南拆离系[C]//特提斯地质(20). 北京: 地质出版社, 1996: 31-51.
- [12] 穆恩之, 尹集祥, 文世宣, 等. 西藏南部珠穆朗玛峰地区的地层[J]. 中国科学, 1973, (2): 103-132.
- [13] 刘国惠, 金成伟, 王富宝. 西藏的变质岩和岩浆岩[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [14] 刘文灿, 万晓樵, 梁定益, 等. 江孜县幅、亚东县幅地质调查新进展及主要成果[J]. 地质通报, 2004, 23 (5/6): 444-450.
- [15] 周志广, 赵兴国, 王克友, 等. 西藏亚东地区前寒武纪结晶岩系岩石构造地层划分的岩石地球化学证据[J]. 现代地质, 2003, 17(3): 237-242.
- [16] 张祥信, 刘文灿, 周志广, 等. 藏南亚东地区前寒武纪亚东岩群的建立及其特征[J]. 现代地质, 2005, 19(3): 341-347.
- [17] 许志琴, 杨经绥, 梁凤华, 等. 喜马拉雅地体的泛非—早古生代造山事件年龄记录[J]. 岩石学报, 2005, 21(1): 1-12.
- [18] 李才, 谢尧武, 沙绍礼, 等. 藏东八宿地区泛非期花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年[J]. 地质通报, 2008, 27(1): 64-68.
- [19] 宋述光, 季建清, 魏春景, 等. 滇西北怒江早古生代片麻状花岗岩的确定及其构造意义[J]. 科学通报, 2001, 52(8): 927-930.
- [20] 李才, 黄小鹏, 翟庆国, 等. 龙木错—双湖—吉塘板块缝合带与冈瓦纳北界[J]. 地学前缘, 2006, 13(4): 136-147.
- [21] 钟大赉. 滇川西部古特提斯造山带[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [22] 陆松年. 青藏高原北部前寒武纪地质初探[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [23] Gao Shan, Liu Xiaoming, Yuan Honglin, et al. Analysis of forty-two major and trace elements of USGS and NIST SRM Glasses by LA-ICPMS[J]. Geostand News, 2002, 22: 181-195.
- [24] 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 2003, 48(14): 1511-1520.
- [25] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192: 59-79.
- [26] Ludwig K R. 30-A geochronological toolkit for Micro-soft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 2003, (4): 1-70.
- [27] Richwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22(4): 247-263.
- [28] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. GSA Bull., 1989, 101(5): 635-643.
- [29] Sun S S, Mc Donough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implication for mantle composition and processes[C]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geol. Soc. London Spec. Pub., 1989, 42: 313-345.
- [30] 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [31] Acharyya S K. Break up of Australia-India-Madagascar Blok, opening of the India Ocean and continental accretion in Southeast Asia with special reference to the characteristics of the Peri-Indian collision zones[J]. Gondwana Reserch, 2000, 3(4): 425-443.
- [32] Pearce J A. Sources and setting of granitic rocks [J]. Episodes, 1996, 19(4): 120-125.
- [33] Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism[J]. Geological Society of London, Special Publication, 1986, 19: 67-81.
- [34] Williamson B J, Shaw A, Downes H, et al. Geochemical constraints on the genesis of Hercynian two-mica leucogranites from the Massif Central[J]. Chemical Geology, 1996, 127: 25-42.
- [35] Pitcher W S. Granite type and tectonic environment[M]. Mountain Building Processes, London: Academic Press, 1983: 19-40.
- [36] Forster H J, Tischendorf G, Gottesmann B, et al. Late-collisional granites in the Variscan Erzgebirge[J]. Journal of Petrology, 1999, 40: 1613-1645.
- [37] Kalsbeek F, Jepsen H, Nutman A. From source migmatites to plutons: tracking the origin of ca. 435 Ma S-type granites in the East Greenland Caledonian orogen[J]. Lithos, 2001, 57: 1-21.
- [38] 肖庆辉, 邓晋福, 马大谏, 等. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- ① 中国地质大学(北京)地质调查院. 1:25 万安多县幅区域地质调查报告. 2010, 出版中.
- ② 中国地质大学(北京). 1:25 万江孜县、亚东县幅调报告. 2005.