

滇西昌宁-孟连古特提斯闭合的岩浆活动响应 ——来自临沧岩体南段花岗岩的地质地球化学证据

苑新晨¹, 杨启军^{1,2}, 吕 勇³, 潘 明³, 高爱洋¹, 徐 放¹

YUAN Xincheng¹, YANG Qijun^{1,2}, LYU Yong³, PAN Ming³, GAO Aiyang¹, XU Fang¹

1. 桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林 541006;

2. 有色金属隐伏矿床勘查及材料开发协同创新中心, 广西 桂林 541006;

3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004

1. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541006, Guangxi, China;

2. Collaborative Innovation Center for Exploration of Hidden Nonferrous Metal Deposits and Development of New Materials, Guilin 541006, Guangxi, China;

3. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, Guangxi, China

摘要: 临沧花岗岩岩体(简称临沧岩体)是滇西澜沧江地区南段出露面积最大的复式岩基,也是特提斯构造域的重要组成部分,其岩石类型主要为黑云母二长花岗岩。锆石样品得出的定年结果为 225.1 ± 6.1 Ma,表明这些花岗岩类侵位于晚三叠世。临沧花岗岩的 K_2O/Na_2O 值大于1,铝饱和指数 $A/CNK = 1.05 \sim 1.95$,属高钾钙碱性过铝-强过铝质S型花岗岩。岩石总体上富集轻稀土元素($(La/Yb)_N = 6.06 \sim 21.01$),亏损重稀土元素,并显示出明显的负Eu异常($\delta Eu = 0.20 \sim 0.38$)。岩石地球化学特征指示,临沧花岗岩应为昌宁-孟连古特提斯封闭过程的产物,原岩为中下地壳贫粘土的变质砂岩和变质泥岩,其Pearce构造判别图解中的同碰撞属性是对古特提斯封闭及保山-思茅地块碰撞的响应。

关键词: 临沧花岗岩; U-Pb 锆石年代学; 古特提斯洋; 陆陆碰撞

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)01-0125-13

Yuan X C, Yang Q J, Lyu Y, Pan M, Gao A Y, Xu F. Response of magmatic activity to the closure of Changning-Menglian Palaeothys in western Yunnan: Evidence from geo-geochemical study on granite in southern section of Lincang pluton. Geological Bulletin of China, 2021, 40(1): 125-137

Abstract: Lincang intrusive, as the largest exposed compound batholith of southern Lancangjiang in western Yunnan, and an important component of tethys tectonic domain, is mainly biotite monzogranite in lithology. The zircon sample collected from granite was dated to 225.1 ± 6.1 Ma, suggesting that these intrusives were emplaced during the Late Triassic. The K_2O/Na_2O value of Lincang granite is greater than 1, and the aluminum saturation index A/CNK ranges from 1.05 to 1.95, indicating that Lincang intrusives are derived from S-type granite with high potassium calcium basic peraluminum-super peraluminum. Intrusives are remarkably characterized by enriched LREE and depleted HREE with $(La/Yb)_N = 6.06 \sim 21.01$ and δEu of $0.20 \sim 0.38$. The petro-geochemistry of intrusives indicates that the Lincang granite should be the product of the Changning-Menglian Palaeothys closure process, and the original rock of Lincang granite is lithologically clay-poor metamorphic sandstone and metamorphic mudstone in the middle and lower crust. The syncollision represented in its Pearce structure discrimination diagram is a response to the Palaeothys ocean closure and the Baoshan-Simao block collision.

Key words: Lincang granite; U-Pb zircon chronology; Palaeothys; continental collision

收稿日期: 2020-08-11; 修订日期: 2020-11-11

资助项目: 中国地质调查局项目《云南1:5万木嘎幅(F47E007015)、澜沧县幅等6幅区域地质调查》(编号: 1212011120594)

作者简介: 苑新晨(1996-), 男, 在读硕士生, 从事岩石地球化学研究。E-mail: 905105555@qq.com

通信作者: 杨启军(1964-), 男, 教授, 从事岩石学、构造地质学研究。E-mail: 898307002@qq.com

滇西临沧花岗岩基发育于冈瓦纳板块的保山地块与华南板块的思茅地块之间,北起昌宁,向南经过双江、澜沧延伸至勐海,南北长达 350 km,东西最宽处可达 5 km,是滇西地区出露规模最大的复式岩基。受华南板块和冈瓦纳板块演化过程的影响,临沧岩体发育区构造复杂,各种火山岩、侵入岩活动频繁,这些火成岩侵位过程记录了昌宁-孟连古特提斯演化过程,其成因及构造背景的研究备受关注。临沧花岗岩主要由印支期的二长花岗岩组成^[1],还包含华力西期花岗闪长岩、部分燕山期花岗岩^[2]和以勐库岩体为代表的碱长花岗岩^[3]。有关临沧花岗岩的年代学、成因、构造背景等方面,前人已做了大量的研究,但是目前仍存在许多争议^[2,4-6],主要集中在以下方面:一是关于临沧岩体的成因类型及形成时代,有研究者认为其属于 S 型花岗岩^[1,7-10],形成时代为印支期;也有人认为临沧岩体主体属于 S 型花岗岩,但含有部分 I 型花岗岩成分^[5],其中 I 型花岗岩为多期次多侵位的产物,形成时代包括加里东期、华力西期和印支期。二是关于临沧岩体形成的地质构造背景,传统观点认为,昌宁-孟连古特提斯结合带代表泥盆纪-三叠纪古特提斯洋消亡的残留印迹^[10-14],临沧岩体是古特提斯演化的产物。

随着昌宁-孟连结合带研究的不断深入,越来越多的学者认为,该结合带代表了古特提斯洋(称为昌宁-孟连古特提斯洋)的存在,昌宁-孟连古特提斯洋将思茅与保山地块隔开^[15-18],临沧岩体是特提斯演化过程的产物,但依旧存在同碰撞^[1,8-9]、碰撞后期-碰撞后^[19]、碰撞后^[9]等大地构造演化阶段的争论。临沧岩体作为昌宁-孟连古特提斯主缝合带^[8,17,20]中酸性侵入岩的组成部分,地质构造独特而复杂^[21],成矿条件优越,成为中外地质学者研究特提斯演化的良好场所和地学领域关注的重点^[9]。

本文在澜沧 6 幅 1:5 万地质测量工作的基础上,以临沧岩体南段澜沧地区硝塘花岗岩为研究对象,系统讨论硝塘花岗岩的时空展布、岩相学、年龄及地球化学特征,探讨临沧岩体南段花岗岩形成的地质构造背景,为临沧岩体的成因提供更多证据,并结合研究区火山作用、沉积作用的研究成果,探讨昌宁-孟连古特提斯的发育、演化及封闭过程。

1 区域地质概况

澜沧硝塘地区位于滇西澜沧县境内,在云南大地构造分区上属于冈瓦纳板块的保山地块(图 1),沿华南板块与冈瓦纳板块分界的澜沧江断裂带西缘分布。东侧隔着澜沧江断裂带是华南板块的保山地块。区域内发育主要地层:①中元古代西盟群惠民组二云母片岩;②泥盆纪温泉组砂岩夹硅质岩;③石炭纪南段组碎屑岩、二叠纪拉巴组巨厚层复理石建造碎屑岩;④西侧老厂地区发育澜沧-曼信火山岩带的早石炭世平掌组火山岩;⑤石炭纪-二叠纪鱼塘寨组富含筳类标准化石的碳酸盐岩;⑥发育于勐梭河盆地、小黑江流域的侏罗纪磨拉石红层砾岩。与硝塘岩体相距 5 km 的老厂,存在发育于平掌组火山岩中的大型老厂银铅锌矿床。

硝塘花岗岩是临沧岩体的组成部分,澜沧-曼信早石炭世火山岩带是昌宁-孟连结合带火成岩系统的组成部分,具有洋中脊火山岩特征^[6]。泥盆纪放射虫硅质岩、早石炭世 MORB 型平掌组火山岩、中石炭世-二叠纪浅海相鱼塘寨碳酸盐岩、同时异相的中石炭世-二叠纪南段组-拉巴组复理石建造、三叠纪花岗岩、侏罗纪磨拉石建造,与主体为中生代花岗岩,少量侵位其中的古近纪花岗岩一起,完整地记录了古特提斯洋的形成与扩张、洋-陆俯冲、岛弧形成、洋盆闭合、陆-陆碰撞等地质过程,构成昌宁-孟连古特提斯洋的地质演化历史的缩影^[22-24]。

硝塘花岗岩北起澜沧上允,南至竹塘,沿硝塘-石房-黑山一带出露,花岗岩西侧侵位于中元古代惠民组云母片岩中,在侵位接触带上,以断裂接触,大部分接触带被侏罗纪红层覆盖,看不到花岗岩与惠民组的侵入接触关系。岩体东侧的澜沧江断裂系与中元古代大勐龙变质杂岩接触。在 1:20 万地质调查中,硝塘花岗岩被划归至中生代花岗岩,并含有少量古近纪小岩株。

2 硝塘花岗岩的地质及岩相学特征

岩相学研究表明,硝塘花岗岩的主要岩石类型为中细粒黑云二长花岗岩、斑状二长花岗岩,中细粒结构、似斑状结构,块状构造,主要矿物组成为斜长石(35%~40%)、碱性长石(30%~35%)、石英

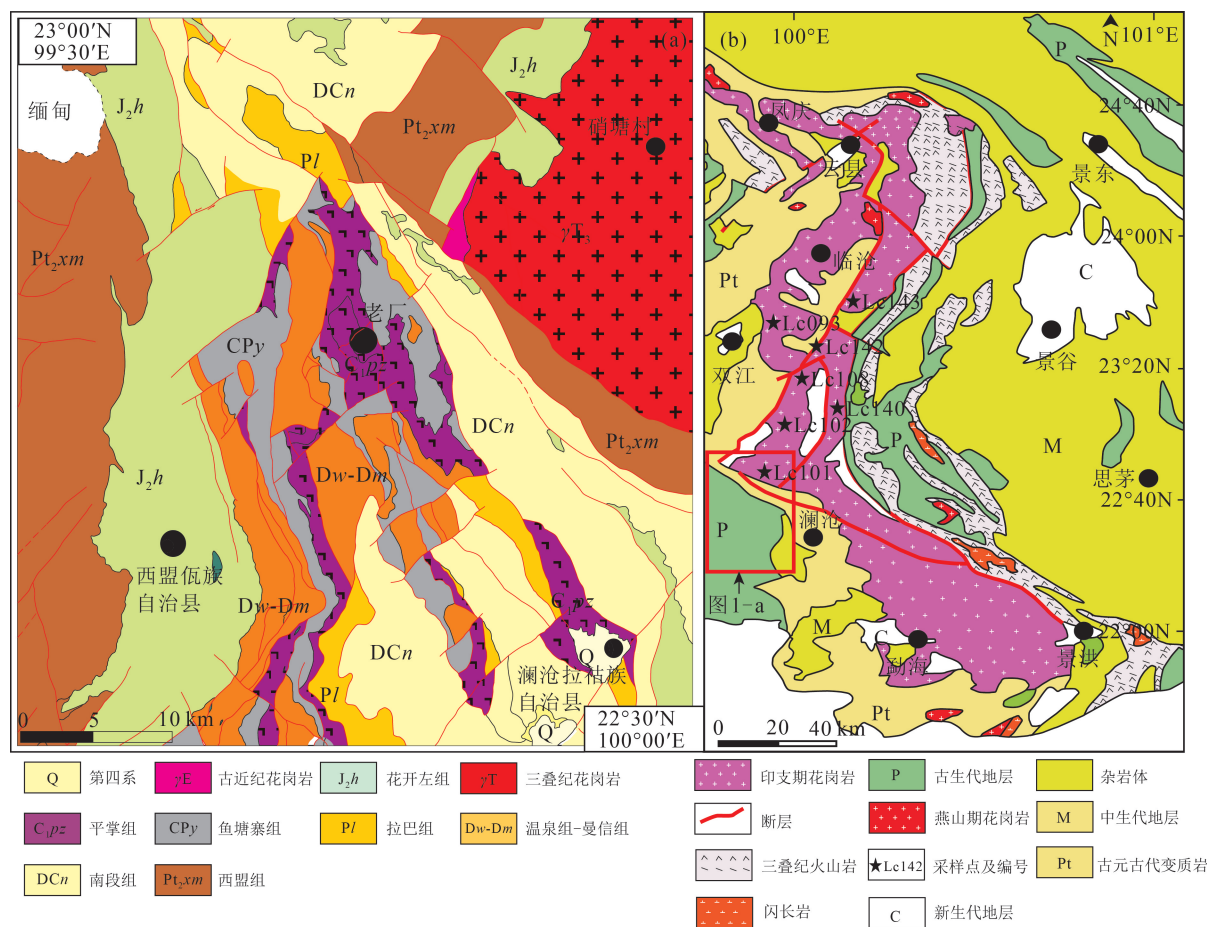
图 1 云南地区大地构造分区图(a)和澜沧江南段地质图(b)^[9]

Fig. 1 Tectonic map of Yunnan area (a) and the geological map of southern Lancangjiang (b)

(25%)及黑云母(5%),另含微量褐帘石、磷灰石、榍石等副矿物。斜长石呈半自形板状,多具绢云母化,常见聚片双晶,也可见卡钠复合双晶,因绢云母化表面呈浑浊的灰色,少数可见环带;碱性长石由正长石及条纹长石组成,半自形-他形粒状,正长石发育卡式双晶,因高岭土化表面略脏,单片光下呈淡褐色,条纹长石发育条纹结构;部分石英受力的作用出现波状消光,少量黑云母发生绿泥石化。

3 分析方法

3.1 岩石地球化学分析

本次对研究区采集的新鲜、未风化的黑云二长花岗岩 8 件(样品号为 LC-102-1)进行分析。样品首先在廊坊诚信地质服务有限公司碎至 200 目。后送至澳实分析检测(广州)公司进行主量、微量及稀

土元素含量测定。主量元素分析采用 Rigaku 100e 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)分析,精度优于 2%;稀土与微量元素采用 PerkinElmer Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析,精度优于 5%。岩石主量和微量元素的计算及地球化学投图由 Excel 及 Geokit Pro 完成。

3.2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析

采用 LA-ICP-MS 激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪对硝塘花岗岩进行锆石 U-Pb 定年。定年样品采自硝塘岩体中心部位的东冲河河谷的新鲜露头(样品号 LC-102),岩性为二长花岗岩。锆石单矿物挑选在自然资源部廊坊物化探研究所完成,锆石制靶和阴极发光照相在北京铅年领航科技有限责任公司完成,锆石 U-Th-Pb 同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪的激光

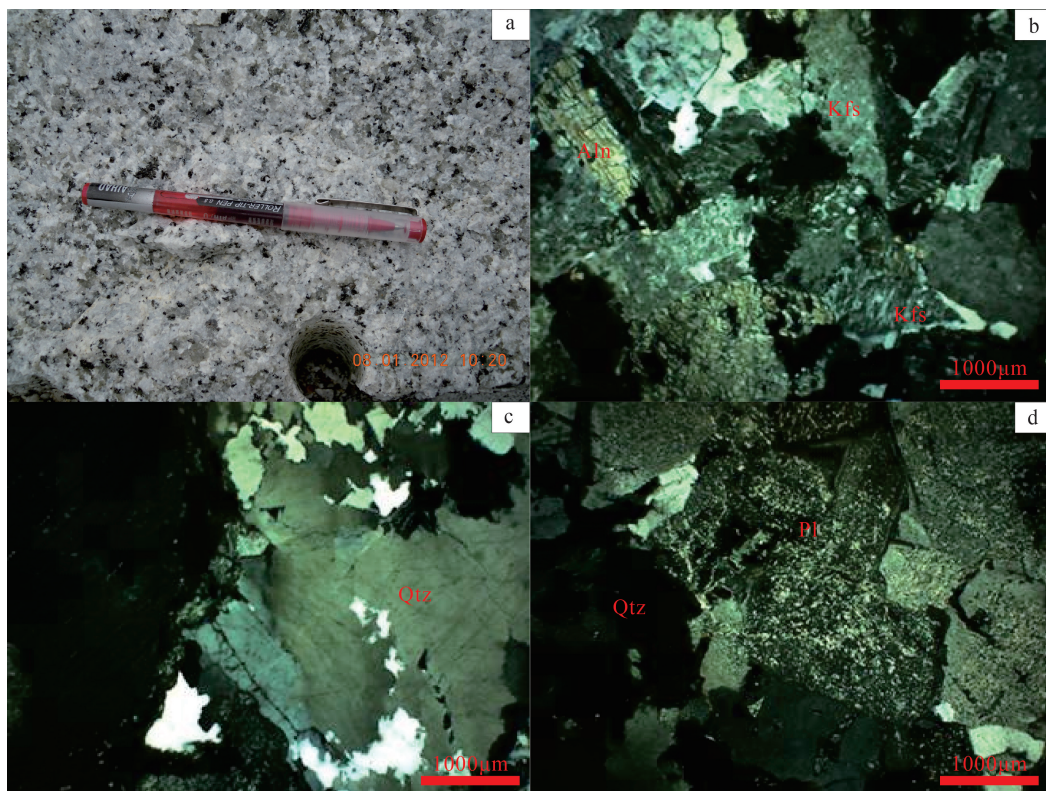


图2 硝塘花岗岩手标本(a)及显微(b~d)照片

Fig. 2 Hand specimen photograph (a) and microphotographs (b~d) of the Lincang granite

a—手标本照片;b—碱性长石的卡式双晶及条纹长石的条状结构;c—石英,具波状消光;
d—斜长石的卡纳复合双晶;Qtz—石英;Kfs—钾长石;Pl—斜长石;Aln—褐帘石

剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 仪器型号为 Agilent 7500a。对分析数据的离线处理采用 ICPMSDataCal 完成^[25-27]。锆石样品的 U-Pb 谐和图绘制和年龄加权平均值计算采用 Isoplot 完成。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

锆石 U、Th、Pb 同位素组成和年龄如表 1 所示。Th 含量为 $459 \times 10^{-6} \sim 1083 \times 10^{-6}$, U 含量为 $1340 \times 10^{-6} \sim 6811 \times 10^{-6}$, 对应的 Th/U 值为 0.16~0.52。样品锆石大小较一致, 一般在 70~200 μm 之间。CL 图像显示, 锆石发育典型岩浆成因韵律环带结构, 呈中-短柱状, 无色透明, 长宽比为 1~3, 为自形程度较好、无明显增生边的原生岩浆锆石(图 3-b)。

样品锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 205~226 Ma 之间, 都位于谐和线上或其附近, 年龄值相对集中, 但

其中 LC102-3.1、LC102-4.1 两个点的年龄加权年龄值分别为 205 ± 3.0 Ma 和 219 ± 3.0 Ma, 为不谐和年龄, 误差较大, 故剔除。锆石 U-Pb 谐和图(图 3-a)显示, 硝塘花岗岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 225.3 ± 1.7 Ma ($n=13$, MSWD=0.012), 代表了岩浆结晶年龄, 表明其侵位时间为 225.3 ± 1.7 Ma, 即晚三叠世。该年龄与区域研究获得的临沧岩体景洪段的 220 Ma、云县段 231 Ma^[19] 的结果在误差范围内基本一致。

4.2 地球化学特征

硝塘花岗岩的岩石主量、微量和稀土元素分析结果见表 2。岩石 SiO_2 含量在 73.24%~78.13% 之间, Al_2O_3 含量为 11.9%~14.6%, 里特曼指数为 1.44~2.01, 小于 3.3, 显示岩石属钙碱性岩类。而钾质含量较高, 属于高钾钙碱性系列(图 4)。Al 含量较高, 铝饱和指数 A/CNK 全部大于 1, 大部分大于 1.1。在 A/CNK-A/NK 图解(图 5)中, 样品点主要

表 1 硝塘花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析结果
Table 1 U-Th-Pb ages of LA-ICP-MS zircon for Xiaotang granite

点号	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	Th/U	比值				年龄/Ma							
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$		
LC-102-1.1	881	2490	0.35	0.05581	0.00247	0.26753	0.01135	0.03561	0.00050	456	98	241	9	226	3
LC-102-2.1	459	1788	0.26	0.05440	0.00270	0.26146	0.01250	0.03564	0.00060	387	111	236	10	226	4
LC-102-3.1	729	2553	0.29	0.06210	0.00279	0.29061	0.01229	0.03457	0.00044	676	92	259	10	219	3
LC-102-4.1	490	1382	0.36	0.06474	0.00419	0.27939	0.01613	0.03225	0.00050	765	132	250	13	205	3
LC-102-5.1	1083	6811	0.16	0.05565	0.00209	0.27122	0.00921	0.03546	0.00043	439	83	244	7	225	3
LC-102-6.1	532	1507	0.35	0.05067	0.00216	0.24801	0.01047	0.03560	0.00048	233	98	225	9	225	3
LC-102-7.1	698	1629	0.43	0.05211	0.00223	0.25625	0.01111	0.03562	0.00048	300	98	232	9	226	3
LC-102-8.1	543	1607	0.34	0.05211	0.00238	0.25740	0.01216	0.03555	0.00060	300	104	233	10	225	4
LC-102-9.1	710	3481	0.20	0.04942	0.00148	0.24390	0.00764	0.03562	0.00040	169	70	222	6	226	3
LC-102-10.1	575	1595	0.36	0.05171	0.00206	0.25576	0.01079	0.03559	0.00042	272	86	231	9	225	3
LC-102-11.1	533	2219	0.24	0.04989	0.00170	0.24552	0.00856	0.03554	0.00038	191	112	223	7	225	2
LC-102-12.1	774	1713	0.45	0.05351	0.00243	0.26134	0.01154	0.03563	0.00061	350	97	236	9	226	4
LC-102-13.1	518	1601	0.32	0.05131	0.00238	0.25297	0.01234	0.03551	0.00060	254	110	229	10	225	4
LC-102-14.1	643	2385	0.27	0.05342	0.00206	0.26155	0.00984	0.03558	0.00053	346	87	236	8	225	3
LC-102-15.1	696	1340	0.52	0.05223	0.00269	0.25567	0.01252	0.03553	0.00059	295	119	231	10	225	4

注:测试单位为中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室

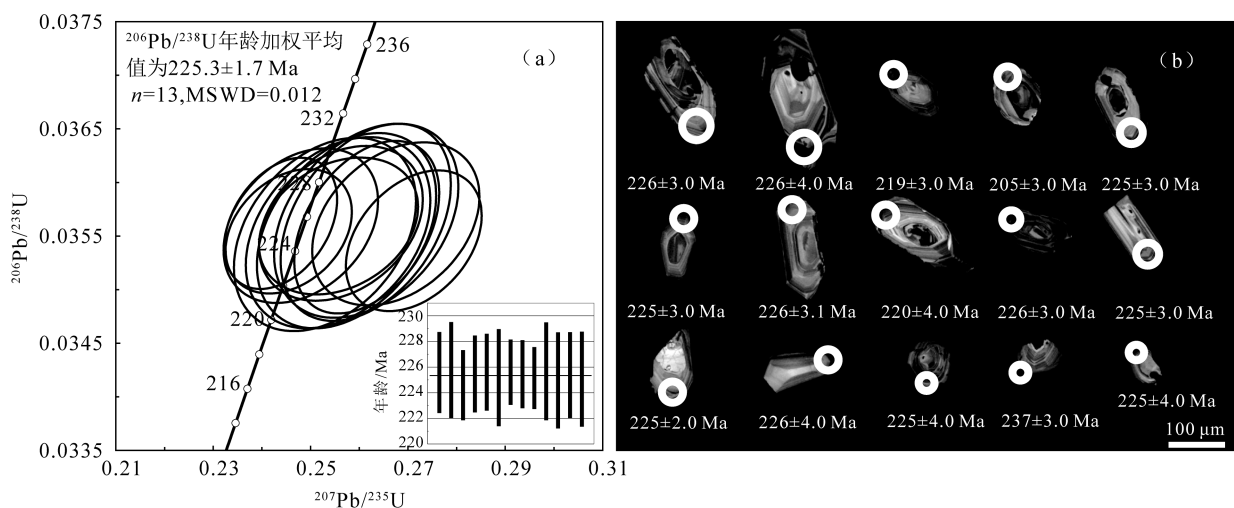


图3 硝塘花岗岩锆石 U-Pb 谐和图(a)及锆石阴极发光(CL)图像(b)

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia plots (a) and CL images of zircons (b) from Xiaotang granite

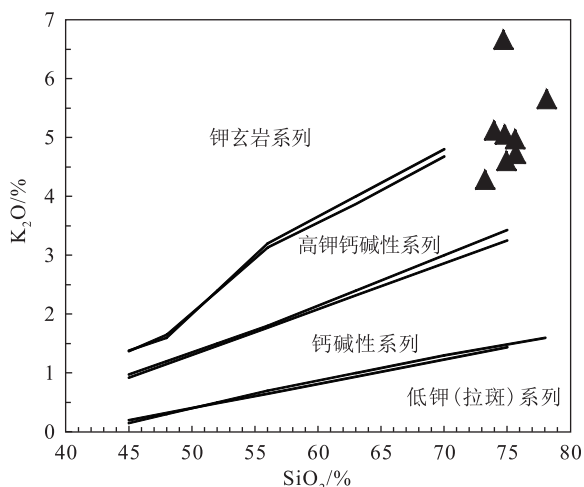


图4 硝塘花岗岩钾质分类图解

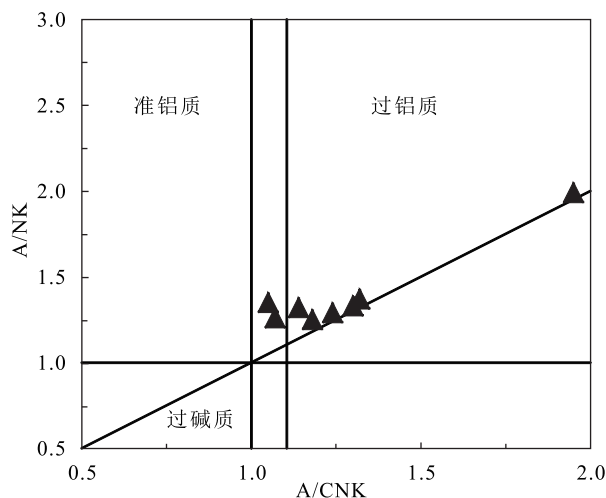
Fig. 4 Diagram of SiO_2 - K_2O for Xiaotang granite

图5 硝塘花岗岩铝饱和指数分类图解

Fig. 5 Diagram of A/CNK - A/NK for Xiaotang granite

落入过铝质-强过铝质区域。因此,硝塘花岗岩属于高钾钙碱性过铝-强过铝质花岗岩。根据主量元素化学成分计算的标准矿物进行岩石分类,在 QAP 图解(图 6)上,样品点主体落入二长花岗岩区,少部分落入英云闪长岩区,与岩相学研究结果一致,进一步说明硝塘岩体的主体岩性是二长花岗岩。

硝塘花岗岩稀土元素总量为 $79.94 \times 10^{-6} \sim 331.89 \times 10^{-6}$, 平均为 150.81×10^{-6} , 轻、重稀土元素(LREE 和 HREE)相对于球粒陨石富集 10 倍以上,其比值(LREE/HREE)为 6.22~17.08,平均值为 10.11,具明

显的轻稀土元素富集,重稀土元素亏损的特征。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 6.06~21.01,平均值为 10.87, δCe 为 1.00~1.11,平均值为 1.02, δEu 为 0.20~0.38,平均值为 0.28, 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(图 7-a)显示了明显的负 Eu 异常。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 7-b)上,硝塘花岗岩显示强烈的正 Pb 异常, P、Ti 强烈负异常,表现出明显的壳源花岗岩特征。K、Rb、Ba、Th 呈明显富集的大隆起形式,同时 Ce、Sm 选择性富集, Nb、Hf、Zr 等元素明显亏损,与板内花岗岩、

表 2 硝塘花岗岩的主量、微量和稀土元素含量

Table 2 Contents of major, trace and rare earth elements of Xiaotang granite

样号	LC-093	LC-101	LC-107	LC-108	LC-140	LC-141	LC-142	LC-143
SiO ₂	73.96	73.24	75.68	74.94	74.69	75.62	74.8	78.13
TiO ₂	0.25	0.196	0.113	0.14	0.251	0.141	0.14	0.136
Al ₂ O ₃	13.28	13.53	12.89	13.16	14.6	12.89	13.28	11.9
Fe ₂ O ₃	0.458	0.116	0.091	0.44	0.4	0.035	0.298	0.324
FeO	1.54	1.62	0.981	0.844	0.344	0.981	0.926	0.145
MnO	0.037	0.064	0.043	0.034	0.004	0.017	0.022	0.003
MgO	0.808	0.767	0.424	0.472	0.542	0.517	0.679	0.303
CaO	0.196	1.56	0.979	0.864	0.085	0.33	0.224	0.126
Na ₂ O	2.52	3.28	3.11	3.05	0.086	3	2.94	1.71
K ₂ O	5.12	4.28	4.72	4.6	6.66	4.97	5.05	5.65
P ₂ O ₅	0.064	0.072	0.055	0.062	0.026	0.044	0.036	0.029
烧失量	1.356	0.696	0.583	0.972	1.374	1.008	1.338	1.11
总量	99.659	99.487	99.749	99.642	99.127	99.624	99.799	99.631
Na ₂ O+K ₂ O	7.64	7.56	7.83	7.65	6.75	7.97	7.99	7.36
K ₂ O/Na ₂ O	2.03	1.30	1.52	1.51	77.44	1.66	1.72	3.30
A/CNK	1.32	1.05	1.07	1.14	1.95	1.18	1.24	1.30
Sr	57.60	68.4	37.6	39.9	15.2	38.3	41.0	27.8
V	38.8	35.2	18.8	25.7	36.3	26.4	30.4	25.3
Cr	26.9	26.4	11.2	13.7	12.8	12.8	17.1	11.3
Co	4.72	4.5	1.28	2.28	1.76	1.84	1.62	2.62
Ni	6.04	4.66	2.9	4.05	3.9	2.54	3.14	2.91
Sc	8.36	6.8	4.16	5.9	7.6	6.36	5.17	5.41
Ga	19.8	16.9	13.9	15	0.23	0.24	0.5	0.28
Rb	260	323	294	356	430	312	324	316
Y	24.6	31	15.6	20.6	12.9	13.9	18.1	22.9
Zr	123	84.8	64.7	71.2	128	83.7	84	80.8
Nb	17.6	15.2	10.5	10.5	14.8	13.2	14.8	12.4
Cs	11.6	21	19.7	30	9.3	10.6	13.7	7.35
Pb	67.4	47.4	45.8	49.2	15.9	43.4	37.4	19.0
Ba	476	279	180	282	242	182	214	316
Th	26.4	21.4	16.1	17.3	27	23.1	21.8	22.8
U	7.83	6.18	23.7	20.8	3.8	20.1	19.7	12.0
La	34.6	26.8	16.2	20.4	37.2	22.2	20.7	72.8
Ce	71.3	55.4	33.5	44.2	77.8	46.8	44.5	157
Pr	8.08	6.5	3.77	5.2	9.06	5.62	5.58	14.9
Nd	28.3	23	14	18.2	31.5	20.2	20.4	55.8
Sm	5.58	5.17	2.96	4.1	5.61	4.3	4.78	10.2
Eu	0.52	0.5	0.31	0.48	0.4	0.3	0.34	0.6
Gd	4.68	4.68	2.53	3.55	4.02	3.28	3.67	7.61
Tb	0.75	0.9	0.45	0.66	0.47	0.5	0.64	1.03
Dy	3.44	5.23	2.43	3.72	1.94	2.42	3.32	4.77
Ho	0.64	0.99	0.45	0.7	0.33	0.41	0.61	0.85
Er	1.86	2.92	1.3	2.02	1.04	1.23	1.81	2.51
Tm	0.3	0.49	0.21	0.36	0.17	0.21	0.32	0.41
Yb	2.04	3.17	1.6	2.3	1.27	1.58	2.32	2.97
Lu	0.34	0.5	0.23	0.34	0.22	0.25	0.39	0.44
Nb/Ta	7.27	4.32	4.17	3.70	4.61	3.85	3.49	5.85
Zr/Hf	28.74	23.69	24.69	23.12	25.05	26.57	21.48	25.09
Ga * 10 ⁴ /Al	2.72	2.29	2.00	2.10	2.39	2.35	2.40	2.32
ΣREE	162.43	136.25	79.94	106.23	171.03	109.30	109.38	331.89
LREE/HREE	3.84	2.35	2.85	2.70	7.23	4.18	3.09	7.16
δEu	0.30	0.30	0.34	0.38	0.25	0.23	0.24	0.20

注: A/CNK = Al₂O₃ / (CaO + Na₂O + K₂O) 摩尔比^[28]; 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶; 测试单位为澳实分析检测(广州)公司

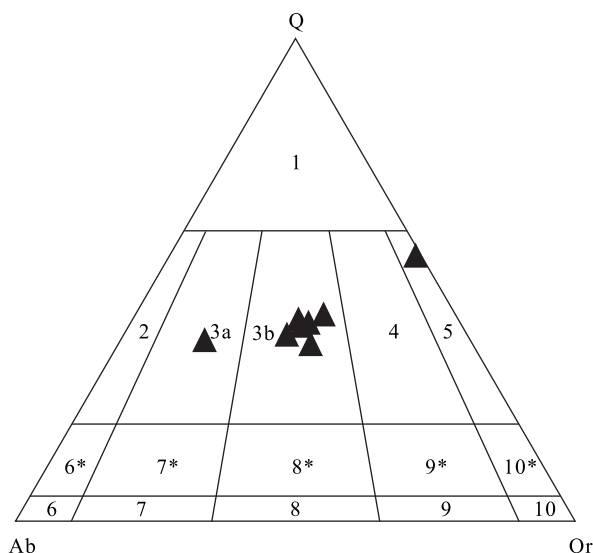


图6 硝塘花岗岩标准矿物分类图解

Fig. 6 QAP classification diagram for Xiaotang granite

1—富石英花岗岩;2—碱长花岗岩;3a—花岗岩;3b—花岗岩(二长花岗岩);4—花岗闪长岩;5—英云闪长岩、斜长花岗岩;6*—碱长石英正长岩;7*—石英正长岩;8*—石英二长岩;9*—石英二长闪长岩;10*—石英闪长岩、石英辉长岩、石英斜长岩;6—碱长正长岩;7—正长岩;8—二长岩;9—二长闪长岩、二长辉岩;10—闪长岩、辉长岩、斜长岩

火山弧花岗岩均有相似之处。曲线形态相似,暗示岩石具有相似的源区和成岩过程。8个样品中7个样品的 $Ga \times 10^4 / Al$ 值小于 2.5,只有样品 LC-093 的值大于 2.5,不具有统计学意义,故不属于 A 型花岗岩特征(A 型花岗岩大于 2.75)。结合主量、微量元素特征,硝塘花岗岩应该属于过铝—强过铝 S 型花岗岩。上述分析结果与花岗岩的成因分类图解完全一致(图 8)。

5 讨论

5.1 源岩分析及成因类型

据前述,硝塘花岗岩的 U 含量为 $6.18 \times 10^{-6} \sim 23.7 \times 10^{-6}$,大于 2×10^{-6} ,Th 含量为 $16.1 \times 10^{-6} \sim 26.4 \times 10^{-6}$,大于 10×10^{-6} ,Pb 含量为 $15.9 \times 10^{-6} \sim 67.4 \times 10^{-6}$,平均值为 40.69×10^{-6} ,大于 20×10^{-6} 。同时, Sr/Ba 值也可以用来判别物质的来源,呈明显 Sr、Ba 负异常,表明花岗岩岩浆部分熔融或结晶分异的过程中具有斜长石的分离。Rb/Sr 值为 4.51~28.29,远大于 1, Sr/Ba 值为 0.06~0.25,均小于 0.5,显示了 S 型花岗岩的特征^[30]。临沧花岗岩的 Sr/Ba 值为 0.06~0.25,小于 0.5。典型的藏南 I 型花岗岩相对富集 Sr, Sr/Ba 值一般大于 0.5, S 型花岗岩相对富集 Ba, Sr/Ba 值一般小于 0.5^[30]。在壳幔及陆壳演化过程中, Rb/Sr 值可以记录源区演化性质,通常以 0.9 作为分界(大于 0.9 为 S 型花岗岩,小于 0.9 为 I 型花岗岩)^[31]。硝塘花岗岩的 Rb/Sr 值大于 0.9,并结合 C/MF-A/MF 图解(图 9)和 $Al_2O_3/TiO_2 - CaO/Na_2O$ 图解(图 10),可以推断硝塘花岗岩来源于成熟的中下部地壳。

由于地壳的形成使原始地幔比值稳定的 Nb/Ta (17.8) 发生分馏,导致地壳平均的 Nb/Ta 值为 11~12^[32]。硝塘花岗岩的 Nb/Ta 值为 3.49~7.27,均小于原始地幔的 Nb/Ta 值,指示硝塘花岗岩可能来自地壳的部分熔融。同时,在 C/MF-A/MF 图解(图 9)中,也可以清晰地得出硝塘花岗岩来自变质泥岩、变质砂岩的部分熔融的结论。

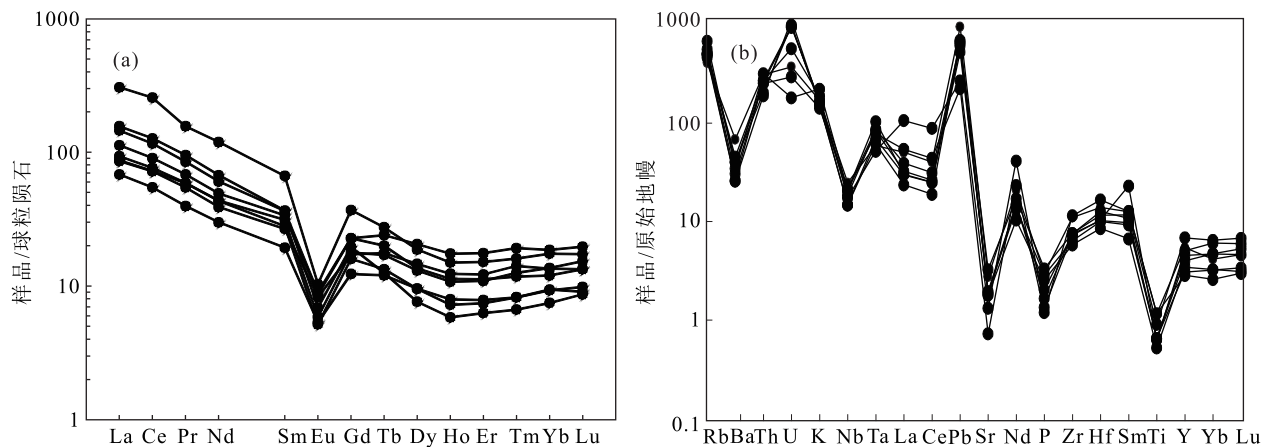
图7 稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和硝塘花岗岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)^[29]

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns(a) and diagram of primitive mantle-normalized trace elements(b) for Xiaotang granite

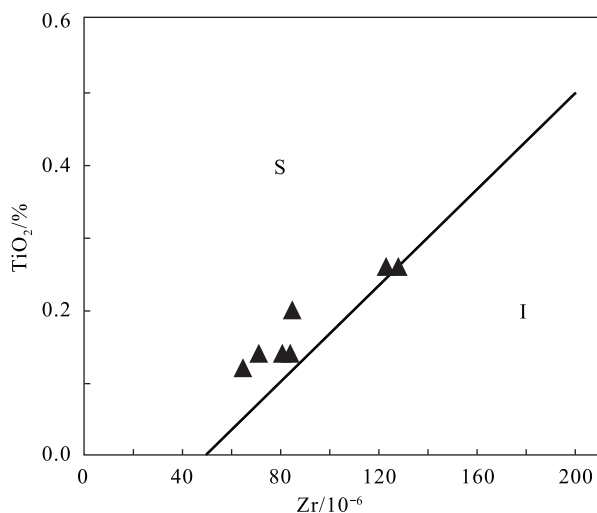


图 8 硝塘花岗岩成因类型图解

Fig. 8 Diagram of genesis types for Xiaotang granite

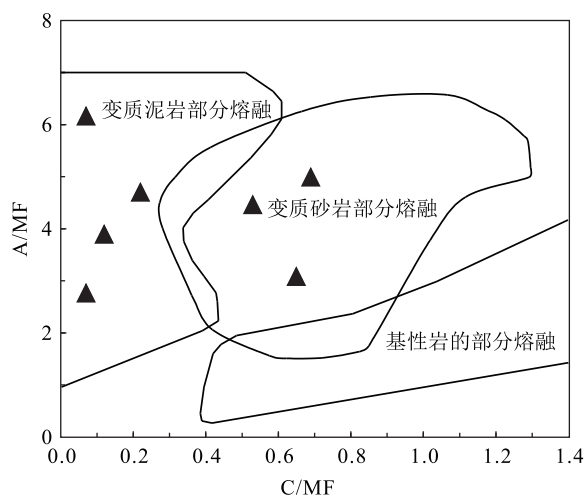
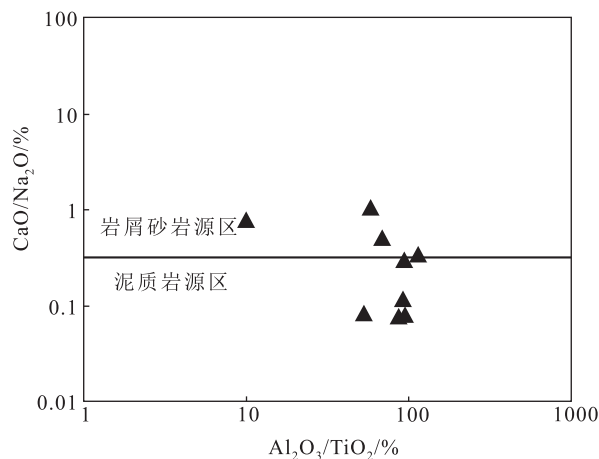


图 9 硝塘花岗岩 C/MF-A/MF 图解

Fig. 9 C/MF-A/MF diagram for Xiaotang granite

$\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值是判断花岗岩源区成分的重要指标之一^[33]。当 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值小于 0.5 时,指示源区可能为泥质岩;当 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值介于 0.3~1.5 之间时,指示源区可能为变杂砂岩或火成岩;而更高的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值(可达 10)指示可能来源于角闪岩部分熔融而成的偏基性熔体(如花岗闪长岩、石英闪长岩等)^[34]。推断 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值大于 0.3 的花岗岩类可能来源于变质杂砂岩,而 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值小于 0.3 的花岗岩类源区物质可能为变质泥岩。由此表明,源区岩浆性质为变质泥岩和变质砂岩部分熔融

图 10 硝塘花岗岩 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ - $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 图解Fig. 10 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ - $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ diagram for Xiaotang granite

后混染。通过硝塘花岗岩的主量元素标准矿物计算,得出标准矿物中刚玉标准分子含量达到 0.97%~7.46%,过铝质花岗岩中 Rb、Sr、Ba 的变化与其原岩中起作用的泥质岩或岩屑砂岩的源区一致,在此基础上做出的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ - $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 图解(图 10)也验证了这一结论。

从铝饱和指数、标准刚玉分子含量、多种元素比值图解综合分析认为,硝塘花岗岩的物质来源为中下地壳贫粘土的变质砂岩和变质泥岩,属于 S 型花岗岩。

5.2 花岗岩产出的构造背景

起源于中下地壳的花岗岩岩浆演化过程,大体可以分为部分熔融、岩浆分离、上升、侵位 4 个阶段,每个阶段中,地壳岩石的构造变形都起着不可或缺的作用^[35]。侵位的模式主要包括底辟、气球膨胀、剪切拉张及岩墙扩展、顶蚀、带熔,但地球物理资料显示,大多数花岗岩具有席状、盘状等三维空间特征,剪切拉张和岩墙扩展是最主要的侵位模式^[35-37]。硝塘花岗岩沿着 NNW 向弧形断裂系平行带状产出的地质特征,岩浆侵入的空间是由横向和垂直位移的组合以中等应变速率形成的,表明花岗质岩浆在剪切拉张和岩墙扩展 2 种侵位方式联合作用下最终就位。

从 Pearce 图解(图 11)看,硝塘花岗岩落入同碰撞花岗岩区域,表明硝塘花岗岩具有同碰撞花岗岩特征。硝塘花岗岩作为临沧岩体的一部分,是古特提斯演化过程中的重要产物。从主量、微量元素地球化学特征可知,硝塘花岗岩属于过铝-强过铝质 S

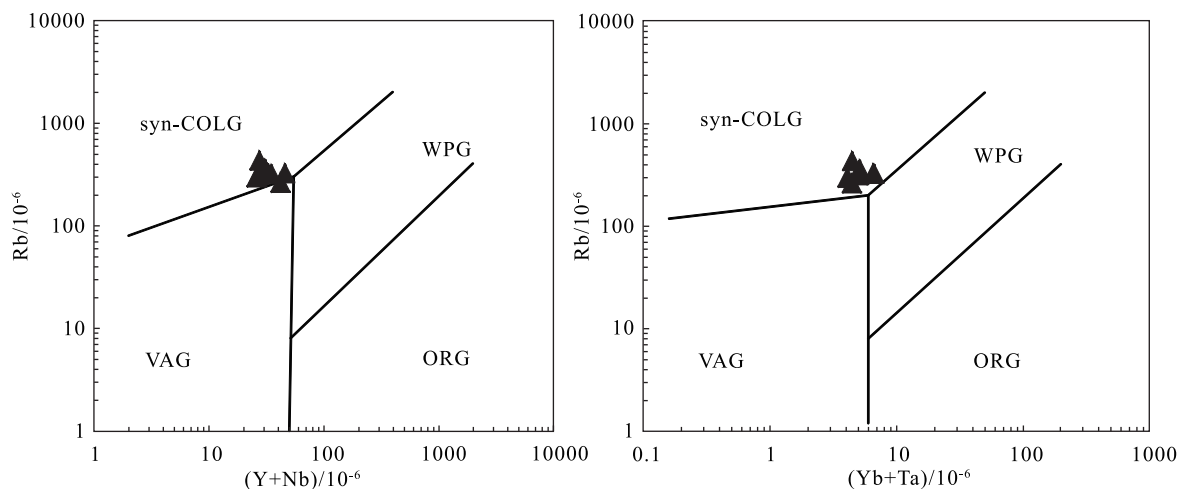
图 11 硝塘花岗岩 Pearce 图解^[38]

Fig. 11 Pearce diagrams for Xiaotang granite

WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; syn-COLG—同碰撞花岗岩

型花岗岩,应属于同碰撞-后碰撞 S 型花岗岩。准确意义上的同碰撞是不存在的,与大型构造热时间结束相匹配的花岗岩总是发生在碰撞后期或碰撞后,故硝塘花岗岩的形成是发生在碰撞后期。硝塘花岗岩的形成环境是岛弧-同碰撞(图 11),主体为同碰撞,与昌宁-孟连古特提斯的封闭有关。

结合年龄、区域地质背景认为,作为临沧岩体组成部分的硝塘岩体是对昌宁-孟连古特提斯封闭过程的响应。临沧岩体的岛弧属性,是对特提斯板块俯冲过程的响应,在吴彦旺^[39]对于蛇绿岩的研究中,也推断出早二叠世洋盆已经进入了衰退期,南澜沧江洋盆在晚石炭世—二叠纪洋中脊扩张速度减慢,澜沧江洋盆在扩张的同时,在昌宁-孟连洋盆东部开始发生俯冲消减,于南澜沧江带形成了二叠纪俯冲同步型低钾-中钾钙碱性中酸性火山弧^[6, 40-41],并形成临沧花岗岩基的早期部分,故二叠纪具岛弧特征花岗闪长岩岩基^[36]。而同碰撞属性是对古特提斯封闭的响应,预示着保山地块与思茅地块拼合的完成。

5.3 花岗岩的地球动力学背景

综合前人对昌宁-孟连特提斯的研究,总体演化过程可以归纳为:区域拉张与伸展作用,保山地块与兰坪-思茅地块之间随着扩张作用的发展,由中泥盆世的初始洋盆发展形成晚泥盆世—晚石炭世宽阔成熟的昌宁-孟连古特提斯洋^[42]。后在晚二叠世—中三叠世发生了昌宁-孟连古特提斯洋消

亡、闭合,保山地块与兰坪-思茅地块发生了陆-陆对接碰撞。早三叠世陆-陆(弧)主碰撞期的碰撞作用导致南澜沧江带区域地壳增厚,当其他条件合适时,地壳岩石可以发生部分熔融。由于增温效应的滞后性^[43],该阶段没有达到产生同碰撞花岗岩岩浆的条件,南澜沧江带无早三叠世同碰撞型岩浆记录。陆-陆碰撞导致地幔上涌,陆壳隆升,该带普遍缺失早三叠世地层的沉积^[39]。此阶段陆块碰撞挤压,迫使兰坪-思茅地块向南滑移,位于地块两侧的澜沧江断裂带和金沙江-红河结合带发生逃逸性张裂,形成新的裂陷,堆积了巨厚的、半深海复理石建造及陆内裂谷火山沉积建造^[44]。朱勤文等^[6]结合临沧花岗岩的定年结果及与之共生的火山岩,认为二叠纪花岗岩属于俯冲同步型,在早三叠世板块碰撞阶段则几乎没有花岗岩的形成。

从澜沧、西盟、孟连地区大面积 1:5 万详细区域地质调查研究成果看,从古生代沉积环境演变、早石炭世 MORB 型基性火山作用到晚三叠世同碰撞花岗岩侵入,以及碰撞造山后的盆地堆积,构成古特提斯演化过程的完整响应,过程可以简化为以下几个阶段(图 12)。

(1) 泥盆纪古特提斯雏形阶段

泥盆纪地层包括温泉组(Dw)、曼信组(Dm)。下部温泉组是一套以具深水浊积岩特征的变质岩屑石英杂砂岩、变质长石英杂砂岩、变质不等粒岩屑砂岩为主,夹粉砂质绢云母板岩、绢云母板岩,

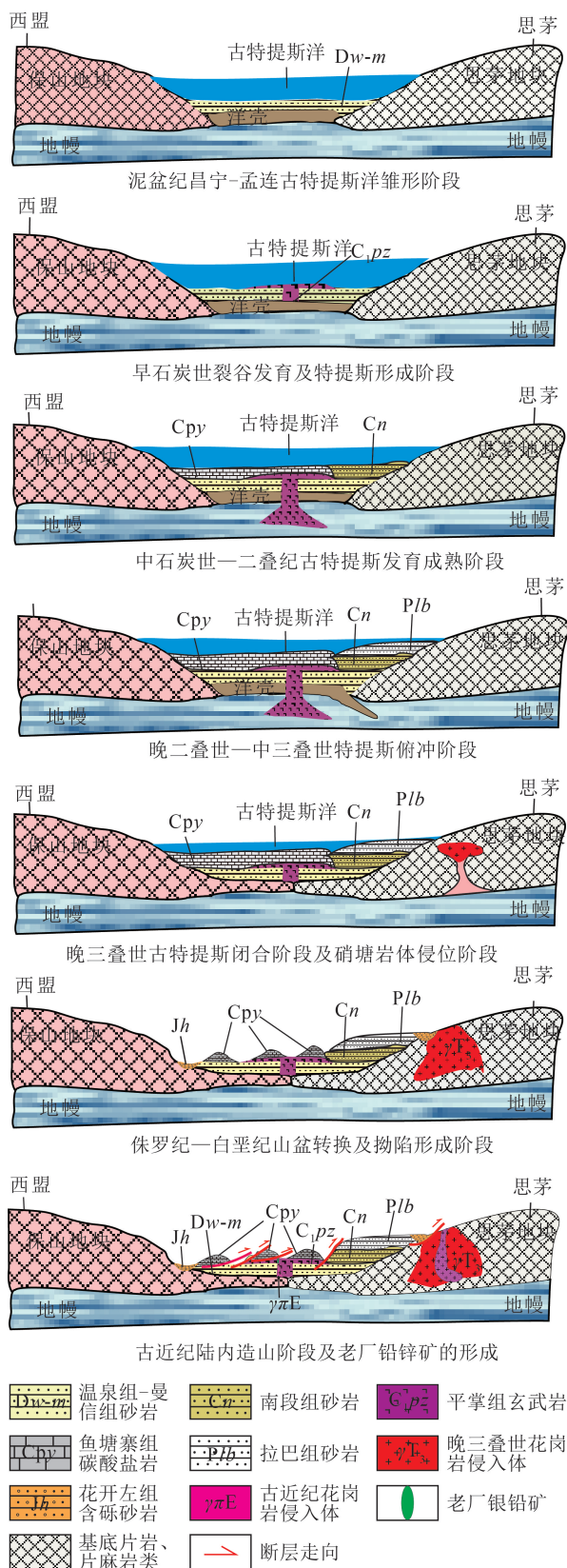


图 12 澜沧—西盟地区古特提斯演化模式图

Fig. 12 The model for the tectonic evolution of the Lancang-Ximeng area

以及少量灰黑色硅质岩的地层。上部曼信组为灰色—深灰色、浅灰绿色、黑色薄层状硅质岩夹或间互同色硅质粉砂岩、硅质板岩、浅灰黄色绢云母板岩、变质中细粒石英杂砂岩。岩层中普遍含牙形刺,硅质岩产放射虫,表明沉积环境已经向深水过渡,局部出现火山凝灰岩夹层,说明泥盆纪末期,古特提斯初期的裂谷雏形已经形成。

(2) 早石炭世裂谷发育及特提斯形成阶段

早石炭世地层为平掌组火山岩 (C_1pz), 喷发年龄为 323 Ma, 包含的玄武岩具有 MORB 型火山岩的地球化学特征, 表明此时古特提斯已经初具规模。

(3) 中石炭世—二叠纪古特提斯发育成熟阶段

中石炭世—二叠纪地层包括 2 套同时异相地层, 靠近裂谷中心火山岩带中西部的鱼塘寨组、大明山组, 是一套富含化石的浅海台地相稳定碳酸盐岩; 靠近盆地东侧斜坡带的南段组—拉巴组, 是一套巨厚的复理石建造, 南段组是一套碎屑岩, 拉巴组是一套碎屑岩夹薄层硅质岩, 表明海水逐渐变深。

(4) 晚二叠世—中三叠世特提斯俯冲阶段

二叠纪末期, 区域性伸展作用开始向区域性挤压转化, 昌宁—孟连特提斯洋壳开始俯冲, 古特提斯洋逐步开始封闭, 区域隆升, 三叠纪沉积地层缺失。

(5) 晚三叠世特提斯闭合及硝塘岩体侵位阶段

晚三叠世, 随着洋盆俯冲消减的结束, 两侧的陆缘斜坡发生碰撞, 地壳大规模熔融作用形成硝塘 227~225 Ma 的 S 型同碰撞花岗岩, 由于真正意义上的同碰撞花岗岩是不存在的, 所以硝塘花岗岩应该属于同碰撞后期或后碰撞早期酸性花岗岩的响应, 是特提斯封闭的上限, 应该说特提斯封闭应该不晚于 227~225 Ma, 即昌宁—孟连古特提斯封闭应该是晚三叠世之前完成的。

(6) 侏罗纪—白垩纪盆山转换及拗陷成盆阶段

随着大规模的碰撞造山活动的结束, 经区域上早侏罗世短暂的盆山转换, 从中侏罗世开始研究区进入陆内拗陷盆地沉积阶段。区内自西向东发育 3 个规模大小不等、岩性基本一致的红色拗陷盆地, 西部的西盟拗陷盆地连续沉积了花开左组、坝注路组、景新组等红色磨拉石建造, 东部的富本与多依林拗陷盆地沉积了花开左组的红色磨拉石建造。

(7) 古近纪陆内造山阶段

古近纪, 测区处于陆内造山阶段。该阶段的构

造环境主要表现为挤压—平移走滑调整。研究区无该时期的沉积建造发育,但受到新特提斯活动的影响,硝塘花岗岩存在古近纪花岗岩侵位,在硝塘岩体中呈小岩株状分布,体现源区岩浆再活动补充特点。在具有特提斯消亡痕迹的老厂火山岩带,也有 45 Ma 的花岗斑岩侵位,并形成老厂超大型岩浆热液型银铅矿。

由此可见,澜沧、西盟、孟连地区的地质演化过程是整个昌宁—孟连古特提斯演化过程的缩影。

6 结 论

(1)通过硝塘花岗岩的岩相学、年代学及地球化学特征,并与临沧岩体的其他部分类比发现,硝塘花岗岩是一套二长花岗岩,具有高钾钙碱性特征,属于过铝—强过铝 S 型花岗岩,是中下地壳贫粘土的变质砂岩和泥质岩部分熔融的产物。

(2)锆石 U—Pb 定年结果表明,硝塘花岗岩的结晶年龄为 227 Ma,属于晚三叠世。

(3)地球化学特征显示,硝塘花岗岩属于同碰撞花岗岩,结合老厂—曼信 MORB 型火山岩、泥盆系、石炭系、二叠系沉积相演化过程,推断昌宁—孟连古特提斯碰撞造山消亡阶段(碰撞阶段)不晚于晚三叠世之前(中—晚三叠世阶段)。

致谢:感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见,本文在撰写过程中得到中国地质科学院地质研究所张进研究员及中国地质调查局沈阳地质调查中心钱程高级工程师的帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 王舫,刘福来,刘平华,等.澜沧江南段临沧花岗岩的锆石 U—Pb 年龄及构造意义[J].岩石学报,2014,30(10): 3034—3050.
- [2] 彭头平.澜沧江南带三叠纪碰撞后岩浆作用、岩石成因及其构造意义[D].中国科学院研究生院(广州地球化学研究所)博士学位论文,2006.
- [3] 廖世勇,尹福光,王冬兵,等.滇西“三江”地区临沧花岗岩基中三叠世碱长花岗岩的发现及其意义[J].岩石矿物学杂志,2014,33(1): 1—12.
- [4] 刘昌实,朱金初,徐夕生,等.滇西临沧复式岩基特征研究[J].云南地质,1989,(Z1): 189—204.
- [5] 李兴林.临沧复式花岗岩基的基本特征及形成构造环境的研究[J].云南地质,1996,(1): 1—18.
- [6] 朱勤文,莫宣学,张双全.南澜沧江古特提斯演化的岩浆岩证据[J].特提斯地质,1999,(23): 16—30.
- [7] 范蔚茗,彭头平,王岳军.滇西古特提斯俯冲—碰撞过程的岩浆作用记录[J].地学前缘,2009,16(6): 291—302.
- [8] 刘德利,刘继顺,张彩华,等.滇西南澜沧江结合带北段云县花岗岩的地质特征及形成环境[J].岩石矿物学杂志,2008,(1): 23—31.
- [9] 孔会磊,董国臣,莫宣学,等.滇西三江地区临沧花岗岩的岩石成因: 地球化学、锆石 U—Pb 年代学及 Hf 同位素约束[J].岩石学报,2012,28(5): 1438—1452.
- [10] 黄汲清,陈炳蔚.中国及邻区特提斯海的演化[M].北京:地质出版社,1987: 1—187.
- [11] 赖绍聪,秦江锋,李学军,等.昌宁—孟连缝合带乌木龙—铜厂街洋岛型火山岩地球化学特征及其大地构造意义[J].地学前缘,2010,17(3): 44—52.
- [12] 王义昭.滇西昌宁—孟连带南部孟连—曼信地区晚古生代地层若干问题[J].地质论评,2005,(1): 1—9.
- [13] 刘本培,冯庆来,Chonglakmani C,等.滇西古特提斯多岛洋的结构及其南北延伸[J].地学前缘,2002,(3): 161—171.
- [14] 张凡,冯庆来,段向东,等.滇西南昌宁—孟连构造带西带研究初探——以耿马弄巴剖面为例[J].地质科技情报,2006,(3): 13—20.
- [15] Metcalfe I. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 66: 1—13.
- [16] Nianqiao F, Benpei L, Qinglai F, et al. Late Palaeozoic and Triassic deep-water deposits and tectonic evolution of the Palaeotethys in the Changning—Menglian and Lancangjiang belts, southwestern Yunnan [J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1994, 9(4): 363—374.
- [17] Wu H, Boulter C A, Ke B, et al. The Changning—Menglian suture zone: a segment of the major Cathaysian—Gondwana divide in Southeast Asia [J]. Tectonophysics, 1995, 242(3/4): 267—280.
- [18] 钟大赉,等.滇川西部古特提斯造山带[M].北京:科学出版社,1998: 1—231.
- [19] 彭头平,王岳军,范蔚茗,等.澜沧江南段早中生代酸性火成岩 SHRIMP 锆石 U—PB 定年及构造意义[J].中国科学(D 辑),2006,(2): 123—132.
- [20] Zhang R Y, Cong B L, Maruyama S, et al. Metamorphism and tectonic evolution of the Lancang paired metamorphic belts, south-western China. [J]. Journal of Metamorphic Geology, 1993, 11(4): 605—619.
- [21] 刘俊来,宋志杰,曹淑云,等.印度—欧亚侧向碰撞带构造—岩浆演化的动力学背景与过程——以藏东三江地区构造演化为例[J].岩石学报,2006,(4): 775—786.
- [22] Taylor S R, McLennan S M. The Geochemical Evolution of the Continental—Crust [J]. Reviews of Geophysics, 1995, 33(2): 241—265.
- [23] 卫管一,冯国荣,罗再文,等.滇西澜沧群、崇山群地层层序及其火山作用和变质作用[J].成都地质学院学报,1984,(2): 12—20.
- [24] 李朋武,高锐,崔军文,等.西藏和云南三江地区特提斯洋盆演化历史的古地磁分析[J].地球学报,2005,(5): 3—20.
- [25] 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 from Mantle Xenoliths [J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537—571.
- [26] Liu Y, Hu Z, 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, 2009, (1/2): 34—43.
- [27] Ludwig K R. Isoplot 3.75: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. Berkeley CA: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2012, 5: 1—75.

- [28] Thornton C, Tuttle O. Chemistry of igneous rocks, part 1: Differentiation index. *America* [J]. *Journal of Science*, 1960, 280: 664-684.
- [29] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C] // Saunders A D, Norry M J. *Magmaism in Oceanic Basins*. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [30] 刘振声, 王洁民. 川藏花岗岩的稀土元素地球化学特征 [C] // 青藏高原地质文集. 成都: 四川科技出版社, 1990: 99-117.
- [31] 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 等. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比 [J]. *岩石学报*, 1993, (1): 44-54.
- [32] 陈小明, 王汝成, 刘昌实, 等. 广东从化佛冈 (主体) 黑云母花岗岩定年和成因 [J]. *高校地质学报*, 2002, (3): 293-307.
- [33] Sylvester P J. Post - collisional strongly peraluminous granites [J]. *Lithosphere*, 1998, (1/4): 29-44.
- [34] Jung S, Pfänder J A. Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids: constraints from $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ and accessory mineral saturation thermometry [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2007, 19(6): 859-870.
- [35] Petford N, Cruden A R, Mccaffrey K J W, et al. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust [J]. *Nature*, 2000, 408(6813): 669-673.
- [36] Clemens J D. S-type granitic magmas - petrogenetic issues, models and evidence (Article) [J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, (1/2): 1-18.
- [37] 杨启军, 徐义刚, 黄小龙, 等. 滇西腾冲-梁河地区花岗岩的年代学、地球化学及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 2009, 25(5): 1092-1104.
- [38] 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, (4): 956-983.
- [39] 吴彦旺. 龙木错-双湖-澜沧江洋历史记录 [D]. 吉林大学博士学位论文, 2013.
- [40] 沈上越, 冯庆来, 刘本培, 等. 昌宁-孟连带洋脊、洋岛型火山岩研究 [J]. *地质科技情报*, 2002, (3): 13-17.
- [41] 朱勤文, 张双全, 谭劲. 确定南澜沧江缝合带的火山岩地球化学证据 [J]. *岩石矿物学杂志*, 1998, (4): 3-5.
- [42] 吴随录. 三江地区南澜沧江临沧花岗岩的特点、时代及区域构造意义 [D]. 中国地质大学 (北京) 硕士学位论文, 2010.
- [43] England P C, Thompson A B. Pressure-Temperature-Time Paths of Regional Metamorphism I. Heat Transfer during the Evolution of Regions of Thickened Continental Crust [J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 894-928.
- [44] 帅开业. 兰坪-思茅中、新生代盆地成因新解 [J]. *地学前缘*, 2000, 7(4): 380.