

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.102>



滇西“三江”地区临沧花岗岩基早—中奥陶世 花岗质片麻岩的发现及其意义

彭智敏¹, 张 辑^{2*}, 关俊雷¹, 张 璇¹, 韩文文², 付于真³

1.中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081

2.核工业二八〇研究所, 四川广汉 618300

3.成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059

摘要:前人对“三江”地区临沧花岗岩基早古生代的岩浆事件研究极少, 在双江地区临沧花岗岩基中首次识别出早古生代花岗质片麻岩。采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、微区原位 Hf 同位素分析, 结合全岩地球化学特征, 对 2 件花岗质片麻岩样品进行了系统的研究。获得锆石 U-Pb 年龄分别为 476.9 ± 1.9 Ma、 465.7 ± 1.9 Ma, 表明这些花岗质片麻岩形成于早—中奥陶世。花岗质片麻岩 SiO_2 含量为 70.67%~74.03%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值皆大于 1, 为 1.04~1.55, 属过铝质 S 型花岗岩。岩石微量元素特征显示其富集大离子亲石元素 Rb、Th、U, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 和 Zr 等, 轻重稀土分异明显, 轻稀土相对富集、重稀土亏损, 具有明显的负 Eu 异常。2 件样品锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为负值 ($-7.2 \sim -0.7$, 均值 -3.0), Hf 同位素地壳模式年龄 (t_{DM}^{C}) 均值基本一致 (1639 Ma, 1630 Ma), 说明花岗质片麻岩可能来源于古老地壳物质的部分熔融。综合分析表明, 花岗质片麻岩是由原特提斯洋向东俯冲消减而引起的古老地壳物质部分熔融形成, 是原特提斯俯冲消减的岩浆事件响应; 说明在早奥陶世昌宁—孟连洋就存在俯冲消减, 昌宁—孟连特提斯演化历史最早可以追溯到早奥陶世。

关键词:花岗质片麻岩; 锆石 U-Pb 定年; 原—古特提斯洋; 昌宁—孟连结合带; 滇西; 三江; 地球化学; 地质年代学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)08-2571-15

收稿日期: 2018-05-08

The Discovery of Early-Middle Ordovician Granitic Gneiss from the Giant Lincang Batholith in Sanjiang Area of Western Yunnan and Its Geological Implications

Peng Zhimin¹, Zhang Ji^{2*}, Guan Junlei¹, Zhang Zhang¹, Han Wenwen², Fu Yuzhen³

1.Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China

2.Institute No.280 of CNNC, Guanghan 618300, China

3.College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: There are little research on the Early Paleozoic magma events of the giant Lingcang batholith in Sangjiang area. Early Paleozoic granitic gneiss was recognized for the first time from the Lincang batholith in Shuangjiang area of western Yunnan. LA-ICP-MS U-Pb dating and Hf isotopic analysis of zircons, combined with geochemical characteristics of two granitic gneiss samples are applied in this paper. The zircon U-Pb ages of 476.9 ± 1.9 Ma and 465.7 ± 1.9 Ma are obtained from two samples, which indicates that two granitic gneisses were formed in Middle-Late Ordovician. SiO_2 content of the granitic gneisses ranges from 70.67% to 74.03%. The $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio is greater than 1, ranging from 1.04 to 1.55, and belonging to peraluminous S-type granitoids. They also enriched in LILEs (Rb, Th and U), but strongly depleted in HFSEs (Nb, Ta, Ti and Zr), showing

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.41303043, 41273047); 中国地质调查局项目(No.DD20160016)。

作者简介:彭智敏(1978—),男,高级工程师,主要从事区域地质调查工作,ORCID:0000-0001-9287-7886. E-mail:pzm20022002@163.com

* 通讯作者:张辑,ORCID:0000-0002-8442-8359. E-mail:1047108631@qq.com

引用格式:彭智敏,张辑,关俊雷,等,2018.滇西“三江”地区临沧花岗岩基早—中奥陶世花岗质片麻岩的发现及其意义.地球科学,43(8):2571—2585.

strongly fractionated REE pattern, with apparently negative Eu anomalies. Their zircons have negative $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (-7.2 to -0.7 , average -3.0), and Hf isotope crust model ages (t_{DM}^{C}) are basically the same (average $1\ 639\ \text{Ma}$, $1\ 630\ \text{Ma}$). It is suggested that granitic gneiss may have originated from partial melting of ancient crustal materials. Based on the above analyses, granitic gneiss is formed by partial melting of ancient crustal materials that was caused by the eastward subduction of the Paleo-Tethys, and is the response of the magmatic events during subduction of the Paleo-Tethys. It shows that there was subduction in the Changning-Menglian ocean in the Early Ordovician, and the evolution history of the Tethys in the Changning-Menglian combination can be traced back to the Early Ordovician.

Key words: granitic gneiss; zircon U-Pb dating; Paleo-Tethys ocean; Changning-Menglian suture; western Yunnan; Sangjiang area; geochemistry; geochronology.

位于青藏高原东南缘的“三江”地区是研究原—古特提斯构造演化的窗口,一直以来都是国内外地质学家关注的热点地区。临沧花岗岩是区域上出露面积最大的复式岩基,也是研究原—古特提斯演化的重要组成部分。近年来,关于昌宁—孟连蛇绿混杂岩带的研究取得了较大进展,研究者们认为昌宁—孟连结合带是一个从早古生代发育一直延续到晚古生代的洋盆(王保弟等,2013;王冬兵等,2016;孙载波等,2017)。位于昌宁—孟连结合带以东的临沧花岗岩基记录了原—古特提斯俯冲增生—碰撞造山过程的岩浆演化历史(从柏林等,1993)。因此,临沧花岗岩基时代、成因及构造背景等也备受研究者的关注。已有的研究资料表明临沧花岗岩为多期次的大型复式花岗岩基,形成时代为晋宁期、加里东期、华力西—印支期、侏罗纪和晚白垩世及古近纪(刘昌实等,1989;张雯华等,1991;李兴林,1996;俞赛瀛等,2003;彭头平等,2006;刘德利等,2008;吴随录,2010;孔会磊等,2012;王海林等,2016)。早期受测试手段的局限性,其时代可信度较低。近年来,相继报道的锆石 U-Pb 高精度年代学数据表明临沧复式花岗岩基主体形成时代为中—晚三叠世,少量的早三叠世、早侏罗世、晚白垩世和古近纪岩体。

对于临沧花岗岩基的成因类型,有的研究者认为以 S 型花岗岩为主(刘德利等,2008;孔会磊等,2012);也有研究者认为以 S 型为主,且含有一定的 I 型花岗岩(陈吉琛等,1989;李兴林,1996)。对于其形成构造背景,主要集中在同碰撞(刘昌实等,1989;刘德利等,2008)、碰撞晚期—碰撞后(彭头平等,2006)、碰撞后(孔会磊等,2012)及岛弧型(陈吉琛,1989;张雯华等,1991;李兴林,1996)等不同的认识。

上述分析表明,前人对临沧花岗岩基形成时代、成因类型和构造背景等做了大量的研究工作,主要集中在古特提斯洋闭合后陆—陆或者陆—弧环境的讨论,对岩基早古生代的岩浆事件研究极少。本文首次报道了在云南双江地区识别出的早古生代花岗质

片麻岩,通过岩石学、地球化学、锆石年代学及 Hf 同位素研究,探讨了其岩浆岩区和岩石成因,结合区域已有的研究成果,为原—古特提斯洋向东俯冲增生造山过程岩浆事件响应提供了新的证据。

1 区域地质背景与岩石学特征

临沧花岗岩基位于昌宁—孟连结合带以东,主要与古生代澜沧岩群俯冲增生杂岩呈断层接触或者侵入接触,个别地方与中侏罗统呈侵入接触;南澜沧江结合带以西,其主要与古生代团梁子岩群增生杂岩断层接触、和三叠纪火山弧呈侵入接触。临沧花岗岩基北起昌宁,南至勐海以南,呈反“S”状南北向展布,南北长达 $370\ \text{km}$,东西宽为 $10\sim50\ \text{km}$,出露面积约 $1.1\times10^4\ \text{km}^2$ (图 1b),向南可延伸到马来西亚,向北延伸到双湖龙木错地区,构成一条巨型的构造岩浆岩带。在临沧花岗岩基内的湾河、清平地区出露规模不等的蛇绿混杂岩,局部出露早古生代增生杂岩,它们之间呈侵入/断层接触。岩基主体岩性为黑云二长花岗岩、花岗闪长岩、似斑状二长花岗岩、钾长花岗岩,少量的花岗质片麻岩、淡色花岗岩和英云闪长岩等,不同岩石类型之间呈侵入接触或渐变过渡的关系。

本次研究的花岗质片麻岩位于双江县以东的清平地区,呈条带状、团块状分布于中晚三叠世二长花岗岩中(图 1a),由于出露情况较差,未见其与围岩的接触关系。野外露头呈灰白色,似斑状结构,片麻状构造,韧性剪切变形使矿物定向明显(图 2a,2b)。主要矿物有石英($20\%\sim30\%$),呈他形粒状,细小的石英颗粒镶嵌于黑云母和长石中,形成嵌晶结构;斜长石($25\%\sim30\%$),半自形板柱状和他形粒状,部分表面发生绢云母化,绢云母呈细小鳞片状集合体;钾长石($25\%\sim35\%$),半自形—自形板柱状,多发生泥化;黑云母($10\%\sim15\%$),呈不规则的条带状、细片状,细片状以集合体为主,彼此大致平行,定向排列,

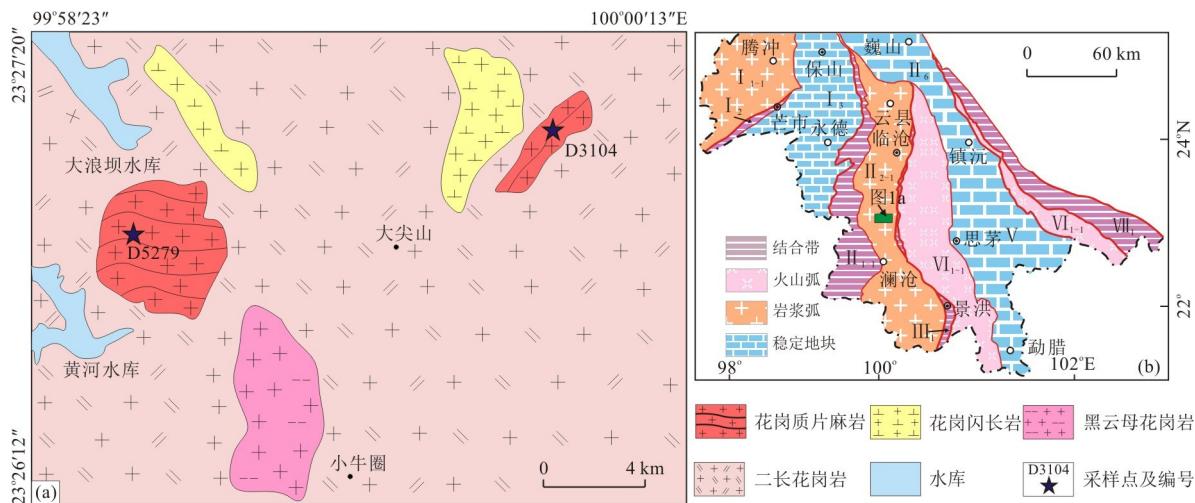


图1 云南双江县花岗质片麻岩地质简图

Fig.1 Geological sketch map for granitic gneiss from Shuangjiang area of western Yunnan

图b据王保弟等(2013)修改。I₁₋₁,腾冲—盈江岩浆弧; I₂,潞西—三台山结合带; I₃,保山—镇康地块; II₁₋₁,昌宁—孟连结合带; II₂₋₁,临沧—勐海岩浆弧; III₁,南澜沧江结合带; V,思茅地块; VI₁₋₁,盈江岩浆弧; VII₁,哀牢山结合带

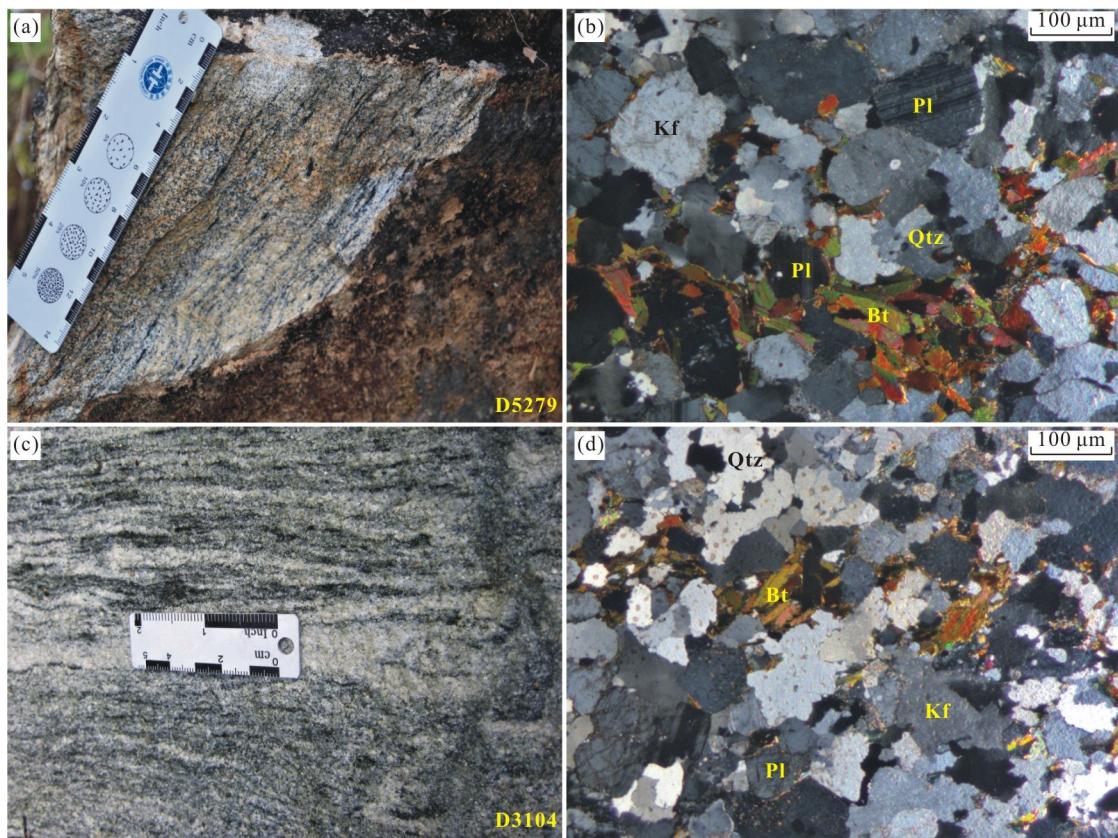


图2 野外露头照片(a,c)和显微照片(b,d)

Fig.2 Outcrop photograph (a,c) and microstructural photomicrographs (b,d) for granitic gneiss

部分黑云母绢云母化、绿泥石化。个别黑云母分布在长石、石英颗粒之间的孔隙中。副矿物磷灰石、锆石零星分布(图2c,2d)。

2 分析方法

锆石挑选在河北省廊坊区域地质调查研究院实验室完成,按常规方法分选后在双目显微镜下分类,

挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒作为测定对象。锆石制靶、透射光、反射光及阴极发光(CL)显微结构照相均在北京奥金顿锆年领航科技有限公司完成,通过详细分析对比锆石的透反射、阴极发光照片,挑选出合适的锆石颗粒用于 U-Pb 年代学测试。锆石 U-Pb 年龄测试、微量元素分析及 Hf 同位素分析均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成。

锆石 U-Pb 年龄同位素分析在 LA-ICP-MS 仪器上用标准测定程序完成, ICP-MS 为 Agilient 7500a, 激光剥蚀系统为 193nm ArF 准分子(Excimer)激光器的 GeoLas 2005, 束斑直径为 $32 \mu\text{m}$, 详细的仪器操作及条件和数据处理见 Liu *et al.* (2010)。锆石加权平均年龄的计算和谐和图的绘制均采用 Isoplot/Ex_Ver3 程序进行(Ludwig, 2003)。

锆石 Hf 同位素利用 LA-MC-ICP-MS 完成, 激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, 激光斑束和频率分别设定为 $44 \mu\text{m}$ 和 6 Hz。Hf 同位素特征值计算所用的参数为: ^{176}Lu 的衰变常数 $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Söderlund *et al.*, 2004), 球粒陨石 CHUR 值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282\ 772$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.033\ 2$

(Blichert-Toft and Albarède, 1997)。亏损地幔模式年龄(t_{DM})计算采用亏损地幔值 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.283\ 25$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.038\ 4$ (Griffin *et al.*, 2002)。

主量元素分析由中国地质调查局成都地质调查中心采用 XRF(Rigaku RIX 2100 型)玻璃融饼法完成, 分析精度优于 4%。微量元素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室用 ICP-MS 方法测定, 分析准确度优于 5%。

3 测试结果

3.1 锆石年代学

2 件样品锆石颗粒较大, 均为柱状—长柱状自形晶体, 长 $130\sim310 \mu\text{m}$, 长宽比在 $1:2\sim1:3$, 锆石可见明显的核、边结构, 个别锆石有包体, 具明显的韵律环带, 属岩浆型锆石的特征(图 3), 说明锆石是岩浆结晶过程中形成的。

对样品 D5279 的 29 颗锆石进行了 U-Pb 年龄同位素分析, 结果见表 1。锆石 U 含量为 $106 \times 10^{-6} \sim 905 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $63 \times 10^{-6} \sim 162 \times 10^{-6}$, Th/U

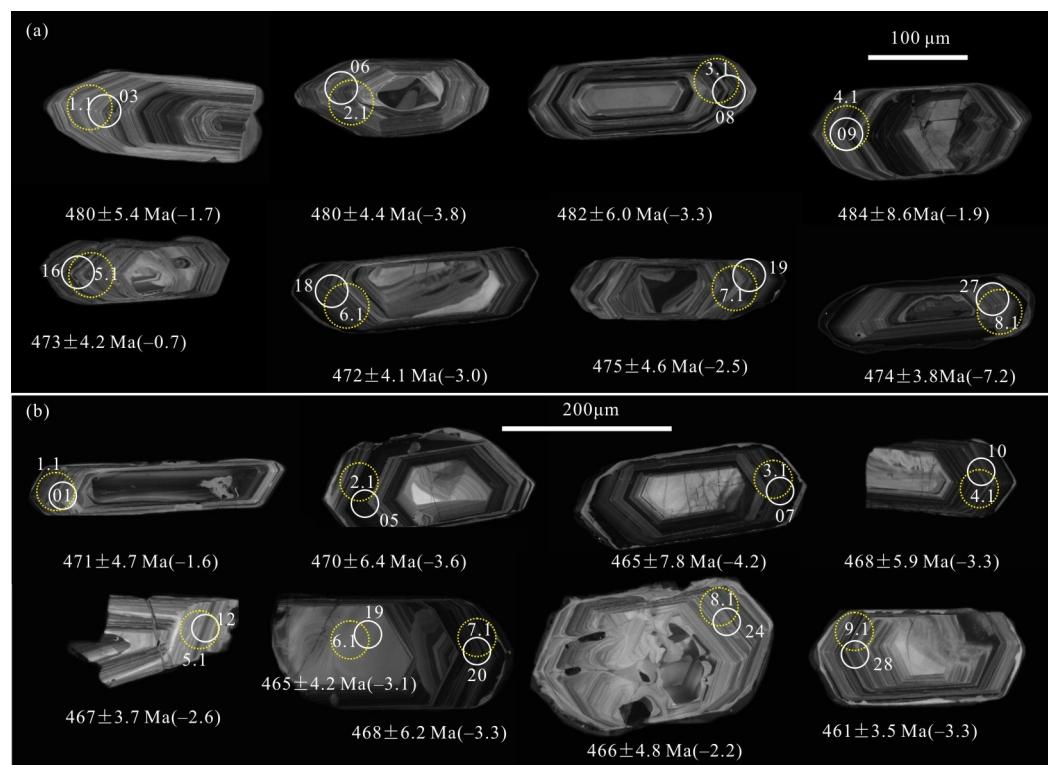


图 3 花岗质片麻岩的锆石 CL 图像

Fig.3 Zircon CL images for granitic gneiss

图 a 为样品 D5279; 图 b 为样品 D3104。实线和虚线圆圈分别为 U-Pb 年龄和 Hf 同位素测点; 括号外数值表示年龄, 括号内数值表示锆石 Hf 同位素组成

值为 $0.09\sim0.76$;除1个数据点Th/U值小于0.1,其他数据点均大于0.1,为岩浆成因锆石。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $472\sim853\text{ Ma}$,其中数据点D5279-01($792\pm11.2\text{ Ma}$)、D5279-07($731\pm15.6\text{ Ma}$)、D5279-11($671\pm5.9\text{ Ma}$)和D5279-29($853\pm5.5\text{ Ma}$)年龄值异常高,可能测试过程中有核部残留锆石的干扰,或者测点位于锆石核部与边部的交界处,所测为混合年龄。剩余的25个数据点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值为 $472\sim484\text{ Ma}$,均在误差范围内,分布在谐和线上或者附近(图4a),加权平均年龄为 $476.9\pm1.9\text{ Ma}$,代表了该样品的结晶年龄。

对样品D3104的29颗锆石进行了U-Pb年龄同位素分析,结果见表1.Th、U含量变化较大,锆石Th含量为 $63\times10^{-6}\sim357\times10^{-6}$,U含量为 $209\times10^{-6}\sim2404\times10^{-6}$,Th/U值为 $0.05\sim0.84$,多数大于0.1(仅2个数据点小于0.1)。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $461\sim1553\text{ Ma}$,其中数据点D3104-04($875\pm8.1\text{ Ma}$)和D3104-13($1553\pm13.1\text{ Ma}$)年龄值异常高,可能为混合年龄或为捕获锆石。剩余的28个数据点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值为 $461\sim475\text{ Ma}$,均在误差范围内,分布在谐和线上或者附近(图4b),加权平均年龄为 $465.7\pm1.9\text{ Ma}$,代表了该样品的结晶年龄。

3.2 锆石Hf同位素

在锆石U-Pb定年研究的基础上,笔者分别对D5279和D3104两件样品进行了原位Hf同位素分析,结果见表2。其中样品D5279有8个分析点, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 $0.282287\sim0.282477$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 $0.001026\sim0.002970$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-7.2\sim-0.7$ (均值 -3.0),对应Hf同位素地壳模式年龄(t_{DM}^{C})变化于 $1491\sim1907\text{ Ma}$ (均值 1639 Ma),远大于锆石U-Pb年龄值。

样品D3104有9个测点, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 $0.282387\sim0.282453$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 $0.001651\sim0.004577$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-4.2\sim-1.6$ (均值 -3.0),对应Hf同位素地壳模式年龄(t_{DM}^{C})变化于 $1543\sim1705\text{ Ma}$ (均值 1630 Ma),远大于锆石U-Pb年龄值。

3.3 主量和微量元素

样品D5279和D3104主量和微量元素分析结果见表3.2件样品的烧失量为 $0.51\%\sim0.85\%$,均值为 0.67% ,表明岩石蚀变程度较小。其 SiO_2 含量为 $70.67\%\sim74.03\%$,平均为 72.24% ,具有花岗岩的特征(图5a); Al_2O_3 为 $13.24\%\sim14.51\%$, MgO 为 $0.46\%\sim0.75\%$,平均为 0.63% 。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值皆大于1,为 $1.04\sim1.55$,具有富钾的特点,属于高钾钙碱性系列岩石(图5b); TiO_2 为 $0.26\%\sim0.46\%$,平均为 0.35% ; P_2O_5 为 $0.06\%\sim0.12\%$,平均为 0.09% 。以上岩石化学特征显示,该花岗质片麻岩具有富铝、钾,贫镁、钛、磷的特征。铝饱和指数A/CNK为 $1.09\sim1.19$,均值为 1.11 ,属于过铝质岩石。CIPW标准矿物中都出现了刚玉分子,含量为 $1.30\%\sim2.31\%$,均大于 1% ,无透辉石,具有S型花岗岩的特征。

花岗质片麻岩稀土元素总量 ΣREE 为 $151\times10^{-6}\sim233\times10^{-6}$,LREE/HREE值为 $3.94\sim6.71$,具有轻稀土富集、重稀土亏损的特征; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 $3.40\sim7.39$,轻稀土分馏较明显。 δEu 为 $0.30\sim0.44$,稀土元素配分曲线显示明显的负Eu异常特征(图6a),表明岩浆源区有不同数量的斜长石残留或者斜长石分离结晶。原始地幔标准化微量元素蛛网图显示,其富集大离子亲石元素(Rb、Th、U)和Pb,明显亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti和Zr等),出现低谷负异常(图6b)。

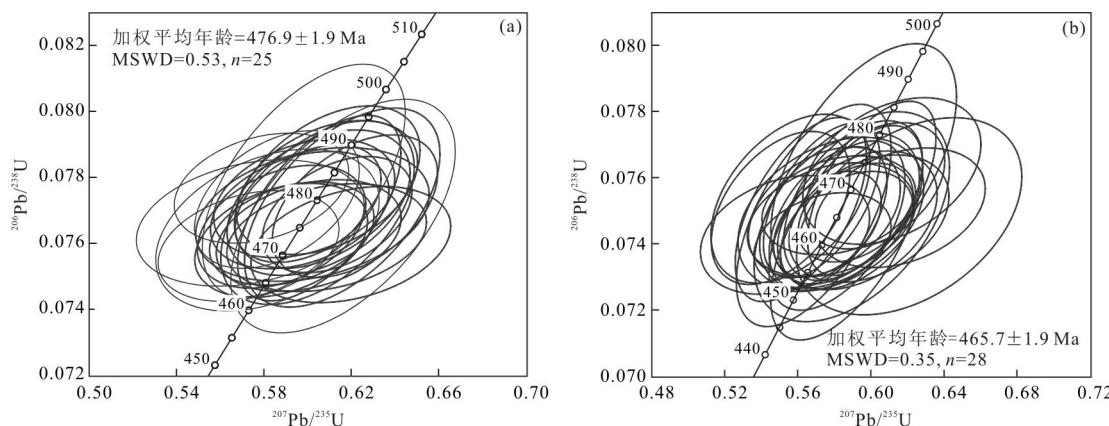


图4 花岗质片麻岩锆石U-Pb年龄谐和图

Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagrams of granitic gneiss

表 1 花岗质片麻岩锆石 U-Pb 年龄分析结果
Table 1 Zircon U-Pb dating results for granitic gneiss

测点号	元素含量(10^{-6})			同位素比值			年龄(Ma)								
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
D5279-01	81	106	0.76	0.0628	0.0026	1.1360	0.0473	0.1307	0.0020	702	88.9	771	22.5	792	11.2
D5279-02	95	518	0.18	0.0539	0.0016	0.5789	0.0163	0.0777	0.0007	365	66.7	464	10.5	482	4.1
D5279-03	117	408	0.29	0.0566	0.0016	0.6051	0.0171	0.0772	0.0009	476	93.5	480	10.8	480	5.4
D5279-04	99	274	0.36	0.0566	0.0015	0.6089	0.0169	0.0777	0.0008	472	93.5	483	10.7	482	5.0
D5279-05	88	516	0.17	0.0547	0.0014	0.5860	0.0154	0.0773	0.0009	467	57.4	468	9.9	480	5.1
D5279-06	80	366	0.22	0.0560	0.0017	0.5985	0.0169	0.0774	0.0007	454	64.8	476	10.8	480	4.4
D5279-07	162	444	0.36	0.0667	0.0017	1.1174	0.0381	0.1201	0.0027	828	52.9	762	18.3	731	15.6
D5279-08	73	573	0.13	0.0565	0.0015	0.6090	0.0174	0.0777	0.0010	472	57.4	483	11.0	482	6.0
D5279-09	83	561	0.15	0.0556	0.0016	0.5983	0.0190	0.0779	0.0014	435	66.7	476	12.1	484	8.6
D5279-10	71	515	0.14	0.0583	0.0014	0.6217	0.0155	0.0771	0.0009	539	51.8	491	9.7	479	5.3
D5279-11	95	780	0.12	0.0642	0.0013	0.9767	0.0210	0.1097	0.0010	750	44.4	692	10.8	671	5.9
D5279-12	75	373	0.20	0.0550	0.0019	0.5816	0.0209	0.0764	0.0010	413	77.8	466	13.4	475	6.0
D5279-13	75	443	0.17	0.0561	0.0016	0.5964	0.0167	0.0770	0.0007	457	63.0	475	10.6	478	4.3
D5279-14	72	477	0.15	0.0578	0.0013	0.6136	0.0140	0.0769	0.0007	520	50.0	486	8.8	477	4.3
D5279-15	144	905	0.16	0.0562	0.0012	0.6003	0.0136	0.0772	0.0007	461	46.3	477	8.6	479	4.4
D5279-16	94	426	0.22	0.0560	0.0015	0.5879	0.0162	0.0761	0.0007	450	59.3	470	10.3	473	4.2
D5279-17	86	377	0.23	0.0543	0.0019	0.5573	0.0213	0.0766	0.0008	389	81.5	460	13.8	476	4.7
D5279-18	96	425	0.23	0.0549	0.0017	0.5730	0.0169	0.0759	0.0007	409	68.5	460	11.0	472	4.1
D5279-19	78	427	0.18	0.0557	0.0014	0.5881	0.0157	0.0765	0.0008	439	52.8	470	10.1	475	4.6
D5279-20	97	454	0.21	0.0579	0.0015	0.6159	0.0183	0.0771	0.0012	524	55.5	487	11.5	479	7.4
D5279-21	98	411	0.24	0.0576	0.0015	0.6163	0.0210	0.0768	0.0014	522	59.3	487	13.2	477	8.7
D5279-22	110	399	0.28	0.0568	0.0016	0.6046	0.0181	0.0769	0.0011	483	63.0	480	11.4	478	6.8
D5279-23	68	413	0.16	0.0589	0.0018	0.6198	0.0187	0.0760	0.0007	565	68.5	490	11.7	472	4.3
D5279-24	65	351	0.19	0.0567	0.0016	0.6005	0.0173	0.0762	0.0007	480	64.8	478	11.0	474	4.1
D5279-25	63	407	0.15	0.0575	0.0018	0.6088	0.0187	0.0762	0.0007	509	66.7	483	11.8	473	4.0
D5279-26	137	410	0.33	0.0564	0.0020	0.6023	0.0218	0.0769	0.0008	478	77.8	479	13.8	477	5.0
D5279-27	69	417	0.17	0.0560	0.0015	0.5928	0.0154	0.0763	0.0006	450	59.3	473	9.8	474	3.8
D5279-28	80	879	0.09	0.0564	0.0012	0.6054	0.0153	0.0771	0.0011	478	48.1	481	9.7	479	6.9
D5279-29	142	471	0.30	0.0666	0.0015	1.3112	0.0298	0.1415	0.0010	833	48.1	851	13.1	853	5.5

续表1

测点号	元素含量(10^{-6})			同位素比值						年龄(Ma)					
	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	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	
D3104-01	187	477	0.39	0.0571	0.0014	0.6023	0.0156	0.0758	0.0008	498	53.7	479	9.9	471	4.7
D3104-02	222	1280	0.17	0.0568	0.0013	0.5917	0.0128	0.0749	0.0006	483	48.1	472	8.2	466	3.7
D3104-03	132	365	0.36	0.0578	0.0019	0.6115	0.0199	0.0762	0.0009	524	72.2	485	12.6	473	5.4
D3104-04	87	218	0.40	0.0675	0.0020	1.3574	0.0386	0.1454	0.0014	854	65.7	871	16.6	875	8.1
D3104-05	205	2404	0.09	0.0572	0.0012	0.6005	0.0144	0.0757	0.0011	498	48.1	478	9.1	470	6.4
D3104-06	65	209	0.31	0.0562	0.0020	0.5782	0.0208	0.0749	0.0010	461	81.5	463	13.4	466	5.7
D3104-07	89	636	0.14	0.0565	0.0016	0.5896	0.0219	0.0748	0.0013	472	97.2	471	14.0	465	7.8
D3104-08	217	412	0.53	0.0572	0.0016	0.5926	0.0179	0.0747	0.0009	502	64.8	473	11.4	464	5.1
D3104-09	117	363	0.32	0.0580	0.0017	0.5990	0.0179	0.0748	0.0008	528	66.7	477	11.4	465	4.7
D3104-10	357	996	0.36	0.0567	0.0015	0.5904	0.0155	0.0753	0.0010	480	83.3	471	9.9	468	5.9
D3104-11	138	611	0.23	0.0564	0.0017	0.5961	0.0208	0.0764	0.0015	478	100.9	475	13.2	475	8.9
D3104-12	258	307	0.84	0.0560	0.0016	0.5824	0.0172	0.0752	0.0006	450	67.6	466	11.0	467	3.7
D3104-13	71	1358	0.05	0.1103	0.0017	4.1604	0.0711	0.2724	0.0026	1806	27.6	1666	14.0	1553	13.1
D3104-14	168	740	0.23	0.0569	0.0013	0.5869	0.0148	0.0744	0.0007	487	51.8	469	9.5	463	4.4
D3104-15	277	1458	0.19	0.0558	0.0011	0.5762	0.0121	0.0746	0.0007	455	10.2	462	7.8	464	3.9
D3104-16	138	1034	0.13	0.0564	0.0013	0.5815	0.0152	0.0745	0.0010	477	51.8	465	9.8	463	6.3
D3104-17	116	265	0.44	0.0599	0.0022	0.6210	0.0252	0.0748	0.0012	598	79.6	490	15.8	465	7.3
D3104-18	131	620	0.21	0.0542	0.0012	0.5617	0.0147	0.0750	0.0011	389	51.8	453	9.5	466	6.8
D3104-19	63	252	0.25	0.0559	0.0018	0.5781	0.0187	0.0747	0.0007	455	70.4	463	12.0	465	4.2
D3104-20	135	463	0.29	0.0533	0.0016	0.5556	0.0178	0.0754	0.0010	343	68.5	449	11.6	468	6.2
D3104-21	211	1565	0.13	0.0550	0.0012	0.5731	0.0130	0.0753	0.0010	413	48.1	460	8.4	468	5.7
D3104-22	107	282	0.38	0.0537	0.0018	0.5530	0.0189	0.0743	0.0007	367	75.9	447	12.4	462	4.4
D3104-23	204	1352	0.15	0.0556	0.0012	0.5766	0.0132	0.0748	0.0009	435	46.3	462	8.5	465	5.2
D3104-24	114	348	0.33	0.0554	0.0016	0.5746	0.0170	0.0750	0.0008	432	64.8	461	11.0	466	4.8
D3104-25	146	289	0.51	0.0591	0.0018	0.6161	0.0190	0.0751	0.0007	572	64.8	487	12.0	467	4.4
D3104-26	244	526	0.46	0.0531	0.0015	0.5550	0.0155	0.0751	0.0009	332	30.6	445	10.1	467	5.7
D3104-27	122	375	0.33	0.0561	0.0016	0.5829	0.0179	0.0750	0.0010	454	63.0	466	11.5	466	5.8
D3104-28	260	636	0.41	0.0558	0.0015	0.5736	0.0153	0.0741	0.0006	443	59.3	460	9.9	461	3.5
D3104-29	168	341	0.49	0.0553	0.0017	0.5688	0.0173	0.0749	0.0014	433	70.4	457	11.2	465	8.2
D3104-30	166	737	0.23	0.0569	0.0013	0.5868	0.0170	0.0740	0.0013	487	84.2	469	10.9	462	7.9

表 2 花岗质片麻岩锆石 Hf 同位素分析数据

Table 2 Zircon Lu-Hf isotope data for granitic gneiss

测点号	t (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM} (Ma)	t_{DM}^{c} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
D5279-1.1	480	0.079 585	0.002 970	0.282 453	0.000 010	-11.3	-1.7	1 192	1 554	-0.91
D5279-2.1	480	0.027 221	0.001 026	0.282 375	0.000 008	-14.0	-3.8	1 239	1 690	-0.97
D5279-3.1	482	0.063 853	0.002 427	0.282 399	0.000 010	-13.2	-3.3	1 252	1 662	-0.93
D5279-4.1	484	0.067 342	0.002 585	0.282 441	0.000 010	-11.7	-1.9	1 196	1 571	-0.92
D5279-5.1	473	0.062 514	0.002 321	0.282 477	0.000 010	-10.4	-0.7	1 135	1 491	-0.93
D5279-6.1	472	0.072 551	0.002 664	0.282 417	0.000 009	-12.6	-3.0	1 234	1 633	-0.92
D5279-7.1	475	0.066 997	0.002 466	0.282 428	0.000 012	-12.2	-2.5	1 211	1 602	-0.93
D5279-8.1	474	0.038 219	0.001 495	0.282 287	0.000 009	-17.14	-7.2	1 379	1 907	-0.95
D3104-1.1	471	0.058 272	0.002 182	0.282 453	0.000 011	-11.3	-1.6	1 166	1 543	-0.93
D3104-2.1	470	0.072 773	0.002 835	0.282 404	0.000 011	-13.0	-3.6	1 259	1 666	-0.91
D3104-3.1	465	0.068 827	0.002 759	0.282 387	0.000 010	-13.6	-4.2	1 281	1 705	-0.92
D3104-4.1	468	0.063 461	0.002 451	0.282 409	0.000 013	-12.8	-3.3	1 238	1 648	-0.93
D3104-5.1	467	0.085 082	0.003 314	0.282 437	0.000 016	-11.9	-2.6	1 228	1 604	-0.90
D3104-6.1	465	0.043 073	0.001 675	0.282 410	0.000 011	-12.8	-3.1	1 212	1 633	-0.95
D3104-7.1	468	0.119 671	0.004 577	0.282 428	0.000 010	-12.2	-3.3	1 287	1 648	-0.86
D3104-8.1	466	0.044 207	0.001 651	0.282 433	0.000 009	-12.0	-2.2	1 177	1 580	-0.95
D3104-9.1	461	0.061 855	0.002 344	0.282 412	0.000 010	-12.7	-3.3	1 230	1 643	-0.93

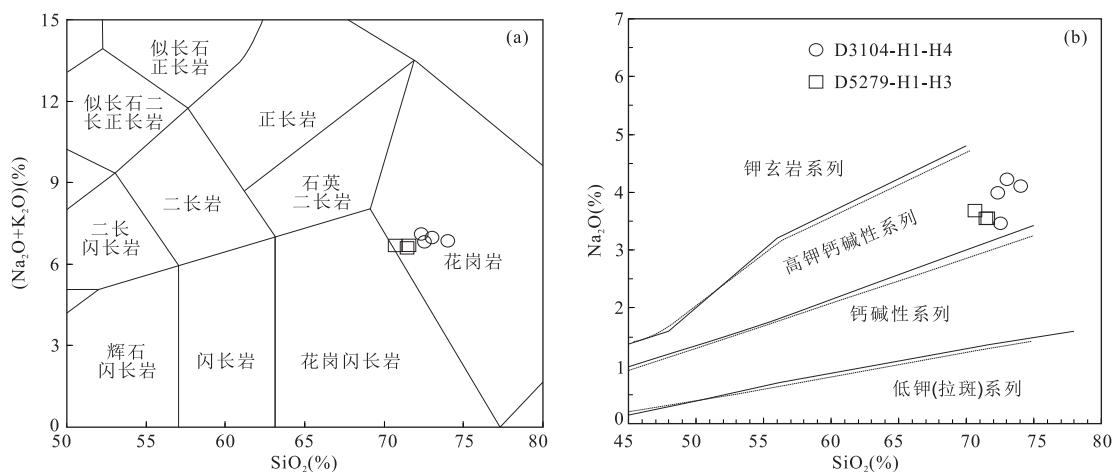
图 5 花岗质片麻岩 TAS 图解(a)和 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(b)Fig.5 TAS diagram (a) and $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagram (b) for granitic gneiss

图 a 据 Middlemost (1994); 图 b 中实线据 Peccerillo and Taylor (1976), 虚线据 Middlemost (1985)

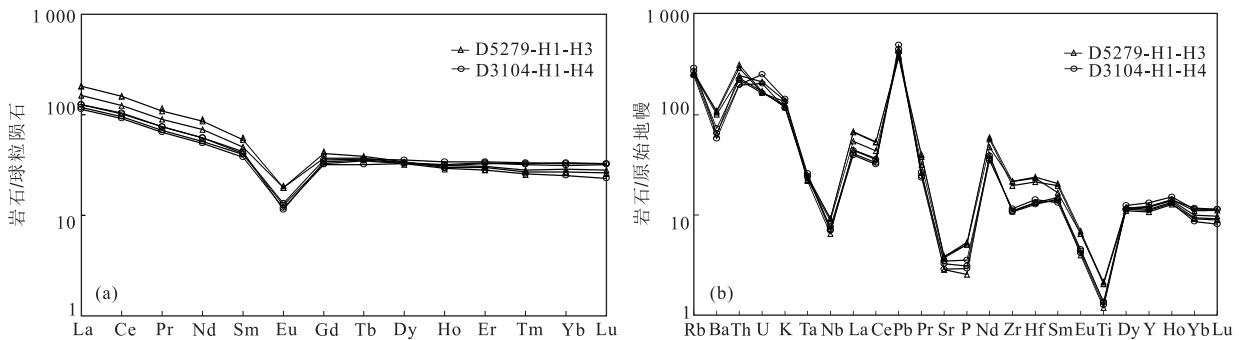


图 6 花岗质片麻岩球粒陨石标准化 REE 配分模式(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig.6 Chondrite-normalized REE pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b) for granitic gneiss

标准化数值据 Sun and McDonough(1989)

表3 花岗质片麻岩的主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果Table 3 Major elements (%) and trace elements (10^{-6}) analysis data for granitic gneiss

样品号	D5279-H1	D5279-H2	D5279-H3	D3104-H1	D3104-H2	D3104-H3	D3104-H4
SiO ₂	70.67	71.60	71.46	73.01	72.6	72.37	74.03
TiO ₂	0.46	0.45	0.44	0.28	0.30	0.29	0.26
Al ₂ O ₃	14.27	14.51	14.10	13.24	14.00	13.89	13.64
Fe ₂ O ₃ ^T	3.66	3.50	3.50	2.68	2.80	2.77	2.21
MnO	0.06	0.05	0.05	0.06	0.10	0.07	0.05
MgO	0.75	0.74	0.71	0.57	0.60	0.59	0.46
CaO	2.20	2.24	2.18	1.58	2.00	1.77	1.39
Na ₂ O	2.97	3.13	3.08	2.73	3.30	3.08	2.75
K ₂ O	3.67	3.52	3.52	4.22	3.50	3.99	4.11
P ₂ O ₅	0.12	0.11	0.11	0.06	0.10	0.07	0.06
LOI	0.51	0.70	0.58	0.85	0.60	0.59	0.85
Total	99.33	100.54	99.74	99.29	99.9	99.47	99.79
A/CNK	1.11	1.11	1.10	1.11	1.09	1.10	1.19
Sc	10.6	10.1	9.72	9.30	9.69	9.03	8.56
V	42.6	41.8	40.9	28.7	29.7	30.0	26.2
Cr	10.4	9.39	9.28	5.10	5.23	4.89	4.27
Co	5.71	5.71	5.29	3.73	4.39	3.84	2.33
Ni	4.98	4.46	4.86	2.57	2.82	2.80	2.02
Ga	19.1	19.3	18.5	15.4	16.7	16.2	15.7
Rb	165	156	158	183	153	170	161
Sr	79.8	81.2	78.3	60.3	72.9	68.4	60.0
Y	51.5	48.3	54.2	54.4	50.3	59.3	54.9
Zr	216	240	241	128	121	118	121
Nb	12.4	12.2	11.9	9.37	10.3	9.66	8.69
Cs	7.71	6.23	7.40	5.66	6.69	5.47	3.25
Ba	726	748	693	450	398	504	436
La	45.2	46.0	36.7	26.9	27.8	29.9	30.1
Ce	93.1	94.3	76.1	56.2	58.5	62.9	64.2
Pr	10.3	10.9	8.63	6.43	6.67	7.23	7.19
Nd	40.3	41.8	33.5	24.5	25.5	27.5	27.8
Sm	8.62	9.04	7.36	5.78	6.11	6.30	6.58
Eu	1.09	1.15	1.08	0.69	0.73	0.76	0.66
Gd	8.54	8.78	7.58	6.61	6.68	7.26	7.01
Tb	1.45	1.36	1.37	1.20	1.29	1.36	1.32
Dy	8.60	8.07	8.52	8.21	8.31	9.11	8.54
Ho	1.69	1.62	1.75	1.77	1.65	1.91	1.81
Er	5.00	4.66	5.12	5.46	4.69	5.65	5.48
Tm	0.69	0.65	0.72	0.83	0.66	0.86	0.82
Yb	4.57	4.46	4.86	5.68	4.22	5.54	5.34
Lu	0.67	0.66	0.72	0.84	0.60	0.84	0.82
Hf	6.54	7.30	7.10	4.35	4.04	3.92	4.07
Ta	0.96	1.00	0.91	0.99	0.98	1.06	0.88
Pb	26.4	27.4	26.0	34.5	29.1	31.1	30.7
Th	24.5	26.4	19.4	16.6	16.5	18.6	20.5
U	3.43	3.51	3.52	5.19	4.20	3.38	4.40
δ Eu	0.34	0.35	0.34	0.30	0.39	0.40	0.44
(La/Yb) _N	3.40	4.73	3.87	4.04	7.08	7.39	5.41

4 讨论

4.1 花岗质片麻岩的时代

临沧花岗岩基是云南滇西地区出露面积最大、延伸最远的花岗岩带,是原—古特提斯演化过程中重要的产物。早期由于测试手段的局限,研究者们对岩基的形成年龄有不同观点。陈吉琛(1989)认为其形成于 210~279 Ma; 刘昌实等(1989)认为其形成于 275~292 Ma; 张雯华等(1991)认为其形成于海西晚期—印支期(255~190 Ma); 李兴林(1996)统计分析了区域上已发表的年代学数据,认为临沧花岗岩基具有多期次多阶段的岩浆侵入活动,形成时代包括晋宁期、华力西和印支期等。近年来发表的锆石 U-Pb 高精度年代学数据显示,临沧花岗岩基主体形成时代为中—晚三叠世(208~243 Ma)(俞赛瀛等,2003; 彭头平等,2006; 吴随录,2010; 孔会磊等,2012),少量早三叠世(246 Ma, 250 Ma)(俞赛瀛等,2003)、早侏罗世(198 Ma)(吴随录,2010)、晚白垩世(79~81 Ma)(王海林等,2016)和古近纪(49 Ma, 61 Ma; 刘德利等,2008)岩体。

本文对双江地区 2 件花岗质片麻岩进行了年代学研究,锆石具明显的韵律环带,属岩浆型锆石。样品 D5279 的 25 个数据点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 476.9 ± 1.9 Ma; 样品 D3104 的 28 个数据点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 465.7 ± 1.9 Ma, 说明其分别形成于早、中奥陶世,其时代与属同一主大洋的龙木错—双湖结合带中蜈蚣山花岗片麻岩的年龄一致(464 Ma; 胡培远等,2010),晚于本松错花岗质片

麻岩的锆石 U-Pb 年龄(496~497 Ma; 彭智敏等,2014)。这是目前在临沧花岗岩基中发现最老、最可靠的岩浆岩年代学记录,说明临沧花岗岩基最早侵位年龄为 476.9 ± 1.9 Ma 或者更早。

4.2 源区分析

2 件样品中 SiO_2 含量为 70.67%~74.03%, 平均为 72.24%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 皆大于 1, A/CNK 值为 1.09~1.19, 说明原岩为高钾钙碱性过铝质 S 型花岗岩(Chappell, 1999)。通常 S 型花岗岩主要由变质泥岩、砂岩等地壳沉积物部分熔融形成(Sylvester, 1998)。一般来说, 具有砂质源区的过铝质花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值(>0.3)较高, 而具泥质源区的过铝质花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值(<0.3)较低。本文样品中 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值(0.51~0.74)均大于 0.3, 暗示花岗质片麻岩可能来自于砂质沉积。在 C/MF-A/MF 图解中(图 7a), 样品均落于变质杂砂岩部分熔融区域, 证明了岩浆来自于砂屑岩的部分熔融。

过铝质花岗岩的 Rb/Ba 和 Rb/Sr 比值常用来判别源区特征, 因此可用 $\text{Rb}/\text{Ba}-\text{Rb}/\text{Sr}$ 图解确定源区的成分(Sylvester, 1998)。样品均落于贫粘土岩区的杂砂岩和砂屑岩之间(图 7b)。 $\text{K}、\text{Rb}$ 会不断地向上方的硅铝层迁移, Rb/Sr 比值会不断增大, 花岗质片麻岩 Rb/Sr 比值为 1.92~3.03, 远大于上地壳值(0.32), 说明其物源可能来自于上部地壳。同时, 地球化学特征显示其富集大离子亲石元素($\text{Rb}、\text{Th}、\text{U}$)和 Pb , 明显亏损高场强元素($\text{Nb}、\text{Ta}、\text{Ti}$ 和 Zr), 也表明岩浆主要来自地壳。

锆石是一种非常稳定的矿物, 在形成以后基本

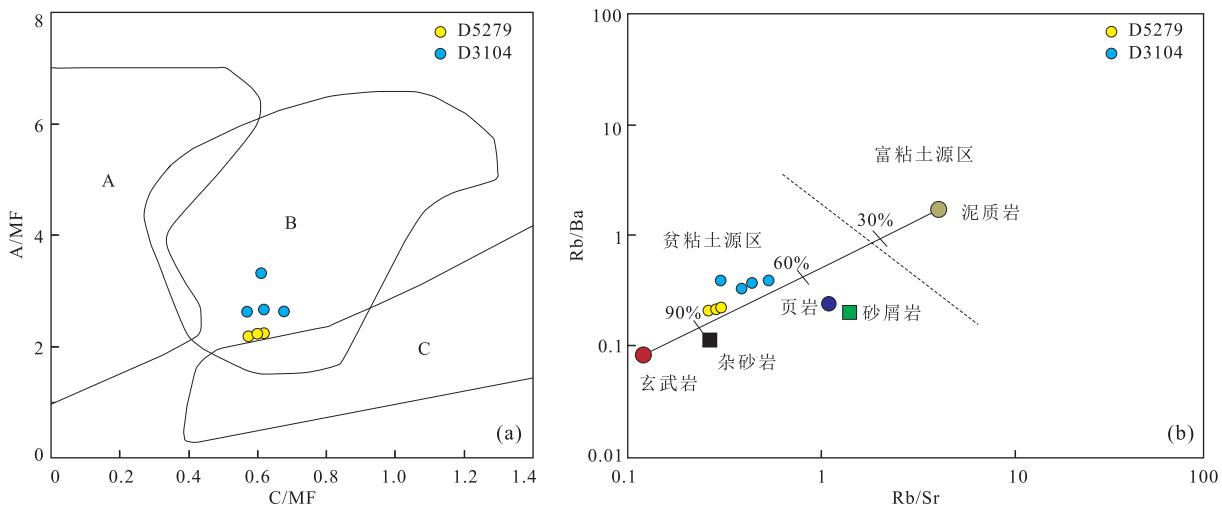
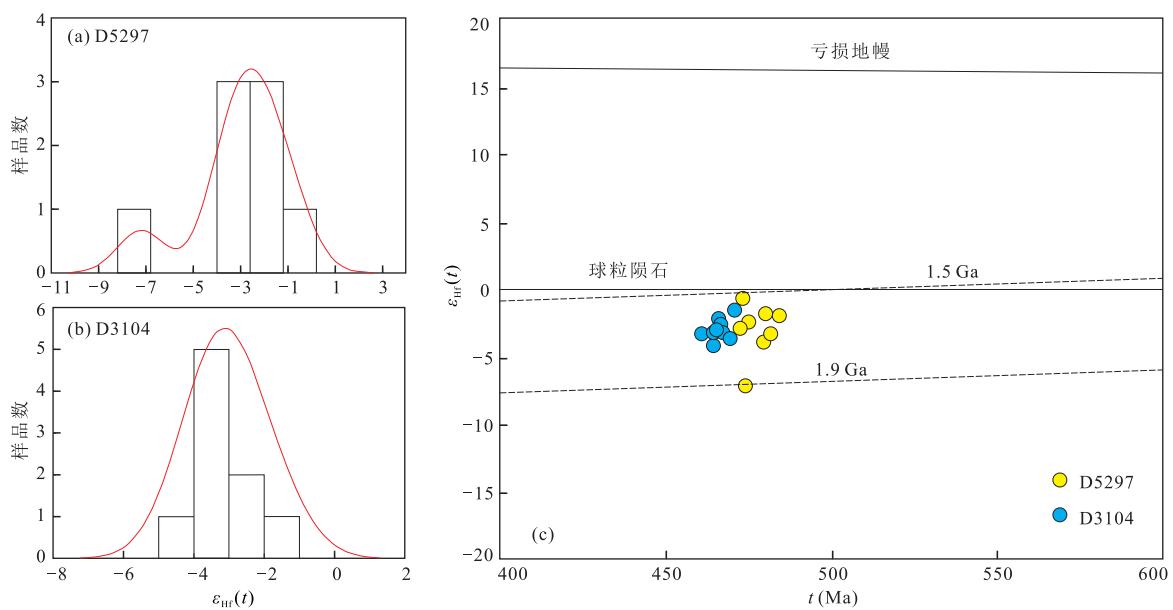


图 7 花岗质片麻岩 C/MF-A/MF(a) 和 Rb/Sr-Rb/Ba(b) 图解

Fig.7 C/MF-A/MF diagram (a) and Rb/Sr-Rb/Ba diagram (b) of granitic gneiss

图 a 据 Altherr *et al.*(2000); A. 变质泥岩部分熔融; B. 变质杂砂岩部分熔融; C. 基性岩的部分熔融. 图 b 据 Sylvester(1998)

图8 花岗质片麻岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 组成及 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解Fig.8 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ composition and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ diagram for zircons for granitic gneiss

不会出现明显的放射性成因 Hf 的积累,很少受到后期岩浆热事件的影响,即使在高级变质作用下也可以代表其形成时体系的同位素组成,因此被用来示踪岩浆源区不同性质源岩的特征(Griffin *et al.*, 2002;). $\epsilon_{\text{Hf}}(t)<0$ 通常指示与古老地壳物质的部分熔融有关(Griffin *et al.*, 2004).双江地区花岗质片麻岩的锆石 Hf 同位素组成比较均一, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为负值(图 8a, 8b).样品 D5297 中锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值($-7.2 \sim -0.7$, 均值 -3.0), 对应 Hf 同位素地壳模式年龄(t_{DM}^{C})在 $1491 \sim 1907$ Ma(均值 1639 Ma)之间;样品 D3104 中锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值($-4.2 \sim -1.6$, 均值 -3.0), 对应 Hf 同位素地壳模式年龄(t_{DM}^{C})在 $1543 \sim 1705$ Ma(均值 1630 Ma)之间.在 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解中,所有数据点都分布于亏损地幔线及球粒陨石演化线之下(图 8c),2 件样品 Hf 同位素地壳模式年龄基本一致,反映其岩浆可能都起源于古元古代地壳物质的部分熔融.Hf 同位素未记录地幔岩浆和新生地壳的信息,因此笔者认为花岗质片麻岩的形成没有地幔物质的参与.昌宁—孟连结合带北延的龙木错—双湖结合带本松错地区的花岗质片麻岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为负值($-5.5 \sim -1.0$, 均值 -3.4), Hf 同位素地壳模式年龄(t_{DM}^{C})在 $1531 \sim 1816$ Ma 之间(均值 1680 Ma; 彭智敏等, 2014), 与本文研究的双江地区花岗质片麻岩近似,暗示了二者属相同的物源区和构造背景.

岩浆结晶温度的估算方法主要有全岩饱和温度

计(Watson and Harrison, 1983)和锆石 Ti 温度计(Ferry and Watson, 2007).根据全岩饱和温度计得出 2 件样品源区发生部分熔融的温度为 $760 \sim 829^\circ\text{C}$, 平均为 791°C .利用锆石 Ti 温度计,排除异常年龄数据、异常元素含量等,计算出样品 D5279 锆石的结晶温度为 $683 \sim 766^\circ\text{C}$ (16 个点), 均值为 715°C ;样品 D3104 锆石的结晶温度为 $680 \sim 763^\circ\text{C}$ (14 个点), 均值为 711°C .二者锆石结晶温度均值与 King *et al.*(1997)认为的 S 型花岗岩锆石饱和温度平均值(764°C)比较接近.因此从源区发生部分熔融到岩浆结晶,温度从 791°C 左右下降到 715°C 和 711°C 左右,表明花岗质片麻岩岩浆的形成温度相对较高,由于岩浆结晶锆石基本没有显著幔源特征的 Hf 同位素记录,因此笔者认为基本没有地幔物质参与花岗质片麻岩的形成,可能地幔热提供了热源.

4.3 对原—古特提斯演化的制约

东特提斯构造域原—古特提斯演化阶段存在多个(微)地块、岛弧与洋盆相间排列的构造格局,龙木错—双湖—昌宁—孟连结合带代表了原—古特提斯大洋最终消亡后的遗迹,最早可以追溯到早古生代(刘本培等, 1993; 潘桂棠等, 2012; 王立全等, 2008; 王保弟等, 2013; 孙载波等, 2017).临沧花岗岩基作为三江特提斯构造域重要的组成部分,如前所述,以往关于岩基构造背景主要集中在古特提斯洋闭合后的同碰撞、碰撞晚期—碰撞后和碰撞后 3 种观点,陆—陆或陆—弧的确切时间得到了较好的限定,而对

于原特提斯向东俯冲消减的古生代岩浆记录还存在疑问。

原—古特提斯洋中分布着规模不等的(微)地块,如喜马拉雅地块、拉萨地块、羌塘地块、保山地块等,这些地块在早古生代普遍存在岩浆活动(520~460 Ma),许多研究者认为是在原特提斯洋俯冲作用下安第斯造山运动的结果,岩浆来源于古老地壳物质部分熔融,有的有少量地幔物质参与(过铝质 S 型花岗岩)(Zhu *et al.*, 2012; 彭智敏等, 2014; 邢晓婉等, 2015; 刘强等, 2017)。原特提斯俯冲作用造成了区域上古生代地层的不整合,例如拉萨地块北缘申扎地区下奥陶统与寒武系角度不整合(李才等, 2010); 保山地块中南大寨一带中上奥陶统平行不整合于上寒武统(黄勇等, 2012)。临沧地块属原—古特提斯海域中的一个地块,曾文涛等(2017)对滇西孟连县芒信镇地区的南段组碎屑锆石研究认为,临沧地体是来自东冈瓦纳北缘的微陆块。因此,本文研究的临沧花岗岩基早—中奥陶世花岗质片麻岩(476 Ma、465 Ma)也应与原特提斯洋俯冲作用有关。昌宁—孟连洋在早奥陶世(471 Ma)或者更早就开始了向东的俯冲消减作用(刘桂春等, 2017),与之对应的早古生代弧岩浆作用记录主要有牛井山高镁埃达克质英云闪长岩年龄(468 Ma; 王冬兵等, 2016); 大中河地区中酸性火山岩组合,年龄为 421 Ma、417 Ma(毛晓长等, 2012); 大平掌英安岩,年龄为 428 Ma(Lehmann *et al.*, 2013)。澜沧岩群可能是原—古特提斯洋向东俯冲消减形成的早古生代构造增生杂岩,研究者在增生杂岩中识别出早古生代具有岛弧性质的变质火山岩,认为其是昌宁—孟连原特提斯洋盆俯冲消减的产物,Nie *et al.*(2015)对惠民地区变质火山岩进行了年代学研究,获得年龄为 456 Ma、459 Ma; Xing *et al.*(2017)在栗义和惠民地区的变质火山岩中获得年龄为 454 Ma、462 Ma。可以看出,临沧花岗岩基中的早—中奥陶世花岗质片麻岩年龄稍早于区域上岛弧型火山岩,与刘桂春等(2017)认为的早奥陶世原特提斯洋就开始了俯冲消减的年龄一致。因此,本文研究的花岗质片麻岩代表了原特提斯洋向东俯冲消减的岩浆事件响应,在原特提斯洋的持续俯冲消减作用下,岩石圈地幔发生拆沉,引起软流圈上涌,从而引起古老地壳物质部分熔融。说明昌宁—孟连原特提斯洋至少在早奥陶世(476.9 Ma)就存在俯冲消减,或者更早。

5 结论

(1)首次在临沧花岗岩基中识别出早古生代花岗质片麻岩,获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄为 465.7 ± 1.9 Ma、 476.9 ± 1.9 Ma,确认了临沧花岗岩基存在早—中奥陶世岩浆事件。

(2)花岗质片麻岩富集大离子亲石元素(Rb、Th、U)、明显亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti 和 Zr),具有轻稀土富集、重稀土亏损的特征,明显的负 Eu 异常。锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为负值($-7.2 \sim -0.7$, 均值为 -3.0), Hf 同位素地壳模式年龄(t_{DM}^{C})均值(1 639 Ma、1 630 Ma)基本一致,说明花岗质片麻岩来源于古老地壳物质的部分熔融。

(3)花岗质片麻岩是原特提斯洋向东俯冲消减的岩浆事件响应,说明在早奥陶世昌宁—孟连洋就存在俯冲消减,昌宁—孟连特提斯演化历史最早可以追溯到早奥陶世。

References

- Altherr, R., Holl, A., Hegner, E., et al., 2000. High-Potassium, Calc-Alkaline I-Type Plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and Northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50(1—3): 51—73. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(99\)00052-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(99)00052-3)
- Blichert-Toft, J., Albarède, F., 1997. The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1—2): 243—258. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(97\)00040-x](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(97)00040-x)
- Chappell, B.W., 1999. Aluminium Saturation in I- and S-Type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535—551. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00086-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00086-3)
- Chen, J.C., 1989. Tectonic Surroundings Forming West Yunnan Granitoids and Their Rock Characters. *Yunnan Geology*, 8(3—4): 205—212 (in Chinese with English abstract).
- Cong, B.L., Wu, G.Y., Zhang, Q., et al., 1993. The Tectonic Evolution of the Rock in the Ancient Tethys, Western Yunnan. *Science in China (Series B)*, 23 (11): 1201—1207 (in Chinese).
- Ferry, J.M., Watson, E.B., 2007. New Thermodynamic Models and Revised Calibrations for the Ti-in-Zircon and Zr-in-Rutile Thermometers. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 154(4): 429—437. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0201-0>

- Griffin, W. L., Wang, X., Jackson, S. E., et al., 2002. Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China: In-Situ Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, 61(3–4): 237–269. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(02)00082-8)
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131 (3–4): 231–282. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.12.011>
- Hu, P. Y., Li, C., Su, L., et al., 2010. Zircon U-Pb Dating of Granitic Gneiss in Wugong Mountain Area, Central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau: Age Records of Pan-African Movement and Indo-China Movement. *Geology in China*, 37(4): 1050–1061 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Y., Hao, J. X., Bai, L., et al., 2012. Stratigraphic and Petrologic Response to Late Pan-African Movement in Shidian Area, Western Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 31(2): 306–313 (in Chinese with English abstract).
- King, P. L., White, A. J. R., Chappell, B. W., et al., 1997. Characterization and Origin of Aluminous A-Type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371–391. <https://doi.org/10.1093/petroj/38.3.371>
- Kong, H. L., Dong, G. C., Mo, X. X., et al., 2012. Petrogenesis of Lincang Granites in Sanjiang Area of Western Yunnan Province: Constraints from Geochemistry, zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1438–1452 (in Chinese with English abstract).
- Lehmann, B., Zhao, X. F., Zhou, M. F., et al., 2013. Mid-Silurian Back-Arc Spreading at the Northeastern Margin of Gondwana: The Dapingzhang Dacite-Hosted Massive Sulfide Deposit, Lancangjiang Zone, Southwestern Yunnan, China. *Gondwana Research*, 24 (2): 648–663. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.12.018>
- Li, C., Wu, Y. W., Wang, M., et al., 2010. Significant Progress on Pan-African and Early Paleozoic Orogenic Events in Qinghai-Tibet Plateau—Discovery of Pan-African Orogenic Unconformity and Cambrian System in the Gangdise Area, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 29(12): 1733–1736 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. L., 1996. Basic Characteristics and Formation Structural Environment of Lincang Composite Granite Batholith. *Yunnan Geology*, 15(1): 1–18 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. P., Feng, Q. L., Fang, N. Q., et al., 1993. Tectonic Evolution of Palaeo-Tethys Poly-Island-Ocean in Changning-Menglian and Lancangjiang Belts, Southwestern Yunnan, China. *Earth Science*, 18 (5): 529–539 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. S., Zhu, J. C., Xu, X. S., et al., 1989. Study on the Characteristics of Linchang Composite Granite Batholith in West Yunnan. *Yunnan Geology*, 8(3–4): 189–204 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. L., Liu, J. S., Zhang, C. H., et al., 2008. Geological Characteristics and Tectonic Setting of Yunxian Granite in the Northern Part of South Lancangjiang Convergent Margin, Western Yunnan Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(1): 23–31 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. C., Sun, Z. B., Zeng, W. T., et al., 2017. The Age of Wanhe Ophiolitic Mélange from Mengku Area, Shuangjiang County, Western Yunnan Province, and Its Geological Significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(2): 163–174 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q., Deng, Y. B., Xiang, S. Y., et al., 2017. Early Ordovician Tectono-Thermal Event in Zhongba Terrane and Its Geological Significance. *Earth Science*, 42(6): 881–890 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/dqkx.2017.076>
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Zong, K. Q., et al., 2010. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55 (15): 1535–1546. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-3052-4>
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Mao, X. C., Wang, L. Q., Li, B., et al., 2012. Discovery of the Late Silurian Volcanic Rocks in the Dazhonghe Area, Yunxian-Jinggu Volcanic Arc Belt, Western Yunnan, China and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (5): 1517–1528 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost, E. A. K., 1985. Magmas and Magmatic Rocks. Longman, London.
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magma/Igneous Rock System. *Earth-Science Reviews*, 37 (3–4): 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Nie, X. M., Feng, Q. L., Qian, X., et al., 2015. Magmatic Record of Prototethyan Evolution in SW Yunnan, China: Geochemical, Zircon U-Pb Geochronological and Lu-Hf Isotopic Evidence from the Huimin Metavolcanic Rocks in the Southern Lancangjiang Zone. *Gondwana Research*, 28(2): 757–768. <https://doi.org/10.13039/501100000089>

- 501100001809
- Pan, G.T., Wang, L.Q., Li, R.S., et al., 2012. Tectonic Model of Archipelagic Arc-Basin Systems: The Key to the Continental Geology. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32 (3): 1—20 (in Chinese with English abstract).
- Peccerillo, A., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58 (1): 63—81. <https://doi.org/10.1007/bf00384745>
- Peng, T.P., Wang, Y.J., Fan, W.M., et al., 2006. SHRIMP Zircon U-Pb Geochronology of Early Mesozoic Felsic Igneous Rocks from the Southern Lancangjiang and Its Tectonic Implications. *Science in China (Series D)*, 36 (2): 123—132 (in Chinese).
- Peng, Z.M., Geng, Q.R., Wang, L.Q., et al., 2014. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopic Characteristics of Granitic Gneiss from Bunsumco, Central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 59 (26): 2621—2629 (in Chinese).
- Söderlund, U., Patchett, P.J., Vervoort, J.D., et al., 2004. The ^{176}Lu Decay Constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3—4): 311—324. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(04\)00012-3](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(04)00012-3)
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42 (1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sun, Z.B., Zeng, W.T., Zhou, K., et al., 2017. Identification of Ordovician Oceanic Island Basalt in the Changning-Menglian Suture Zone and Its Tectonic Implications: Evidence from Geochemical and Geochronological Data. *Geological Bulletin of China*, 36(10): 1760—1771 (in Chinese with English abstract).
- Sylvester, P.J., 1998. Post-Collisional Strongly Peraluminous Granites. *Lithos*, 45(1—4): 29—44. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00024-3](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00024-3)
- Wang, B.D., Wang, L.Q., Pan, G.T., et al., 2013. U-Pb Zircon Dating of Early Paleozoic Gabbro from the Nantinghe Ophiolite in the Changning-Menglian Suture Zone and Its Geological Implication. *Chinese Science Bulletin*, 58 (4): 344—354 (in Chinese).
- Wang, D.B., Luo, L., Tang, Y., et al., 2016. Zircon U-Pb Dating and Petrogenesis of Early Paleozoic Adakites from the Niujingshan Ophiolitic Mélange in the Changning Menglian Suture Zone and Its Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 32 (8): 2317—2329 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H.L., Lin, F.C., Cong, F., et al., 2016. Yunnan Fengqing Mang Street Leucogranite LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age and Its Geological Significance. *World Nonferrous Metals*, (7): 59—61 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L.Q., Pan, G.T., Li, C., et al., 2008. SHRIMP U-Pb Zircon Dating of Eopaleozoic Cumulate in Guoganjianian Mt. from Central Qiangtang Area of Northern Tibet—Considering the Evolvement of Proto-and Paleo-Tethys. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2045—2056 (in Chinese with English abstract).
- Watson, E.B., Harrison, T.M., 1983. Zircon Saturation Revisited: Temperature and Composition Effects in a Variety of Crustal Magma Types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64 (2): 295—304. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(83\)90211-x](https://doi.org/10.1016/0012-821x(83)90211-x)
- Wu, S. L., 2010. Characteristics, Geochronology of Lincang Granite in the Southern Langcangjiang, Sanjiang Area and Implication for Tectonics (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Xing, X.W., Wang, Y.J., Cawood, P.A., et al., 2017. Early Paleozoic Accretionary Orogenesis along Northern Margin of Gondwana Constrained by High-Mg Metagneous Rocks, SW Yunnan. *International Journal of Earth Sciences*, 106 (5): 1469—1486. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1282-z>
- Xing, X.W., Zhang, Y.Z., Wang, Y.J., et al., 2015. Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Composition of the Ordovician Granitic Gneisses in Ximeng Area, West Yunnan Province. *Geotectonica et Metallogenica*, 39 (3): 470—480 (in Chinese with English abstract).
- Yu, S.Y., Li, K.Q., Shi, Y.P., et al., 2003. A Study on the Granodiorite in the Middle Part of Lincang Granite Batholith. *Yunnan Geology*, 22 (4): 426—442 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, W.T., Liu, G.C., Feng, Q.L., et al., 2017. The Relationship between Lincang Block and Provenance of Nanduan Formation: Evidence of Detrital Zircon U-Pb Dating from Metasandstone of Devonian-Carboniferous Nanduan Formation. *Geological Bulletin of China*, 36 (7): 1175—1187 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W.H., Qin, Y.J., Wang, Y., 1991. Discussion on the Causation Type and Its Source of Lincang Granite Belt in West Yunnan. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 10 (4): 240—243 (in Chinese with English abstract).

English abstract).

Zhu, D.C., Zhao, Z.D., Niu, Y.L., et al., 2012. Cambrian Bimodal Volcanism in the Lhasa Terrane, Southern Tibet: Record of an Early Paleozoic Andean-Type Magmatic Arc in the Australian Proto-Tethyan Margin. *Chemical Geology*, 328: 290–308. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.12.024>

附中文参考文献

- 陈吉琛,1989.滇西花岗岩类形成的构造环境及岩石特征.《云南地质》,8(3—4):205—212.
- 从柏林,吴根耀,张旗,等,1993.中国滇西古特提斯构造带岩石大地构造演化.《中国科学(B辑)》,23(11):1201—1207.
- 胡培远,李才,苏犁,等,2010.青藏高原羌塘中部蜈蚣山花岗片麻岩锆石U-Pb定年——泛非与印支事件的年代学记录.《中国地质》,37(4):1050—1061.
- 黄勇,郝家栩,白龙,等,2012.滇西施甸地区晚泛非运动的地层学和岩石学响应.《地质通报》,31(2):306—313.
- 孔会磊,董国臣,莫宣学,等,2012.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.《岩石学报》,28(5):1438—1452.
- 李才,吴彦旺,王明,等,2010.青藏高原泛非—早古生代造山事件研究重大进展——冈底斯地区寒武系和泛非造山不整合的发现.《地质通报》,29(12):1733—1736.
- 李兴林,1996.临沧复式花岗岩基的基本特征及形成构造环境的研究.《云南地质》,15(1):1—18.
- 刘本培,冯庆来,方念乔,等,1993.滇西南昌宁—孟连带和澜沧江带古特提斯多岛洋构造演化.《地球科学》,18(5):529—539.
- 刘昌实,朱金初,徐夕生,等,1989.滇西临沧复式岩基特征研究.《云南地质》,8(3—4):189—204.
- 刘德利,刘继顺,张彩华,等,2008.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.《岩石矿物学杂志》,27(1):23—31.
- 刘桂春,孙载波,曾文涛,等,2017.滇西双江县勐库地区湾河蛇绿混杂岩的形成时代、岩石地球化学特征及地质意义.《岩石矿物学杂志》,36(2):163—174.
- 刘强,邓玉彪,向树元,等,2017.藏南仲巴地体早奥陶世构造—热事件及其地质意义.《地球科学》,42(6):881—890. <https://doi.org/10.1016/j.dqkx.2017.076>
- 毛晓长,王立全,李冰,等,2012.云县—景谷火山弧带大中河晚志留世火山岩的发现及其地质意义.《岩石学报》,28(5):1517—1528.
- 潘桂棠,王立全,李荣社,等,2012.多岛弧盆系构造模式:认识大陆地质的关键.《沉积与特提斯地质》,32(3):1—20.
- 彭头平,王岳军,范蔚茗,等,2006.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.《中国科学(D辑)》,36(2):123—132.
- 彭智敏,耿全如,王立全,等,2014.青藏高原羌塘中部本松错花岗质片麻岩锆石U-Pb年龄、Hf同位素特征及地质意义.《科学通报》,59(26):2621—2629.
- 孙载波,曾文涛,周坤,等,2017.昌宁—孟连结合带奥陶纪洋岛玄武岩的识别及其构造意义——来自地球化学和锆石U-Pb年龄的证据.《地质通报》,36(10):1760—1771.
- 王保弟,王立全,潘桂棠,等,2013.昌宁—孟连结合带南汀河早古生代辉长岩锆石年代学及地质意义.《科学通报》,58(4):344—354.
- 王冬兵,罗亮,唐渊,等,2016.昌宁—孟连结合带牛井山早古生代埃达克岩锆石U-Pb年龄、岩石成因及其地质意义.《岩石学报》,32(8):2317—2329.
- 王海林,林方成,丛峰,等,2016.云南凤庆漭街淡色花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其地质意义.《世界有色金属》,7:59—61.
- 王立全,潘桂棠,李才,等,2008.藏北羌塘中部果干加年山早古生代堆晶辉长岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄——兼论原—古特提斯洋的演化.《地质通报》,27(12):2045—2056.
- 吴随录,2010.三江地区南澜沧江临沧花岗岩的特点、时代及区域构造意义(硕士学位论文).北京:中国地质大学.
- 邢晓婉,张玉芝,王岳军,等,2015.西盟地区奥陶纪花岗片麻岩的锆石U-Pb年代学、Hf同位素组成特征及其大地构造意义.《大地构造与成矿学》,39(3):470—480.
- 俞赛瀛,李昆琼,施玉萍,等,2003.临沧花岗岩基中段花岗闪长岩类研究.《云南地质》,22(4):426—442.
- 曾文涛,刘桂春,冯庆来,等,2017.临沧地体亲缘性及南段组物源——来自泥盆纪—石炭纪南段组碎屑锆石U-Pb年龄的证据.《地质通报》,36(7):1175—1187.
- 张雯华,秦元季,王毅,1991.滇西临沧花岗岩带的成因类型及其物源的讨论.《矿物岩石地球化学通报》,10(4):240—243.