

藏东纽多石墨矿床含矿花岗岩锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学特征

周 新, 樊炳良, 余佳树, 易金龙, 冯德新

ZHOU Xin, FAN Bingliang, YU Jiashu, YI Jinlong, FENG Dexin

西藏自治区地质矿产勘查开发局地热地质大队, 西藏 拉萨 850000

Geothermal Geological Survey Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lhasa 850000, Tibet, China

摘要:藏东察雅—左贡地区可能存在一条晶质石墨矿带, 从北向南已发现纽多、地果、青果 3 处石墨矿床, 找矿潜力巨大。以矿区基本地质特征为基础, 对含矿岩体花岗岩的岩石学、岩石地球化学及锆石 U-Pb 同位素进行研究, 结果表明含矿花岗岩具有富钾、过铝、钙碱性 S 型花岗岩的特征; 稀土元素配分曲线呈右倾斜的轻稀土元素富集型, 轻、重稀土元素分馏明显, 具有明显的负 Eu 异常, 微量元素特征显示亏损 Nb、Ba、Sr、P、Ti 等高场强元素, 尤其亏损 Ti, 相对富集 Rb、K、U 等大离子亲石元素; 样品锆石具有明显的振荡环带和较高的 Th/U 值(普遍大于 0.4), 属于典型的岩浆成因锆石, 用 LA-ICP-MS 技术测得锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 258.1 ± 1.9 Ma (95% 置信度, MSWD=3.5, $n=35$), 表明岩体形成时代为晚二叠世。岩石地球化学特征表明, 纽多花岗岩来源于陆壳杂砂岩的部分熔融, 且成岩温度较高, 可能是碰撞造山导致地壳加厚增温重熔形成的。

关键词:花岗岩; 地球化学; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; 纽多; 藏东

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3; P619.25⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2020)10-1518-09

Zhou X, Fan B L, Yu J S, Yi J L, Feng D X. The zircon U-Pb age and geochemical characteristics of ore-bearing granite in the Niuduo graphite deposit, eastern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(10): 1518-1526

Abstract: There may be a crystalline graphite ore belt from Chaya to Zuogong in eastern Tibet, which has great potential for prospecting. Three graphite orebodies were discovered from north to south, i.e., Niuduo, Diguoguo and Qingguoguo. The latest geological survey shows that the Niuduo graphite deposit is expected to reach the scale of large-scale deposits, but the theoretical research work remains very insufficient. In this paper, based on the basic geological characteristics of the mining area, the authors studied the petrology, petrogeochemistry and zircon U-Pb chronology of the ore-bearing rock mass. The results show that the ore-bearing granite has the characteristics of K-rich, peraluminium, calc-alkaline S-type granite, and the REE distribution curve is right-inclined LREE enrichment type, with obvious LREE fractionation and obvious negative Eu anomaly. Trace element characteristics show that high field strength elements such as Nb, Ba, Sr, P and Ti are deficient, especially Ti, while large ion lithophile elements such as Rb, K and U are relatively enriched. Zircons in the samples have obvious oscillatory zones with high Th/U ratios (generally higher than 0.4), suggesting typical magmatic zircons. The $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of zircons determined by LA-ICP-MS is 258.1 ± 1.9 Ma, MSWD=3.5 ($n=35$), and the age of zircons is Late Permian. Geochemistry shows that the Niuduo granite originated from partial melting of continental crustal complex sandstone, and the diagenetic temperature was relatively high. It may have been formed by collisional orogeny resulting in crustal thickening, warming and remelting.

Key words: granite; geochemistry; LA-ICP-MS zircon U-Pb age; Niuduo; eastern Tibet

收稿日期: 2019-04-28; 修订日期: 2020-06-11

资助项目: 西藏自治区自然资源厅项目《西藏自治区察雅县纽多石墨矿普查(续作)》(编号: 藏矿勘[2017]10)

作者简介: 周新(1984-), 男, 工程师, 从事固体矿产勘查、区域地质调查工作。E-mail: 442879707@qq.com

通讯作者: 樊炳良(1988-), 男, 工程师, 从事固体矿产勘查、区域地质调查工作。E-mail: 373705243@qq.com

石墨由于特殊的结构而具有耐高温、抗热震性、导电性、润滑性、化学稳定性、可塑性等特性,广泛应用于冶金、机械、化学、电气等领域中,尤其是晶质石墨,更是成为中国“十三五”规划的战略资源矿种。1:5 万区域地质调查和地表、深部工程显示,西藏东部地区察雅—左贡地区可能存在一条晶质石墨矿带,从北向南已发现纽多、地果、青果 3 处石墨矿床^[1-3](图 1),找矿潜力巨大。最新地质调查显示,纽多石墨矿床具有埋藏浅、规模大、结晶程度高的特征,预估晶质石墨资源量 120×10^4 t 矿物量(333+334),达到大型矿床规模,石墨矿床中炭质来源于区内下石炭统卡贡组的含煤建造^[2-3]。何亮等^[3]认为,青果含矿二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 244.7 ± 1.3 Ma,形成于中三叠世,代表了含矿岩浆活动的时限,也近似代表石墨成矿时限;樊炳良等^[4]对纽多黑云二长花岗岩(不含矿)的研究显示,其成岩时代为 243.6 ± 1.4 Ma,形成于中三叠世,但未对纽多石墨矿区细粒花岗岩(含矿岩体)进行研究,不能约束石墨成矿时限。本文在纽多石墨矿床最新勘查成果的基础上,通过对含矿岩体开展岩石学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学、元素地球化学等研究,旨在对岩体的形成时代和岩浆区提供约束。

1 地质概况

纽多石墨矿床是 2016 年西藏卡贡地区 1:5 万区域地质调查时发现的,是目前西藏发现的有望达到大型矿床的晶质石墨。最新勘查成果表明,纽多石墨矿床圈定 6 条石墨矿体,石墨资源量超过 120×10^4 t,固定碳平均品位 14.66%,片度 0.05~2.8 mm。

矿区出露地层(图 2)由老到新为:①下石炭统卡贡组(C_1kg)变质砂岩、板岩,分布在登许断裂西南,围绕纽多岩体呈环状出露,与上覆波里拉组呈断层接触;②上三叠统波里拉组(T_3b)细晶灰岩,分布在登许断裂东北,出露面积较小,与上覆阿堵拉组呈整合接触;③上三叠统阿堵拉组(T_3a)灰白色粉砂岩、页岩,出露在矿区东北。

矿区构造较简单,主要发育登许断裂,呈北西—南东向展布,宽 10~50 m,矿区内长约 4.50 km。断层内见大量的构造角砾岩和擦痕,根据擦痕方向判断,该断层性质为逆断层。

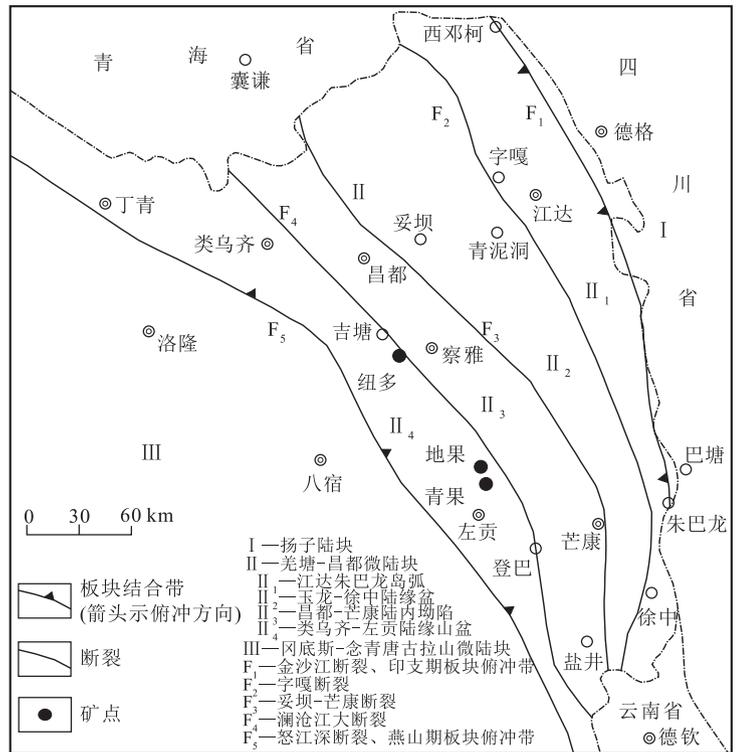


图 1 纽多石墨矿区域构造位置

Fig. 1 Regional tectonic location of the Niuduo graphite ore district

矿区岩浆活动较剧烈,沿登许断裂侵位于下石炭统卡贡组中,总体上呈带状分布。据穿切、包裹关系和已有的年龄数据显示^[4-5],早期为花岗闪长岩、细粒花岗岩(含矿岩体),晚期为似斑状黑云母二长花岗岩、黑云母二长花岗岩,明显切穿和包裹早期花岗闪长岩(图 3-a)、细粒花岗岩。

其中花岗闪长岩在矿区出露极少,但在矿区南部出露面积较大。岩石呈暗灰色,中粗粒结构,块状构造,主要矿物组成为斜长石(45%~50%)、钾长石(10%~15%)、石英(20%~25%)、黑云母(15%~20%)等,副矿物主要包括锆石、榍石、磁铁矿等。细粒花岗岩呈脉状、透镜状产于矿区中部,细粒结构、斑状结构(图 3-b),块状构造,矿物组成主要为斜长石(30%~35%)、钾长石(35%~40%)、石英(15%~25%)、黑云母(3%~5%)和不透明矿物(石墨,15%~20%),副矿物主要包括电气石、锆石等。其中,斜长石镜下多呈板柱状,可见聚片双晶,蚀变较强,大部分已绢云母化(图 3-c);钾长石主要是微斜长石和正长石,可见格子双晶(图 3-c);石英为无色,正低突起,表面较干净,波状消光,呈粒状或不规则状镶嵌在其他矿物之间;黑云母呈鳞片状、叶片状,多色性明显呈淡黄色—黄褐色(图 3-c),正中突起,呈

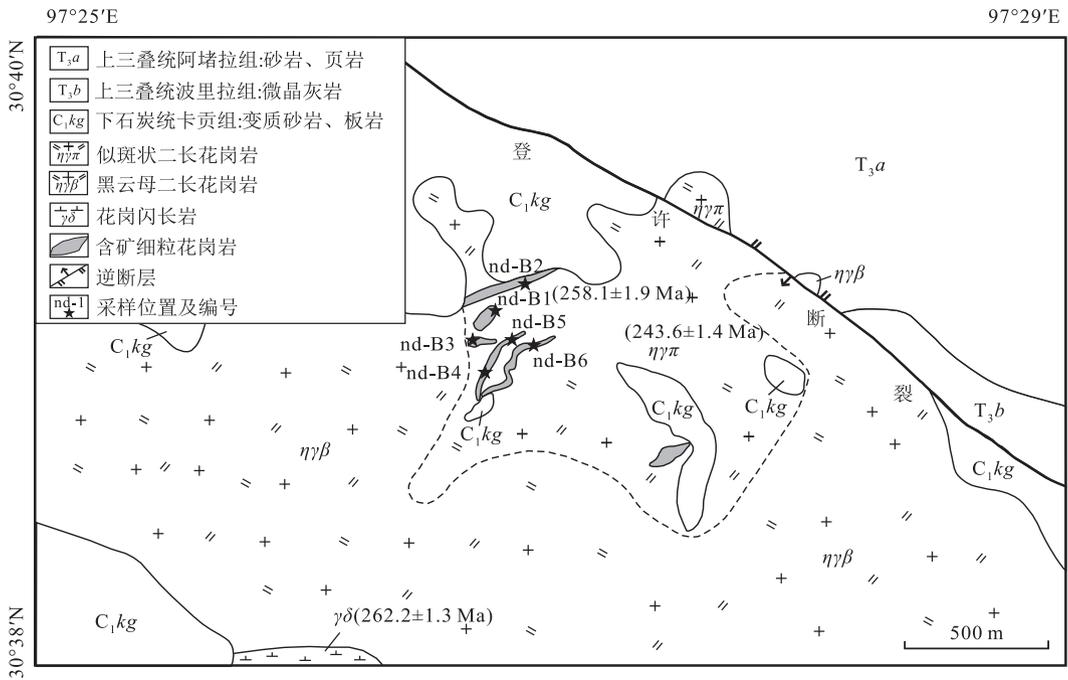


图2 纽多石墨矿区地质图

Fig. 2 Geological sketch map of the Niuduo graphite ore district

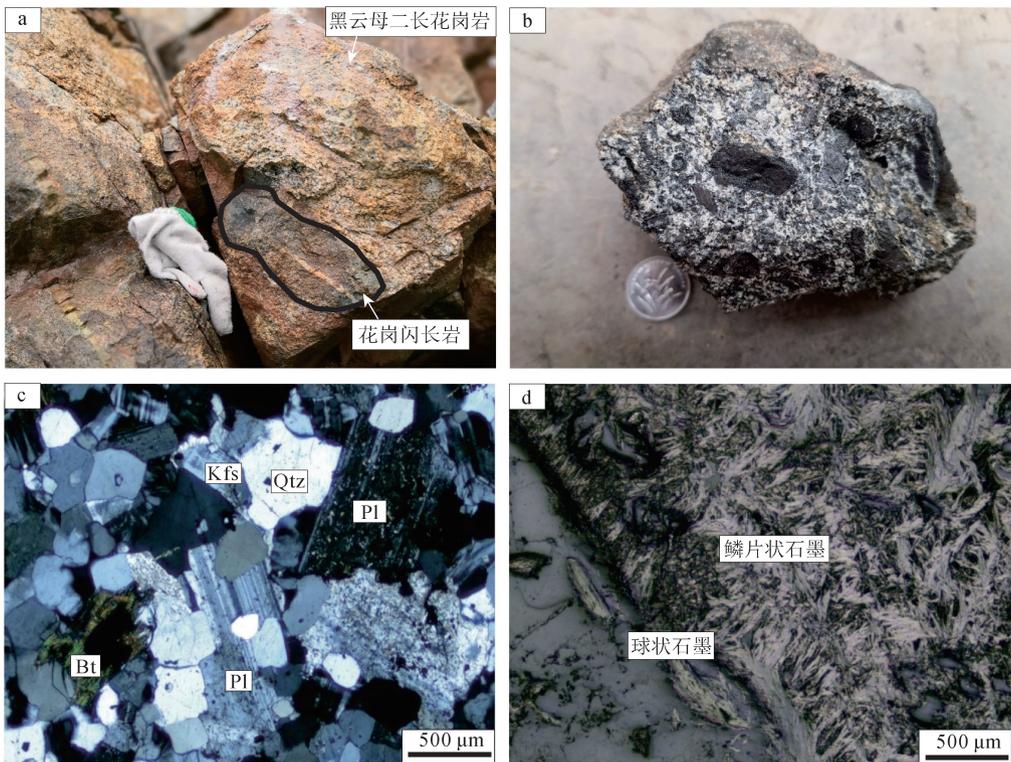


图3 纽多石墨矿区样品野外(a,b)及显微(c,d)照片

Fig. 3 Field photos (a,b) and microphotographs (c,d) of samples from the Niuduo graphite ore district
 a—黑云母二长花岗岩侵入时捕虏花岗闪长岩残留体;b—眼球状石墨矿化细粒花岗岩;c—斜长石聚片双晶,右边斜长石大部分绢云母化,微斜长石格子双晶,黑云母多色性(+);d—鳞片状、球状石墨(-);Qtz—石英;Bt—黑云母;Pl—斜长石;Kfs—钾长石

片状随机分布,局部有弱绿泥石化;石墨呈黑色不透明,分散片状或集合体分布(图 3-d),局部呈斑状,片状石墨直径 0.05~0.6 mm。黑云母二长花岗岩呈淡黄色,具中-细粒花岗结构及轻微的碎裂结构,块状构造。主要矿物成分为石英(约 28%)、斜长石(约 30%)、钾长石(约 35%),次要矿物主要为黑云母(约 7%),副矿物主要有榍石、锆石、铁质矿物等。

2 样品采集及分析方法

本次研究的样品主要为与成矿最密切的细粒

花岗岩,共采集样品 5 件,分别在各个含矿岩体采集(图 2),均为含矿细粒花岗岩(图 3-b)。

主量和微量元素测试在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。其中主量元素用 X 射线荧光光谱法测试;微量元素利用 Agilent 7700e ICP-MS 分析完成,标样为 BCR-2,大部分元素的分析精度优于 3%。分析结果见表 1。

锆石单矿物分选和阴极发光(CL)拍摄图像在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。根据锆石阴极发光图像,结合本次研究目的,选择具有明显环

表 1 纽多细粒花岗岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 1 Whole-rock major elements, trace elements and REE data from the fine-grained granite of Niuduo

样品号	nd/B1	nd/B2	nd/B3	nd/B4	nd/B5	nd/B6	样品号	nd/B1	nd/B2	nd/B3	nd/B4	nd/B5	nd/B6
SiO ₂	74.31	61.05	66.13	57.35	58.83	77.63	Nb	29.6	42.9	25.9	26.0	22.9	21.3
TiO ₂	0.22	0.63	0.46	0.89	0.68	0.18	Sn	2.43	4.88	4.94	4.30	5.32	3.59
Al ₂ O ₃	12.82	13.99	14.27	14.20	14.73	12.61	Cs	3.51	2.62	6.21	7.79	6.53	3.42
TFe ₂ O ₃	0.69	5.68	3.49	3.81	3.28	0.44	Ba	268	269	356	246	226	324
MnO	0.01	0.07	0.03	0.05	0.04	0.01	La	80.6	58.4	63.7	41.5	37.9	53.1
MgO	0.14	0.68	0.37	0.76	0.75	0.08	Ce	160	101	111	81.8	76.3	98.5
CaO	0.72	0.92	0.70	1.03	0.98	0.61	Pr	17.6	12.4	12.6	9.73	8.93	11.0
Na ₂ O	3.05	3.43	2.64	3.00	3.00	3.06	Nd	60.4	44.6	44.3	36.2	33.3	38.0
K ₂ O	4.89	3.50	4.43	2.36	2.52	3.90	Sm	11.6	9.05	8.82	7.17	7.03	6.84
P ₂ O ₅	0.03	0.10	0.11	0.13	0.10	0.03	Eu	0.73	1.08	1.20	1.30	1.24	0.90
烧失量	3.05	9.20	7.09	16.05	15.16	1.66	Gd	9.55	8.81	8.13	6.35	5.83	5.52
总计	99.92	99.24	99.72	99.63	100.06	100.21	Tb	1.79	1.76	1.50	1.04	1.01	0.90
A/NK	1.24	1.48	1.56	1.89	1.92	1.36	Dy	10.4	11.0	9.87	6.24	6.32	5.51
A/CNK	1.11	1.29	1.41	1.57	1.6	1.23	Ho	2.04	2.19	1.98	1.20	1.18	1.04
R ₁	2797	2174	2573	2563	2607	3209	Er	5.97	6.64	5.99	3.54	3.52	3.14
R ₂	346	451	403	511	508	321	Tm	0.91	1.04	0.92	0.52	0.55	0.50
Li	5.34	19.8	18.7	36.9	30.2	6.41	Yb	5.75	6.48	6.16	3.69	3.63	3.74
Be	4.08	2.30	3.60	2.69	3.01	3.78	Lu	0.89	0.95	0.88	0.53	0.53	0.56
Sc	3.49	9.66	8.36	11.3	11.1	2.07	Hf	6.90	6.05	7.00	6.04	5.30	9.75
V	12.7	54.1	37.3	83.0	82.1	7.03	Ta	2.16	3.14	2.35	1.67	1.69	1.54
Cr	4.38	21.1	12.2	34.4	34.2	3.81	Tl	0.83	0.55	0.79	0.65	0.56	0.64
Co	0.52	2.01	1.61	3.85	2.11	0.48	Pb	42.9	20.4	22.7	7.51	10.0	26.0
Ni	1.32	6.17	5.99	10.4	5.92	2.63	Th	33.8	21.9	27.9	16.3	17.3	27.0
Cu	5.48	5.60	7.10	23.6	21.3	6.69	U	4.96	2.53	4.42	2.87	2.12	7.48
Zn	11.8	222	38.0	80.7	48.0	12.0	∑REE	367	265	277	201	187	229
Ga	23.2	26.4	25.1	21.6	23.1	20.6	LREE	331	226	242	178	165	208
Rb	166	104	161	114	106	128	HREE	37.32	38.92	35.45	23.11	22.55	20.90
Sr	104	133	151	114	109	146	LREE/HREE	8.88	5.81	6.82	7.69	7.31	9.97
Y	61.4	69.2	61.6	34.1	35.4	31.7	La _N /Yb _N	10.06	6.46	7.41	8.07	7.51	10.18
Zr	230	204	234	215	191	344	δEu	0.21	0.37	0.43	0.59	0.59	0.45
							δCe	1.04	0.92	0.97	1.00	1.02	1.00

注: A/NK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O)(mol); A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)(mol); R₁=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti); R₂=6Ca+2Mg+Al; 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

带的锆石进行 U-Pb 同位素定年。锆石 U-Pb 同位素定年和微量元素含量测试在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。测试仪器为 Agilent 7700e, GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成。本次分析的激光束斑和频率分别为 32 μm 和 5 Hz。U-Pb 同位素定年和微

量元素含量处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。每个时间分辨分析数据包括 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号。对分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal 完成^[6-7]。加权平均计算和锆石 U-Pb 谐和图绘制采用 Isoplot/Ex_ver3 完成^[8]。锆石 U-Pb 同位素和微量元素分析结果见表 2。

表 2 纽多细粒花岗岩 (nd-B1) LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb analytical data from the fine-grained granite of Niuduo (nd-B1 sample)

测点号	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
01	84	822	1808	0.45	0.0473	0.0019	0.2680	0.0104	0.0410	0.0004	61.2	105.5	241	8.3	259	2.8
02	23	259	465	0.56	0.0477	0.0030	0.2718	0.0169	0.0415	0.0006	87.1	140.7	244	13.5	262	3.6
03	64	801	1289	0.62	0.0500	0.0019	0.2947	0.0111	0.0423	0.0005	195	87.0	262	8.7	267	3.2
04	43	393	950	0.41	0.0519	0.0022	0.2995	0.0124	0.0416	0.0005	280	93.5	266	9.7	263	3.1
05	41	380	885	0.43	0.0535	0.0022	0.3058	0.0120	0.0411	0.0005	350	92.6	271	9.4	260	2.9
06	17	199	349	0.57	0.0515	0.0030	0.2946	0.0163	0.0417	0.0007	261	135.2	262	12.8	264	4.1
07	37	369	784	0.47	0.0496	0.0020	0.2885	0.0116	0.0417	0.0005	176	128.7	257	9.1	264	3.3
08	14	176	292	0.60	0.0497	0.0030	0.2889	0.0160	0.0422	0.0006	189	143.5	258	12.6	266	3.7
09	38	462	806	0.57	0.0486	0.0020	0.2831	0.0117	0.0420	0.0005	128	100.0	253	9.2	265	3.3
10	39	587	762	0.77	0.0501	0.0020	0.2900	0.0113	0.0417	0.0005	198	99.1	259	8.9	264	3.0
13	56	752	1158	0.65	0.0565	0.0021	0.3176	0.0116	0.0404	0.0005	472	83.3	280	8.9	255	2.8
14	38	378	806	0.47	0.0508	0.0021	0.2920	0.0115	0.0414	0.0005	235	62.0	260	9.0	261	3.2
15	89	1654	1681	0.98	0.0525	0.0017	0.2979	0.0095	0.0408	0.0004	306	78.7	265	7.4	258	2.7
16	45	517	971	0.53	0.0500	0.0018	0.2758	0.0095	0.0397	0.0004	195	83.3	247	7.6	251	2.3
17	66	758	1341	0.57	0.0499	0.0017	0.2913	0.0101	0.0420	0.0005	191	112.0	260	7.9	265	3.1
18	56	513	1225	0.42	0.0525	0.0019	0.2877	0.0102	0.0395	0.0004	309	78.7	257	8.0	250	2.7
19	49	563	1017	0.55	0.0531	0.0021	0.2943	0.0112	0.0400	0.0004	345	95.4	262	8.8	253	2.7
20	20	194	423	0.46	0.0490	0.0026	0.2802	0.0148	0.0412	0.0005	150	156.5	251	11.7	260	3.3
21	51	509	1035	0.49	0.0520	0.0019	0.3052	0.0111	0.0420	0.0005	287	78.7	270	8.7	266	2.9
22	65	786	1367	0.58	0.0502	0.0019	0.2816	0.0107	0.0401	0.0004	206	88.9	252	8.5	254	2.7
23	104	1419	2208	0.64	0.0502	0.0018	0.2788	0.0099	0.0397	0.0004	206	83.3	250	7.9	251	2.6
24	39	452	812	0.56	0.0492	0.0022	0.2886	0.0128	0.0418	0.0005	167	103.7	257	10.1	264	3.2
25	63	760	1353	0.56	0.0522	0.0022	0.2933	0.0118	0.0402	0.0005	300	94.4	261	9.3	254	2.9
26	40	364	862	0.42	0.0504	0.0023	0.2944	0.0134	0.0416	0.0005	213	105.5	262	10.5	263	3.0
27	32	299	679	0.44	0.0516	0.0023	0.3011	0.0128	0.0419	0.0005	333	101.8	267	10.0	265	3.0
28	49	577	1023	0.56	0.0518	0.0022	0.2928	0.0120	0.0406	0.0004	276	96.3	261	9.4	257	2.6
29	26	231	549	0.42	0.0520	0.0026	0.3031	0.0148	0.0421	0.0006	283	112.9	269	11.5	266	3.6
30	71	1004	1413	0.71	0.0545	0.0023	0.3107	0.0131	0.0410	0.0004	391	91.7	275	10.1	259	2.7
31	31	319	686	0.47	0.0525	0.0025	0.2927	0.0140	0.0399	0.0005	309	107.4	261	11.0	252	3.2
32	48	570	864	0.66	0.0556	0.0024	0.3205	0.0131	0.0416	0.0005	435	91.7	282	10.0	263	2.9
34	102	1456	2112	0.69	0.0515	0.0017	0.2858	0.0094	0.0396	0.0004	265	77.8	255	7.4	250	2.5
35	88	1377	1776	0.78	0.0518	0.0019	0.2907	0.0101	0.0401	0.0005	276	88.0	259	7.9	253	3.2
36	37	346	800	0.43	0.0509	0.0024	0.2866	0.0134	0.0402	0.0005	235	111.1	256	10.6	254	3.0
37	43	401	913	0.44	0.0503	0.0023	0.2856	0.0127	0.0404	0.0005	206	105.5	255	10.0	255	3.1
38	71	836	1487	0.56	0.0500	0.0020	0.2813	0.0107	0.0400	0.0005	195	92.6	252	8.5	253	2.9

3 分析结果

3.1 全岩地球化学特征

纽多含矿细粒花岗岩全岩主量、微量元素分析结果见表 1。由于细粒花岗岩部分样品后期蚀变强烈,烧失量含量较高(9.20%~15.16%),因此,在讨论细粒花岗岩的主量元素地球化学特征时,本次样品将主量元素氧化物中的烧失量含量扣除后重新换算成 100% 的成分。纽多含矿细粒花岗岩 SiO_2 含量为 67.81%~78.77%,全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)含量为 6.41%~8.19%,平均为 7.25%,显示高碱的特征;岩石具较低的 TiO_2 (0.19%~0.89%)、 MgO (0.08%~0.91%) 和 P_2O_5 (0.03%~0.15%) 含量,以及较高的

Al_2O_3 含量(12.80%~17.35%)。样品的里特曼指数(σ)为 1.61~2.38,属于钙碱性岩。在 SiO_2 - K_2O 图解(图 4-a)中,样品点均落入高钾钙碱性系列区域或其边缘;在 A/CNK - A/NK 图解(图 4-b)中,样品点均落入过铝质范围,且 A/CNK 值均大于 1.1,为铝饱和系列。上述特征表明,纽多细粒花岗岩为高钾钙碱性过铝质花岗岩。

从表 1 可以看出,纽多细粒花岗岩稀土元素总量变化较大, ΣREE (不含 Y)介于 187×10^{-6} ~ 369×10^{-6} 之间; LREE/HREE 值介于 5.81~9.97 之间,显示轻稀土元素(LREE)富集、重稀土元素(HREE)相对亏损的特征;稀土元素配分曲线呈右倾斜的轻稀土元素富集型(图 5-a), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值变化于 6.46~10.18

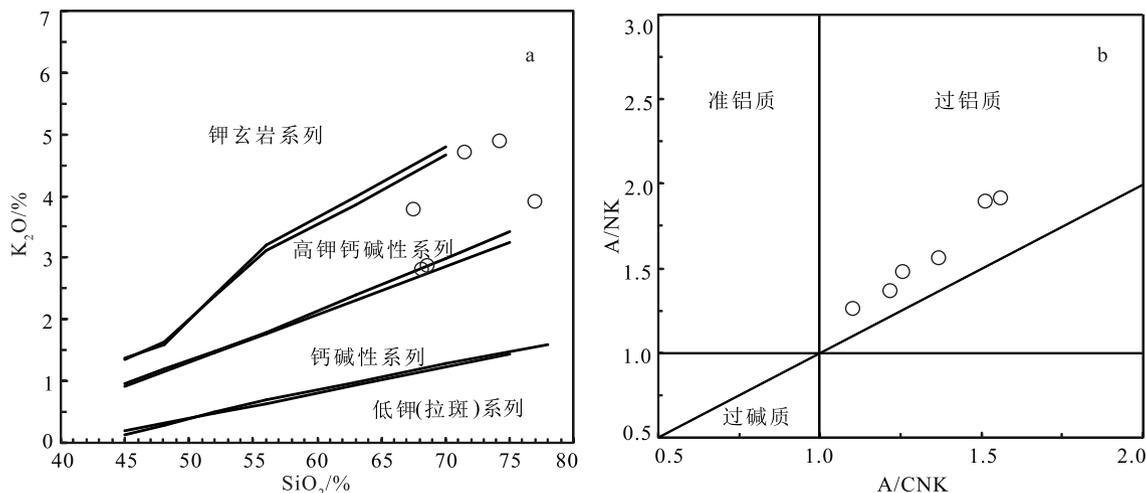


图 4 纽多细粒花岗岩 SiO_2 - K_2O (a)^[9-10] 和 A/CNK - A/NK 图解(b)^[11]

Fig. 4 SiO_2 - K_2O (a) and A/CNK - A/NK (b) plots for the fine-grained granite of Niuduo

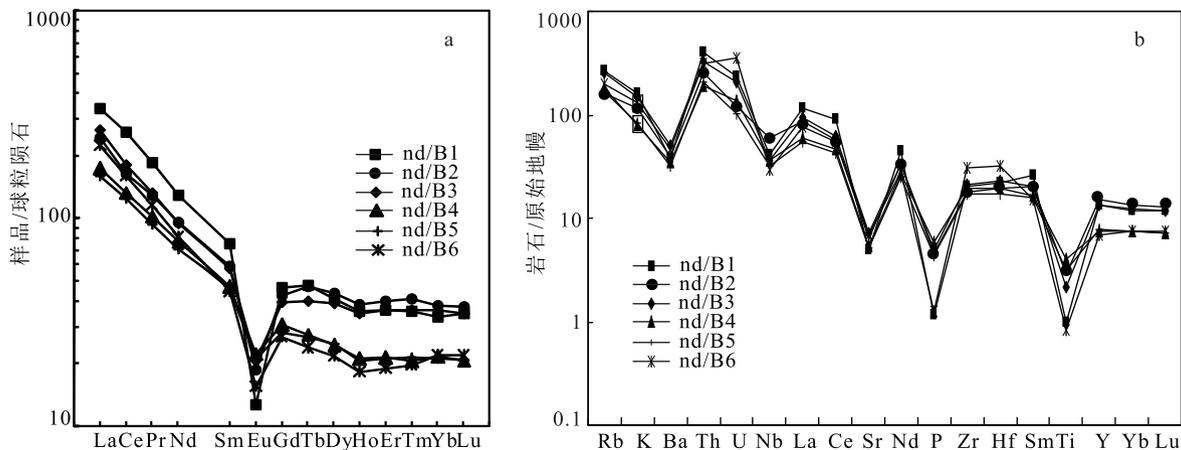


图 5 纽多细粒花岗岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)^[12]

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace element patterns(b) for the fine-grained granite of Niuduo

之间,表明轻、重稀土元素分馏明显; δEu 值在0.21~0.59之间,显示明显的负Eu异常; δCe 值为0.92~1.04,基本无异常。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图5-b)中,所有样品表现出相似的分布曲线,Nb、Ba、Sr、P、Ti等高场强元素相对亏损,尤其亏损Ti,相对富集Rb、K、U等大离子亲石元素。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

样品锆石大多具有相似的形貌学特征,呈长柱状或短柱状。在阴极发光图像上,锆石颗粒大小为50~150 μm ,均具有清晰的振荡环带结构(图6),且锆石中Th/U 值为0.41~0.98,均大于0.4,属于典型的岩浆锆石^[13-14]。

对细粒花岗岩样品(nd-B1)中的35颗锆石进行LA-ICP-MS的U-Pb同位素分析,所有测点均位于锆石的边部,得到35个有效U-Pb同位素数据(表2;图7),Th含量为 176×10^{-6} ~ 1654×10^{-6} ,U含量为 292×10^{-6} ~ 2208×10^{-6} ;测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄范围为 267 ± 3.2 ~ 250 ± 2.5 Ma,年龄加权平均值为 258.1 ± 1.9 Ma($n=35$,MSWD=3.5),该年龄可代表纽多细粒花岗岩的形成年龄,即细粒花岗岩属于晚二叠世。

4 讨论

4.1 物源

纽多细粒花岗岩诸多方面表现出陆壳物源的特点。岩石化学特征显示具有较高的铝饱和指数

(A/NCK值),介于1.1~1.56之间,属于过铝质高钾钙碱性系列;岩石含有较低的CaO及略高的 Na_2O 含量,具有较高的Rb/Sr值,在ACF判别图(图8-a)中,样品点均落入S型花岗岩区域,在成因类型上相当于Chappell等^[15-16]的S型花岗岩。

稀土元素具低的Sm/Nd值(0.18~0.2),低于陆壳平均值0.23,证明其源区岩石主要是陆壳组分,为陆壳重熔型花岗岩。S型花岗岩的源区具有多样性,但主要为变沉积岩类,包括变杂砂岩、变泥质岩等^[17]。实验岩石学研究显示,不同类型变质沉积岩的部分熔融形成的花岗岩具有明显不同的微量元素比值,如泥质岩石熔融形成的熔体具有明显高的Rb/Sr和Rb/Ba值,而砂岩熔融形成的岩浆具有较低的比值^[18]。纽多细粒花岗岩Rb/Sr和Rb/Ba值都较低,且在Rb/Sr-Rb/Ba图解(图8-b)中,样品点均落入贫粘土源区,靠近杂砂岩源附近,暗示纽多细粒花岗岩源区为陆壳砂岩。

4.2 纽多细粒花岗岩形成时代

样品锆石形态多为自形晶,具有明显的岩浆锆石特征,如含有高的Th/U值(绝大多数大于0.4)及明显的振荡环带。测得岩浆成因的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 258.1 ± 1.9 Ma,该年龄应该代表了细粒花岗岩的侵位年龄,推断岩体的形成时代为晚二叠世。王新雨等^[5]在纽多岩体南部花岗闪长岩中获得锆石U-Pb年龄为 262 ± 1.3 Ma,与本次测得的细

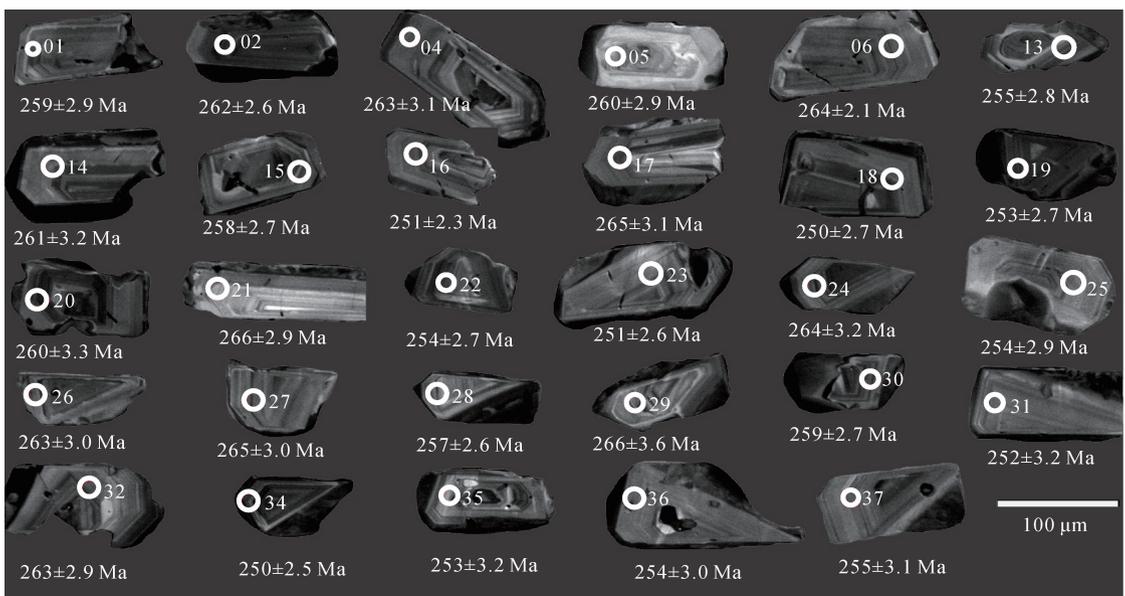


图6 纽多细粒花岗岩样品(nd-B1)锆石阴极发光(CL)图像及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

Fig. 6 The CL images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of zircon from the fine-grained granite of sample nd-B1 from Niuduo

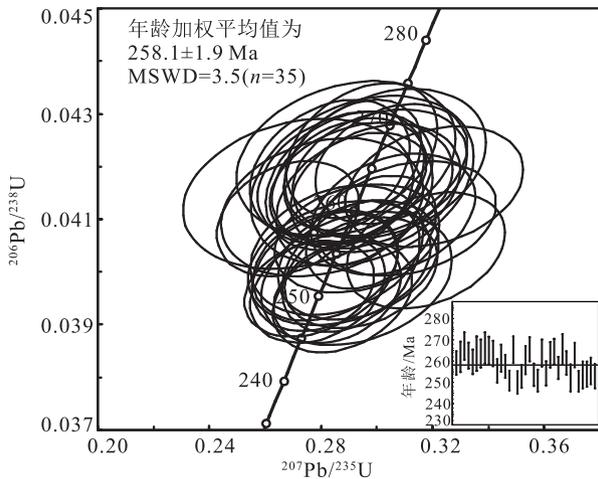


图 7 纽多细粒花岗岩 (nd-B1) 锆石 U-Pb 谱和图
Fig. 7 U-Pb concordia diagram of the zircon for the fine-grained granite of Niuduo (sample nd-B1)

粒花岗岩年龄一致; 而樊炳良等^[4]在纽多测得黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄值为 243.6 ± 1.4 Ma, 则代表该地区早三叠世一期的岩浆活动。以上年龄数据表明, 纽多地区晚二叠世—早三叠世一直有岩浆活动, 而细粒花岗岩属于晚二叠世在纽多北部的表现, 且矿区内细粒花岗岩呈脉状、透镜状的原因可能是受到后期黑云母二长花岗岩的改造。

4.3 形成环境

纽多细粒花岗岩位于北澜沧江西侧, 本文测试的纽多细粒花岗岩颗粒锆石 U-Pb 年龄显示其形成于印支早期, 与古特提斯洋的最终关闭、南北大陆

碰撞时间基本相当, 因此认为, 纽多细粒花岗岩与古特提斯洋的最终关闭和板块碰撞有关。在 R_1-R_2 构造判别图上, 样品点落入同碰撞或造山其后花岗岩区 (图 9-a), 而在 $(Y+Nb)-Rb$ 判别图 (图 9-b) 上, 样品点落入后碰撞花岗岩区 (Post-COLG), 反映了纽多细粒花岗岩是与澜沧江碰撞带有关的同时碰撞 (后碰撞) 花岗岩。因此, 纽多细粒花岗岩大体上相当于 Pearce 等^[19]划分的同构造陆-陆碰撞型花岗岩, 系本区主构造作用期 (印支早期) 形成的同时碰撞 (后碰撞) 花岗岩, 是洋壳板块俯冲消减后大陆对接碰撞的产物。

实验岩石学研究显示, Al_2O_3/TiO_2 值可以反映源区岩石部分重熔时的温度, 且存在两者比值与温度呈负相关的特征^[18]。纽多细粒花岗岩的 Al_2O_3/TiO_2 值为 16.01~68.91 (小于 100), 表明纽多细粒母二长花岗岩岩浆形成的温度较高。因此纽多细粒花岗岩可能是碰撞造山导致地壳加厚增温重熔形成的。

5 结论

(1) 纽多细粒花岗岩具有富钾、过铝、钙碱性 S 型花岗岩的特征, 轻、重稀土元素分馏明显, 稀土元素配分曲线呈右倾斜的轻稀土元素富集型, 具有明显的负 Eu 异常, 微量元素明显亏损 Nb、Ba、Sr、P、Ti 等高场强元素, 相对富集 Rb、K、U 等大离子亲石元素。

(2) 纽多细粒花岗岩锆石颗粒 U-Pb 同位素测年结果显示其形成年龄为 258.1 ± 1.9 Ma, 属于晚二叠世, 为印支期早期岩浆活动的产物, 之后又受到

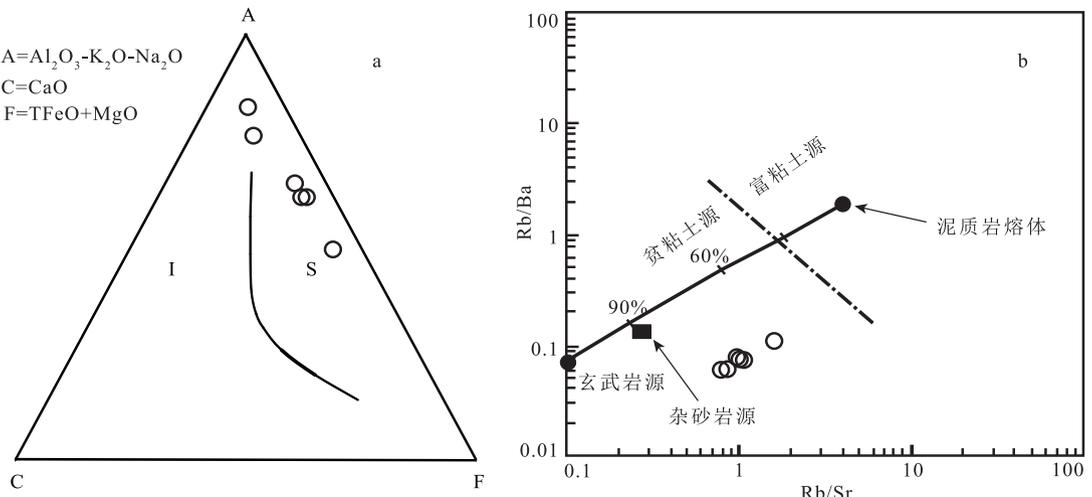


图 8 纽多细粒花岗岩 ACF 成因类型判别图解 (a) 和 Rb/Sr-Rb/Ba 图解 (b)
Fig. 8 ACF (a) and Rb/Sr-Rb/Ba (b) diagrams for the fine-grained granite of Niuduo

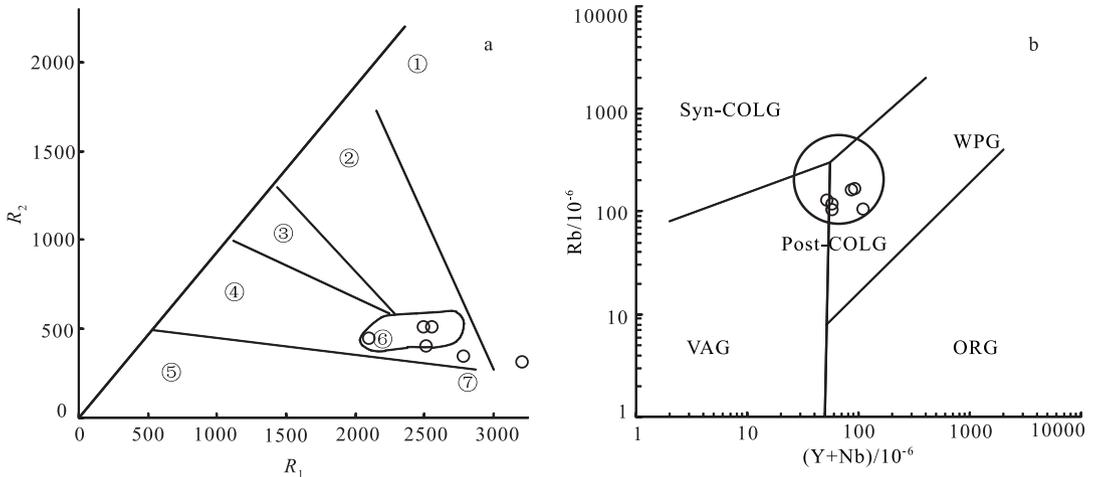


图9 纽多细粒花岗岩 R_1-R_2 (a)和 $(Y+Nb)-Rb$ (b)构造判别图解

Fig. 9 R_1-R_2 (a) and $(Y+Nb)-Rb$ (b) tectonic discriminate diagrams for the fine-grained granite of Niuduo

①—地幔斜长花岗岩;②—破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)花岗岩;③—板块碰撞后隆起期花岗岩;④—晚造山期花岗岩;⑤—非造山区A型花岗岩;⑥—同碰撞(S型)花岗岩;⑦—造山期后A型花岗岩;VAG—火山弧花岗岩;ORG—洋中脊花岗岩;WPG—板内花岗岩;Syn-COLG—同碰撞花岗岩;Post-COLG—后碰撞花岗岩

早三叠世黑云母二长花岗岩的改造。

(3) 纽多细粒花岗岩来源于陆壳杂砂岩的部分熔融,且成岩温度较高,可能是碰撞造山导致地壳加厚增温重熔形成的。

致谢:在实验测试过程中,得到武汉上谱分析科技有限责任公司协助,获得了精确的实验数据;两位审稿专家在文稿修改过程中提出的宝贵意见对文章质量的提升帮助极大,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 扎西平措,何亮,杜秋,等.藏东地区石墨矿成矿规律及找矿方向研究[J].西藏科技,2019,(11):29-31.
- [2] 周新,冯德新,樊炳良,等.藏东纽多石墨矿床地质特征及成因[J].现代矿业,2019,35(11):57-60.
- [3] 何亮,林彬,扎西平措,等.西藏首例大型石墨矿床——青果矿床地质特征及含矿岩体U-Pb年龄[J].中国地质,网络首发,2020-01-22.
- [4] 樊炳良,白涛,冯德新,等.藏东纽多黑云母二长花岗岩锆石U-Pb年龄及成因[J].地质通报,2018,37(7):1226-1235.
- [5] 王新雨.北澜沧江带二叠—三叠纪花岗岩类对古特提斯洋俯冲、闭合过程的约束[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2018.
- [6] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257: 34-43.
- [7] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. Journal of Petrology, 2010, 51: 537-571.

- [8] Ludwig K R. User's Manual for isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, Special Publication N0.4a, 2003.
- [9] Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58: 63-81.
- [10] Middlemost E A K. Magmas and Magmatic Rocks[M]. London: Longman, 1985: 1-266.
- [11] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101: 635-643.
- [12] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics in ocean basalt: Implication for mantle composition and processes[C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society of London Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [13] 吴元保,郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2007, 8(16): 1589-1604.
- [14] Hoskin P W O, Ireland T R. Rare Earth Element Chemistry of Zircon and Its Use as a Provenance Indicator[J]. Geology, 2000, 28(7): 627-630.
- [15] Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types[J]. Pacific Geol, 1974, 8: 173-174.
- [16] Chappell B W, White A J R. I and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci., 1992, 83: 1-26.
- [17] Brown M. Granite: from genesis to emplacement[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 2013, 125(7/8): 1079-1113.
- [18] Sylvester P J. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. Lithos, 1998, 45: 29-44.
- [19] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956-983.