

南盘江盆地南缘富宁—那坡地区早—中三叠世火山—沉积组合形成环境

向忠金^{1,2}, 闫全人³, 夏磊⁴, 夏文静⁵

XIANG Zhongjin^{1,2}, YAN Quanren³, XIA Lei⁴, XIA Wenjing⁵

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 自然资源部深地动力学重点实验室, 北京 100037;

3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;

4. 云南大学地球科学学院, 云南 昆明 650500;

5. 北京航空航天大学学生处, 北京 100191

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China;

3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650500, Yunnan, China;

5. Department of Student Affairs, Beihang University, Beijing 100191, China

摘要:南盘江盆地南缘发育大量早—中三叠世岩浆岩和巨厚三叠系,为研究沿中越边界一带是否发生洋盆俯冲消亡过程提供了重要的岩浆—沉积证据。选取中越边界地区出露面积最大的富宁—那坡地区早—中三叠世火山岩及相关沉积作为研究对象,通过系统的地质填图和剖面测量,查明这套火山—沉积组合具有下部玄武安山岩,上覆碳酸盐岩质砾岩、含砾粗砂岩和钙质砂岩的沉积序列,与岛弧环境火山—沉积序列相似。玄武安山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果为 247 ± 1 Ma 和 246 ± 3 Ma,与野外产于中三叠统碎屑岩之下的地质事实相符。结合前人研究成果,确定这套火山岩形成于早—中三叠世(247~242 Ma)。全岩地球化学分析结果显示,玄武安山岩富集大离子亲石元素(LILEs, Rb、Th 和 U)和轻稀土元素(LREE),其具有明显的 Nb、Ta 和 Ti 负异常。火山—沉积序列和火山岩地球化学特征表明,富宁—那坡地区早—中三叠世火山—沉积组合形成于与俯冲相关的弧环境。中越边界地区早—中三叠世弧火山岩与蛇绿混杂岩带的时空展布特征表明,该地区晚古生代洋盆发生了向北的俯冲消减。

关键词:玄武安山岩;岛弧;三叠纪;南盘江盆地;华南

中图分类号:P534.51;P588.14;P588.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)01-0138-14

Xiang Z J, Yan Q R, Xia L, Xia W J. The tectonic setting of the Early–Middle Triassic volcanic–sedimentary succession in Funing–Napo area, the south margin of Nanpanjiang Basin, South China. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(1): 138–151

Abstract: The Late Paleozoic to Early Mesozoic tectonic evolution process along the Sino–Vietnam border, particularly the subduction polarity of the Late Paleozoic ocean basin, is still controversial. Massive Early–Middle Triassic magmatic rocks and thick Triassic siliciclastic system occurred in the south margin of Nanpanjiang Basin provide important magmatic and sedimentary evidences for settling dispute. The Funing–Napo Triassic volcanic rocks, as the largest magmatic outcrop, are the ideal object for studying the tectonic

收稿日期:2020-08-22;修订日期:2020-09-27

资助项目:中国地质调查局项目《钦杭西南段及邻区古特提斯造山区域地质专项调查》(编号:12120113067500)、《云南省洞波幅和皈朝幅1:5万区域地质调查》(编号:DD20160201-7)和自然资源部深地动力学重点实验室自主研究课题《中越边境上二叠统—下三叠统碎屑岩物源和形成构造环境研究》(编号:J1901-24)

作者简介:向忠金(1985-),男,助理研究员,从事火山岩和火山碎屑岩研究。E-mail:zhjxiang@cags.ac.cn

evolution along the Sino-Vietnam border. The systematic profile survey and geological mapping indicates that the volcanic-sedimentary succession that consists of lower basaltic andesites overlain by carbonate conglomerates, pebbly sandstones and calcareous sandstones, which is similar to the volcanic-sedimentary sequence in island arc setting. Zircon SHRIMP U-Pb dating results of basaltic andesites are 247 ± 1 Ma and 246 ± 3 Ma, which are consistent with field occurrence that basaltic andesite is overlain by Middle Triassic clastic rocks. Combined with previous results, it is determined that the volcanic rocks were formed at $247 \sim 242$ Ma. The geochemical analysis shows that basaltic andesites are enriched in LILEs (Rb, Th and U) and LREE, with a remarkable negative Nb-Ta and Ti anomalies. Both the geochemical characteristics of basaltic andesites and the volcanic-sedimentary sequence suggest that the Early-Middle Triassic volcanic-sedimentary succession was formed in a subduction-related arc setting. The spatial and temporal distribution characteristics of Early-Middle Triassic volcanic arc and ophiolitic mélange, implies that a north-dipping subduction occurred along Sino-Vietnam border.

Key words: basaltic andesite; Island arc; Triassic; Nanpanjiang Basin; South China

现今的东南亚大陆由滇缅泰马地块、印支地块、华南等陆块经古特提斯洋闭合、汇聚拼合而成^[1]。学者普遍认同古特提斯洋主体沿昌宁—孟连和清迈缝合带消减闭合^[1-2]。同时, 华南与思茅—印支地块间曾存在一个古特提斯分支洋^[3-4], 该分支洋盆沿哀牢山缝合带消亡(图 1-a), 导致华南与思茅地块发生碰撞拼合^[5-7]。然而, 关于该分支洋盆向东南如何延伸, 以及华南与印支地块汇聚拼合的位置, 仍存在争议。多数学者认为, 该分支洋盆向东南延伸入越南北部, 大致沿 Song Ma 综合带消减闭合, 哀牢山—Song Ma 缝合带代表了华南大陆与思

茅—印支地块汇聚拼合的位置^[1-2, 4, 8-10]。部分学者根据在滇桂—越北交界地区发育的晚古生代洋中脊(N-MORB)型蛇绿岩^[11-12]、晚古生代洋岛玄武岩^[13-14]、二叠纪—中三叠世弧火山岩^[15-17], 以及晚古生代深海沉积^[18], 认为该分支洋盆延伸入滇桂两省交界及其与越南接壤地区^[3, 12]。Cai 等^[3]进一步研究提出, 滇琼缝合带(图 1-a)代表华南与印支地块汇聚拼合的位置, 其与 Song Ma 缝合带代表同一个洋盆系统, 后因新生代红河断裂活动而错位。Lepvrier 等^[19]和 Faure 等^[4]认为, Song Ma 缝合带被错断的部分是 Song Chay 缝合带(图 1-a)。近年

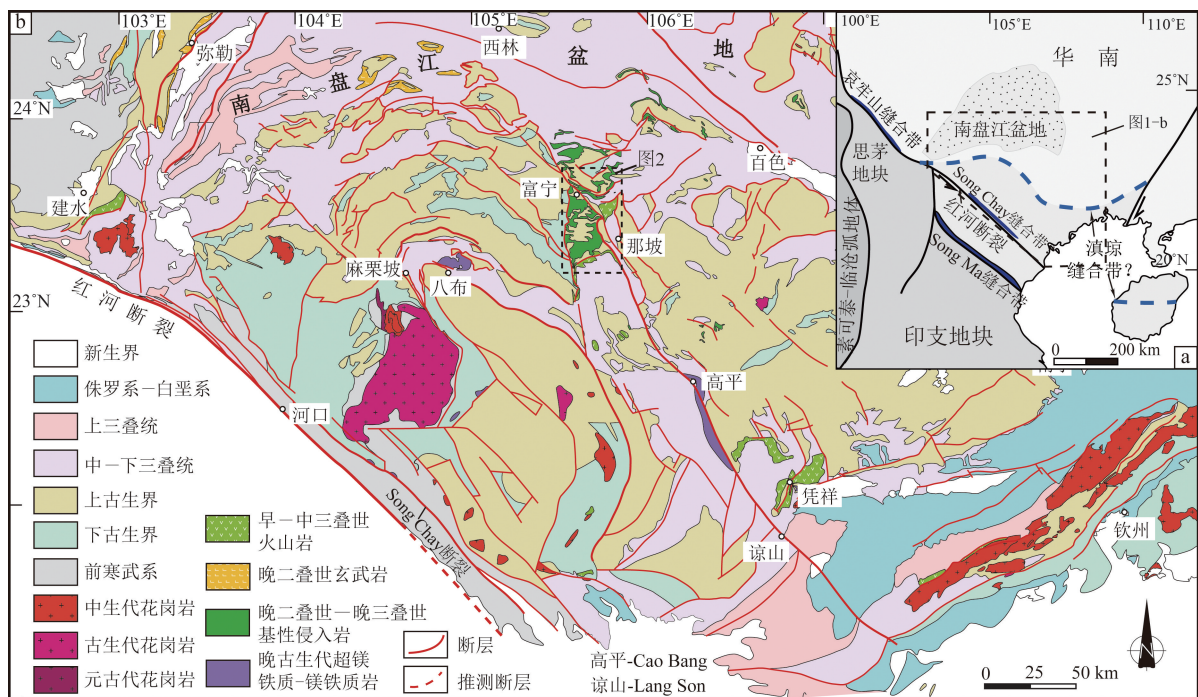


图 1 南盘江盆地南缘及邻区地质简图(a 据参考文献[1, 3-4]修改; b 据参考文献①②)

Fig. 1 Geological map of the southern margin in Nanpanjiang Basin and its adjacent area

来,学者对八布蛇绿岩^[20-21]和南盘江盆地晚古生代硅质岩^[22]的研究,以及 Halpin 等^[23]报道的越北 Cao Bang(高平)地区存在洋中脊型蛇绿岩,进一步表明中越边境地区存在晚古生代洋盆的可能。总体上,八布-Cao Bang 蛇绿岩是否代表分隔越北与华南的古特提斯分支洋盆,该洋盆消减闭合过程及其与 Song Ma 或 Song Chay 缝合带的关系仍存在争议^[2-4, 23]。

滇桂两省交界及其与越南接壤地区(以下简称中越边境地区)发育大量晚古生代末—早中生代火山—侵入岩及巨厚的三叠纪碎屑沉积(如南盘江盆地)(图 1-b),它们共同构成华南大陆南缘重要的晚古生代末—早中生代岩浆—沉积记录,是研究华南南缘构造演化及古特提斯分支洋盆演化的重要证据。富宁—那坡地区出露区内面积最大的晚二叠世—晚三叠世火山—侵入岩,前人对其中的基性岩墙开展了系统的年代学、地球化学和同位素地球化学研究。关于其成因和构造属性,存在与地幔柱相关、属于峨眉山大火成岩省的一部分^[24-25],与古特提斯分支洋盆俯冲相关^[16],或受地幔柱和古特提斯洋俯冲共同影响等不同认识^[26]。而对早—中三叠世火山岩的研究较少^[27],其成因和构造属性,以及与峨眉山大火成岩省的关系还需要进一步研究。本文在地质填图的基础上,将这套火山岩与其密切相关的沉积相结合,通过详细的剖面调查,建立早—中三叠世火山—沉积序列,结合火山岩地球化学特征,综合分析确定这套火山—沉积组合的形成构造环境,为华南大陆南缘晚古生代末—早中生代构造演化提供证据。

1 地质背景

研究区位于滇桂交界的富宁、那坡县境内,靠近中越边境地区。大地构造位置上,研究区位于华南大陆南缘南盘江盆地南缘(图 1),属于华南与印支地块汇聚拼合部位^[3, 12]。研究区主要出露上古生界和三叠系(图 1-b),其中泥盆系、石炭系和二叠系相对完整,普遍缺失志留系。南盘江盆地南缘发育一系列孤立的古碳酸盐岩台地,受其影响,区内地层岩相空间上变化较大^{③④}。1:5 万地质填图查明,总体上,寒武系和奥陶系主要出露于滇东南一带,以白云岩、白云质灰岩为主,夹少量粉砂质泥岩。滇东南一带泥盆系下部为富含生物化石的泥岩、粉砂质泥岩,上部为薄层硅质岩夹硅质泥岩,中间夹含生物碎

屑灰岩,石炭系和中—下二叠统为厚层碳酸盐岩,以生物碎屑灰岩和白云岩为主,局部下二叠统夹少量硅质岩,中—上二叠统为一套薄层凝灰岩夹泥岩组合,下三叠统以砂岩为主,局部相变为泥灰岩和砂屑灰岩;桂西一带泥盆系—下三叠统为一套相对连续、稳定的厚层碳酸盐岩沉积,岩性包括白云岩、生物碎屑灰岩、微晶灰岩等,富含海百合茎、腕足、珊瑚、筳类等化石。区内出露范围最广的中三叠统岩相相对单一,为一套细砂岩、粉砂质泥岩和泥岩组合,同时也是南盘江盆地充填的主体。受后期构造作用的影响,中三叠统与古生界多以断层接触。

研究区岩浆岩广泛发育(图 2),以辉绿岩、辉长

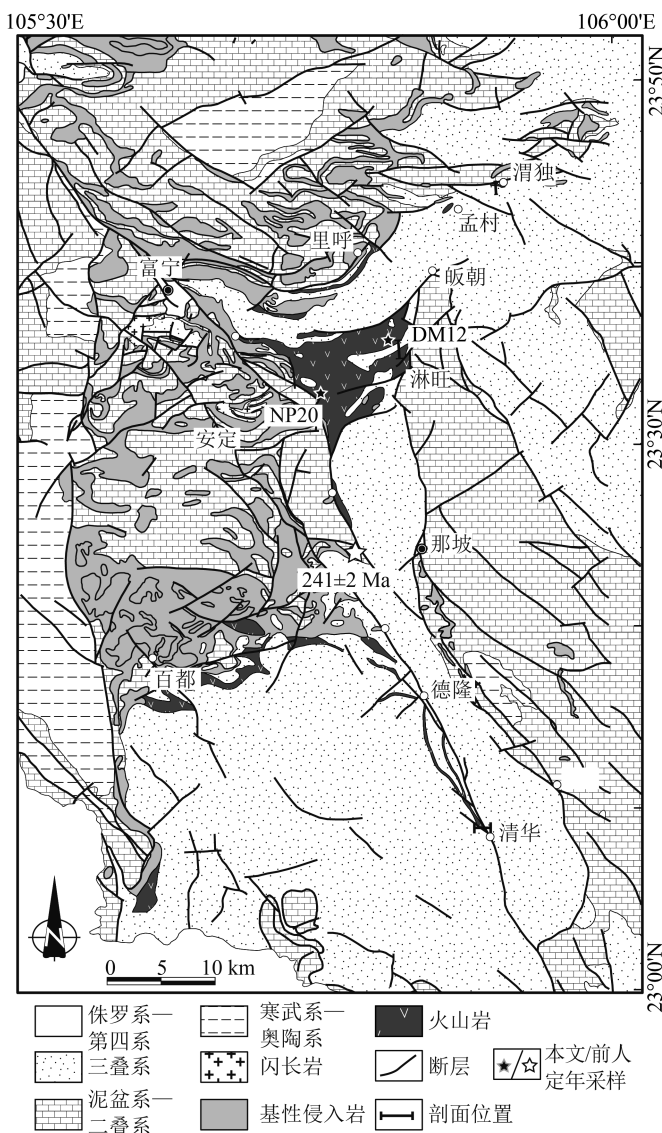


图 2 富宁—那坡地区地质简图^{③④}

Fig. 2 Simplified geological map of the Funing-Napo area

辉绿岩为主,少量苏长辉长岩、辉长岩和闪长岩^③。1:20万区域地质调查^③根据岩体间相互穿插关系,将其划分为3期:第一期为偏碱性辉长辉绿岩类侵入体(又名“半瓦型”岩体),第二期为安山玄武岩—凝灰岩等喷出岩和少量浅层侵入岩(又名“龙康型”喷出岩),第三期为苏长辉长岩类侵入岩(又名“安定型”岩体),基于侵入中三叠统百逢组的地质事实,认为3期岩浆岩均形成于中三叠世。Zhou等^[24]测得富宁一带辉长岩和闪长岩锆石U-Pb年龄约为260 Ma,认为该套岩浆岩形成于晚二叠世。近年来,笔者在富宁—那坡一带开展1:5万地质填图发现,绝大多数基性岩墙侵入到泥盆系—二叠系,个别岩体还侵入中—下三叠统,暗示其就位于中三叠世以后^[28]。同位素年代学研究^[29]也证实部分基性岩墙形成于晚三叠世(约215 Ma)。上述事实表明,区内中基性侵入岩是至少2期岩浆事件的产物。

区内还发育2期喷出岩,第一期时代为晚泥盆世—早石炭世,主要出露于那坡坡荷等地^④,为一套拉斑—碱性系列枕状玄武岩^[14];第二期时代为早—中三叠世,包括玄武岩、玄武安山岩和少量火山角砾岩,是区内主要喷出岩体,主体出露于富宁皈朝—登冒一带,其次沿那坡盆地北缘百都—德隆一线呈带状出露(图2)。笔者在研究区开展1:5万地质填图时发现,沿里呼—孟村—渭独一线也连续发育这套火山岩(图2),暗示区内火山岩实际发育体积可能远大于露头所见,部分被巨厚的中三叠统百逢组碎屑岩覆盖。

2 火山—沉积序列

富宁—那坡一带火山活动以溢流相为主,缺少爆发式喷发,火山活动产物主要为厚层块状熔岩,火山碎屑岩少。本次选取那坡清华、皈朝淋旺和渭独3条剖面(图2)进行测量,并建立火山—沉积序列。那坡清华剖面(图3)下部发育多层火山岩与砾岩,夹凝灰岩薄层。砾石主要为灰岩,少量火山岩(图版I-a)和硅质岩砾,具有块体流沉积特征^[30]。顶部火山岩发育枕

状构造,之上沉积一套泥灰岩、钙质粉砂岩,上覆中三叠统百逢组泥岩。淋旺剖面(图3)下部为块状和枕状玄武安山岩,其上为一套碳酸盐岩质砾岩,砾石主要为灰岩,少量黑色泥岩砾,胶结物为钙质粉砂含少量火山质,上部沉积中三叠统百逢组钙质砂岩和泥岩(图版I-b)。渭独剖面(图3)下部为砂岩、砂屑灰岩和砾岩组合,砾石主要为灰岩,砂屑灰岩发育交错层理(图版I-c),中部为枕状熔岩,上覆中三叠统百逢组泥岩、粉砂岩。

地质填图工作发现,局部熔岩边部发育少量自碎角砾岩,熔岩之上碳酸盐岩质砾岩呈透镜状发育,两者空间上延续性差。区域上,火山岩之上大多直接覆盖中三叠统碎屑岩(图版I-d),火山岩顶面起伏不平,接触带未见热蚀变现象。总体上,富宁—那坡一带火山—沉积序列自下而上为:块状(或枕状)熔岩、碳酸盐岩质砾岩、含砾粗砂岩、钙质砂岩和泥质粉砂岩。

火山岩发育块状和枕状构造,单个岩枕大小一般(50cm~100cm)×(30cm~60cm),枕间三角带充填浅绿色硅质岩(图版I-e)。局部火山岩发育气孔、杏仁构造,充填方解石。岩性以玄武安山岩为主,

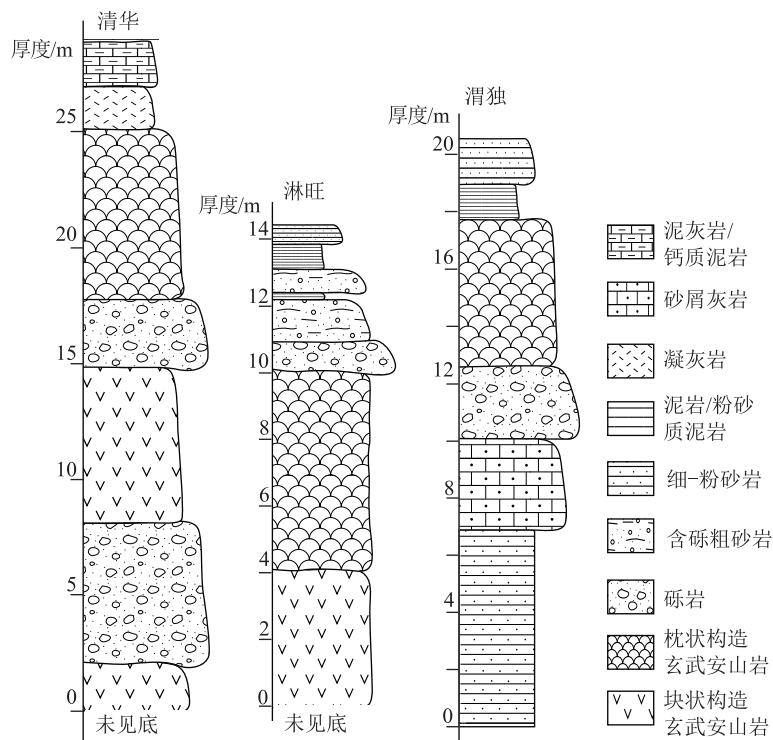
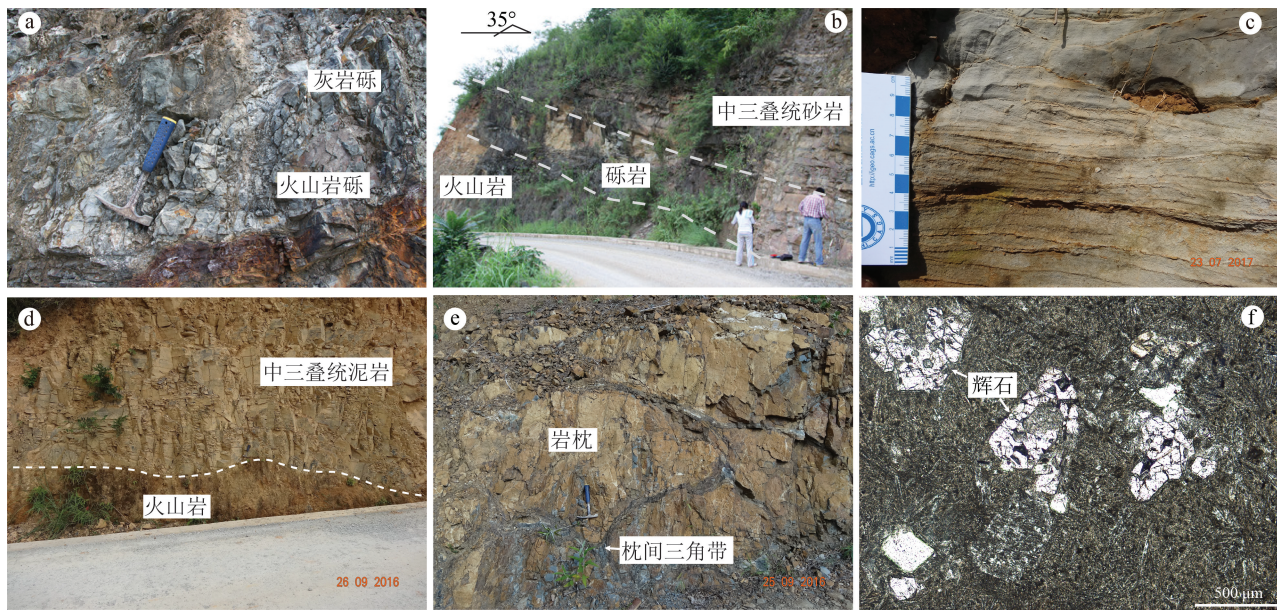


图3 富宁—那坡地区早—中三叠世火山—沉积序列

Fig. 3 The Early-Middle Triassic volcanic-sedimentary succession in the Funing-Napo area

图版 I Plate I



a. 清华剖面砾岩中的灰岩和火山岩砾; b. 淋旺剖面火山岩与上覆砾岩和砂岩接触关系; c. 渭独剖面砂屑灰岩发育交错层理; d. 皈朝登冒一带火山岩之上直接沉积中三叠统泥岩, 火山岩具起伏顶面; e. 枕状构造玄武安山岩, 枕间三角带充填浅灰绿色硅质岩; f. 火山岩斑状结构, 斑晶为辉石, 基质为辉石和斜长石微晶, 单偏光

少量玄武岩, 斑状结构, 辉石斑晶粒径约 1 mm (图版 I -f), 风化面见白色斜长石斑晶, 基质为斜长石和辉石微晶或隐晶结构, 部分样品发生绿泥石化蚀变。

3 分析方法

本次采集了皈朝淋旺 (DM12) 和那坡百隆 (NP20) (图 2) 2 件火山岩样品开展 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年。锆石挑选在河北省区域地质调查研究院地质实验中心完成, 锆石阴极发光 (CL) 照相和 SHRIMP U-Pb 定年在北京离子探针中心完成。实验流程和原理详见参考文献 [31]。采用标准锆石 M257 标定所测锆石的 U、Th 和 Pb 含量, 元素间的分馏校正利用澳大利亚国家地质调查局标准锆石 TEM (417 Ma^[32])。数据处理采用澳大利亚国立大学的 PRAWN 程序^[33]。普通铅根据实测²⁰⁴Pb 校正, 采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄的加权平均年龄值, 其误差为 2σ。

火山岩样品全岩主量、微量和稀土元素分析测试工作在国家地质实验测试中心完成。主量元素通过 XRF (X 荧光光谱仪 3080E) 方法测试, 分析精度为 5%。微量和稀土元素通过等离子质谱仪 (ICP-MS-Excell) 测试, 含量大于 10×10^{-6} 的元素的

测试精度为 5%, 含量小于 10×10^{-6} 的元素测试精度为 10%。

4 结果

4.1 锆石 U-Pb 定年结果

SHRIMP 锆石 U-Pb 定年分析结果见表 1。样品 NP20 中锆石呈自形短柱状, 粒径 70~120 μm, 阴极发光 (CL) 图像显示大部分锆石具有较宽的环带结构, Th/U 比值为 0.19~0.97, 暗示它们为岩浆结晶成因 (图 4)。共分析了 15 颗锆石, 结果显示 (表 1), U、Th 含量分别为 $212 \times 10^{-6} \sim 2912 \times 10^{-6}$ 和 $81 \times 10^{-6} \sim 2736 \times 10^{-6}$ 。剔除 2 个相对离散点 (点 9 和 11) 后, 剩余 13 个点的年龄加权平均值为 247 ± 1 Ma (MSWD = 1.4), 代表了结晶年龄。

样品 DM12 中锆石形态与 NP20 相似, 也呈自形短柱状, 发育较宽的环带, 粒径 70~150 μm, Th/U 值为 0.17~0.73, 暗示为岩浆结晶成因 (图 4)。分析了 12 颗锆石 (表 1), 其中点 12 和 13 分别为同一颗锆石的边、核部, CL 图像显示核部较暗、结构模糊, 表面年龄为 485 ± 7 Ma, 指示其为继承锆石。其他 13 个点的年龄加权平均值为 246 ± 3 Ma (MSWD = 1.7), 代表了结晶年龄。

表 1 富宁—那坡地区火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析结果

Table 1 SHRIMP zircon U-Pb data for the volcanic rocks in the Funing-Napo area

测点	Pb/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	%	误差相关 系数	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma	σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb 年龄/Ma	σ	不谐和度
NP20-1	—	473	152	0.33	0.2610	6.1	0.03951	1.1	0.173	250	3	95	140	-163
NP20-2	—	1329	1040	0.81	0.2679	2.4	0.03899	0.5	0.204	247	1	187	54	-32
NP20-3	—	652	134	0.21	0.2863	2.7	0.03944	0.7	0.252	249	2	313	58	20
NP20-4	0.16	287	150	0.54	0.2800	3.6	0.03932	1.0	0.277	249	2	267	80	7
NP20-5	—	212	105	0.51	0.2570	7.3	0.03931	1.2	0.161	249	3	68	170	-265
NP20-6	—	887	689	0.80	0.2798	2.6	0.03873	0.8	0.301	245	2	302	56	19
NP20-7	—	441	81	0.19	0.2310	8.7	0.03835	0.9	0.105	243	2	-131	210	285
NP20-8	—	1020	630	0.64	0.2733	2.5	0.03904	0.6	0.239	247	1	231	56	-7
NP20-9	—	2912	2736	0.97	0.2840	1.5	0.04024	0.4	0.242	254	1	249	33	-2
NP20-10	—	521	102	0.20	0.2717	3.2	0.03890	0.7	0.231	246	2	225	72	-9
NP20-11	—	471	291	0.64	0.2662	3.1	0.03778	0.8	0.252	239	2	246	69	3
NP20-12	—	749	424	0.58	0.2849	2.6	0.03914	0.9	0.341	248	2	320	56	23
NP20-13	—	654	120	0.19	0.2630	3.8	0.03934	0.7	0.174	249	2	123	88	-102
NP20-14	—	294	179	0.63	0.2550	9.6	0.03821	1.1	0.113	242	3	118	230	-105
NP20-15	—	212	137	0.67	0.2570	4.2	0.03852	1.1	0.260	244	3	122	96	-99
DM12-1	0.16	459	325	0.73	0.2884	3.1	0.03914	1.6	0.529	248	4	348	60	29
DM12-2	—	1251	739	0.61	0.2760	2.6	0.03850	1.7	0.649	244	4	285	45	15
DM12-3	—	264	177	0.69	0.2630	4	0.03745	1.7	0.431	237	4	239	83	1
DM12-4	—	263	120	0.47	0.2500	6	0.03861	2.1	0.342	244	5	45	140	-438
DM12-5	—	172	74	0.45	0.2480	6.9	0.03989	1.9	0.276	252	5	-50	160	603
DM12-6	—	1559	703	0.47	0.2702	2.5	0.03934	1.6	0.617	249	4	186	46	-34
DM12-7	—	518	323	0.64	0.2747	2.7	0.03837	1.9	0.688	243	4	282	45	14
DM12-8	—	214	103	0.50	0.2420	4.9	0.03828	1.8	0.368	242	4	-11	110	2262
DM12-9	—	843	583	0.71	0.2924	2.8	0.04062	2.0	0.723	257	5	295	44	13
DM12-10	—	1118	605	0.56	0.2819	3	0.03996	1.6	0.532	253	4	248	58	-2
DM12-11	—	222	103	0.48	0.2790	4.5	0.04011	1.8	0.401	254	5	215	95	-18
DM12-12	—	820	135	0.17	0.2620	8.1	0.03813	1.6	0.203	241	4	190	180	-27
DM12-13	0.06	936	147	0.16	0.6700	1.9	0.07820	1.6	0.823	485	7	679	23	28
DM12-14	0.08	748	493	0.68	0.2796	2.3	0.03896	1.6	0.689	246	4	288	38	14

4.2 全岩地球化学

分析结果(表 2)表明,富宁—那坡地区火山岩总体具有较低的 TiO₂ (0.81%~0.93%)、Al₂O₃ (14.19%~15.83%)、Fe₂O₃ (8.67%~9.17%) 和 Na₂O 含量 (2.00%~3.05%), 较高的 MgO (4.83%~6.87%)。SiO₂ 含量变化大,介于 51.46%~59.66% 之间。除样品 13DM-2 和 13DM-3 个具有较低的 K₂O 含量 (0.11%~0.21%) 外,其余样品 K₂O 含量介于 0.73%~2.58% 之间,属于中钾-高钾钙碱性系

列玄武安山岩、安山岩(表 2;图 5)。在主量元素 Harker 图解(图 6)上,Al₂O₃、TFe₂O₃、MgO、CaO、Na₂O 与 SiO₂ 呈负相关,K₂O 与 SiO₂ 呈正相关,暗示可能经历了辉石和斜长石的结晶分离。

富宁—那坡地区火山岩稀土元素总量为 92.90×10⁻⁶~173.12×10⁻⁶。在稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 7-a)上,样品具有一致的配分曲线,显示略陡倾的轻稀土元素(LREE)、相对平坦的重稀土元素(HREE)配分曲线,轻、重稀土元素分异弱,

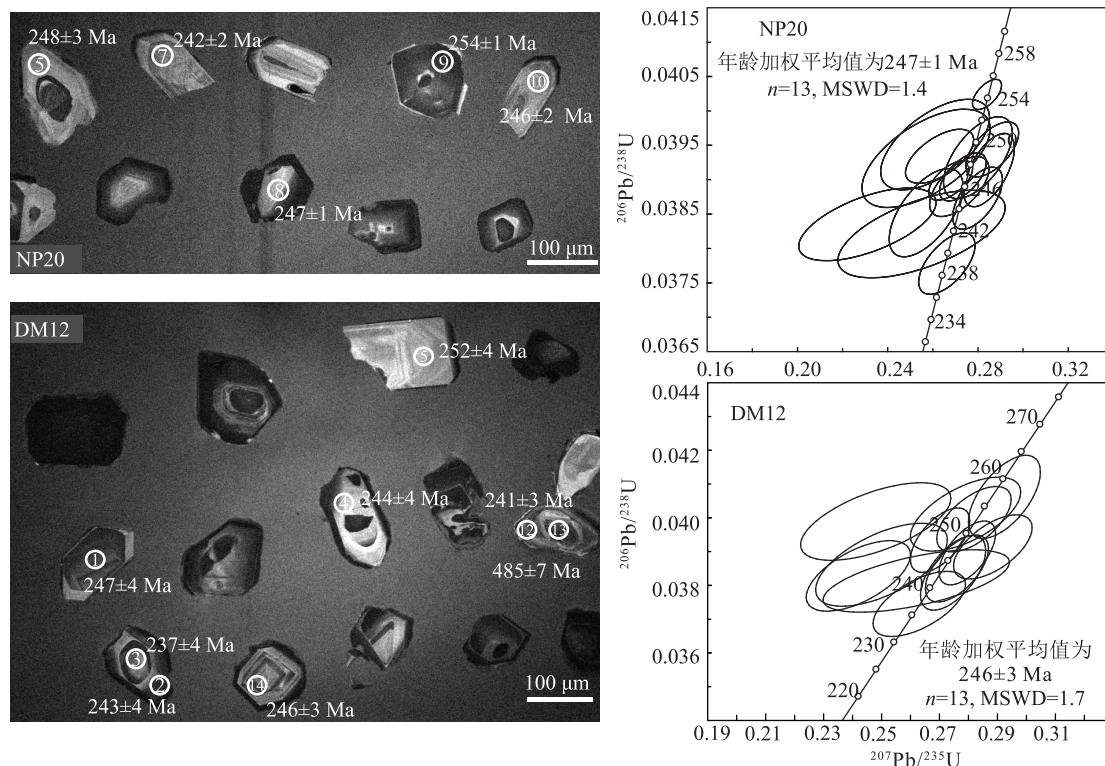


图4 富宁—那坡地区早—中三叠世火山岩锆石阴极发光(CL)图像和U-Pb谐和图

Fig. 4 The CL images and concordia plots of the zircon SHRIMP U-Pb dating for the volcanic rocks in the Funing-Napo area

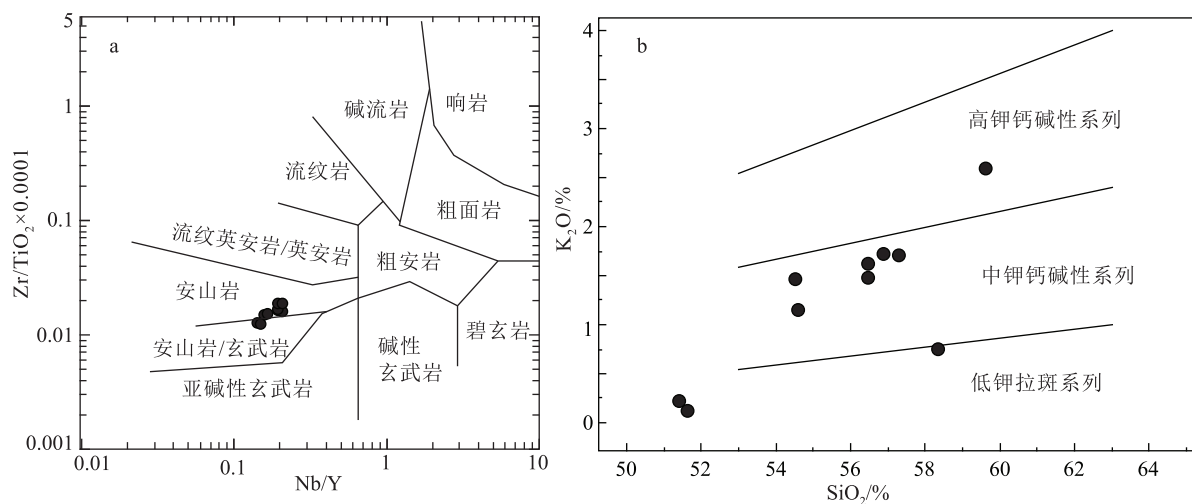


图5 富宁—那坡地区早—中三叠世火山岩 Nb/Y-Zr/TiO₂×0.0001 (a)^[34] 和 SiO₂-K₂O 图解 (b)^[35]

Fig. 5 Diagrams of Nb/Y-Zr/TiO₂×0.0001 (a) and SiO₂-K₂O (b) for the Early-Middle Triassic volcanic rocks in the Funing-Napo area

(La/Yb)_N值介于3.1~4.8之间,具有弱负Eu异常($\delta\text{Eu}=0.59\sim0.77$)。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图7-b)上,样品相对富集大离子亲石元素(LILEs)、

Rb、Th和U,亏损高场强元素(HFSEs),具有显著的Nb、Ta和Ti负异常。Sr和Eu负异常,表明岩浆演化过程中发生过斜长石的结晶分离作用。

表 2 富宁—那坡地区火山岩全岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Major, trace element and REE contents of the volcanic rocks in the Funning-Napo area

元素	11NP21	11NP21	11NP21	11NP21	GCH	GCH	13DM	13DM	13DB	14WD	元素	11NP21	11NP21	11NP21	11NP21	GCH	GCH	13DM	13DM	13DB	14WD
	-2	-3	-4	-5	-2	-4	-2	-3	-7	-4		-2	-3	-4	-5	-2	-4	-2	-3	-7	-4
SiO ₂	56.50	57.32	56.91	56.49	54.64	54.57	51.68	51.46	59.66	58.37	Hf	4.39	4.2	3.96	4.46	3.55	3.42	3.23	3.21	5.27	5.74
TiO ₂	0.84	0.86	0.81	0.84	0.87	0.88	0.87	0.89	0.93	0.93	Ta	0.52	0.51	0.51	0.52	0.4	0.42	0.43	0.41	0.7	0.7
Al ₂ O ₃	14.79	14.76	14.65	14.83	14.69	14.88	15.20	15.83	14.19	14.55	Co	33	31.2	30	34	37.9	39	38.1	39.7	26.6	26.9
TFe ₂ O ₃	9.01	8.58	8.78	9.17	9.10	9.12	9.16	8.95	8.78	8.67	U	2.16	2.15	1.98	2.05	1.74	1.78	1.71	1.8	3.35	2.65
MnO	0.13	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.16	0.13	0.12	La	20.8	20.1	18.9	19.8	16.6	16.5	17.3	15.9	32.1	23.6
MgO	6.56	6.07	6.43	6.75	6.71	6.87	6.47	6.59	4.83	5.08	Ce	41.8	40.5	39.2	40.5	34.4	33.6	35.6	33.2	66.0	47.2
CaO	8.41	8.44	8.49	7.86	9.89	8.98	13.71	12.77	6.23	9.06	Pr	4.97	4.96	4.73	5.00	4.20	4.21	4.64	4.03	8.09	5.75
Na ₂ O	2.05	2.05	2.00	2.36	2.72	3.00	2.54	3.05	2.56	2.35	Nd	21.2	20.5	20.1	20.5	17.4	17.1	19.0	17.0	31.8	24.2
K ₂ O	1.60	1.70	1.70	1.46	1.13	1.45	0.11	0.21	2.57	0.73	Sm	4.95	4.64	4.56	4.84	4.14	3.91	4.56	4.00	7.00	5.81
P ₂ O ₅	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.12	0.12	Eu	0.99	1.02	0.97	0.99	1.11	1.10	1.11	0.98	1.41	1.40
烧失量	1.91	1.75	2.24	1.81	2.78	2.86	3.00	3.27	2.11	3.19	Gd	5.37	5.20	4.79	5.31	4.84	4.95	4.86	4.31	6.98	6.87
Mg [#]	59	59	59	60	60	60	59	60	52	54	Tb	0.92	0.88	0.83	0.87	0.77	0.78	0.86	0.77	1.20	1.10
Ba	302	270	273	248	330	467	37.4	44.3	451	151	Dy	5.74	5.63	5.39	5.71	4.88	4.76	5.34	4.91	7.19	7.17
Rb	61.8	68.4	64.3	57.3	37.6	50.8	3.29	5.25	115	39.9	Ho	1.21	1.16	1.15	1.20	1.04	1.04	1.16	0.98	1.50	1.37
Sr	144	154	136	120	145	179	137	148	106	123	Er	3.70	3.49	3.34	3.64	3.05	3.25	3.51	3.07	4.53	4.42
Y	32	32.3	29	32.3	33.5	34.1	34.3	32.6	41.3	37.6	Tm	0.51	0.52	0.50	0.51	0.44	0.43	0.49	0.45	0.63	0.59
Zr	140	141	128	139	129	134	110	110	171	173	Yb	3.40	3.46	3.23	3.41	2.97	2.79	3.35	2.87	4.09	3.95
Nb	6.41	6.35	6.03	6.29	5.35	5.68	4.94	4.92	7.99	7.9	Lu	0.53	0.51	0.51	0.53	0.43	0.42	0.50	0.43	0.60	0.60
Th	9.47	9.24	8.75	9.26	7.82	7.83	8.27	7.22	15.4	12.6	ΣREE	116.09	112.57	108.20	112.81	96.27	94.84	102.28	92.90	173.12	134.03
Pb	9.66	9.98	11.5	12.5	7.8	9.16	9.66	11.2	11.9	13.2	δEu	0.59	0.64	0.63	0.60	0.76	0.77	0.72	0.72	0.61	0.68
Ni	63.6	58.9	54.3	63	60.6	50.5	59.1	65.2	40.2	47.2	(La/ Yb) _N	3.7	3.5	3.6	3.5	3.4	3.6	3.1	3.4	4.8	3.6
V	177	169	160	174	215	223	198	210	141	162											
Cr	297	260	260	284	227	243	206	222	173	206											

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10⁻⁶

5 讨 论

5.1 火山岩形成时代

基于火山岩野外产出关系,1:20 万区域地质调查工作^③将这套火山岩厘定为中三叠世,但缺少可靠的同位素年龄证据。Zhou 等^[24]测得富宁附近辉长岩和闪长岩的锆石 U-Pb 年龄约为 260 Ma,认为富宁—那坡地区中基性岩浆岩形成于晚二叠世。胡丽沙等^[27]获得那坡鱼塘玄武安山岩(图 2)锆石 U-Pb 年龄为 241±2 Ma,属于中三叠世。区域地质调查和实测剖面显示,该套火山岩发育于下三叠统石炮组和中三叠统百逢组之间,表明其时代应该为早—中三叠世。本次对其开展 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年,获得的 2 个年龄 247±1 Ma 和 246±3 Ma 在误差范围内一致,进一步证实该套火山岩于早—中三叠世喷发就位。

5.2 岩石成因

富宁—那坡地区火山岩微量元素原始地幔标准化蛛网图相对富集 LILE 和 LREE,具明显的 Nb、Ta 和 Ti 负异常(图 7),暗示岩浆源区有地壳物质的加入或岩浆上升过程中发生了地壳混染。岩浆上升过程中如果遭受了地壳混染,会造成不活动元素和活动元素比值降低,如 Nb/La、Nb/U 和 Ce/Pb 值的降低,ε_{Nd}(t)值与 MgO 呈良好的线性关系。那坡—富宁火山岩的 Nb/U 和 Ce/Pb 值分别为 2.39~3.19 和 2.96~5.55,低于大洋玄武岩(Nb/U=47±10, Ce/Pb=25±5^[37]),与大陆地壳值相近(Nb/U=7~10, Ce/Pb=4^[38])。但 Nb/U 值低于大陆地壳值, Nb/La 值与 SiO₂之间(图 8-a)、ε_{Nd}(t)值(另文发表)与 MgO 无明显的线性相关关系,表明岩浆上升过程中未遭受明显的地壳混染。

富宁—那坡地区火山岩具有较高的 Y(29.0×

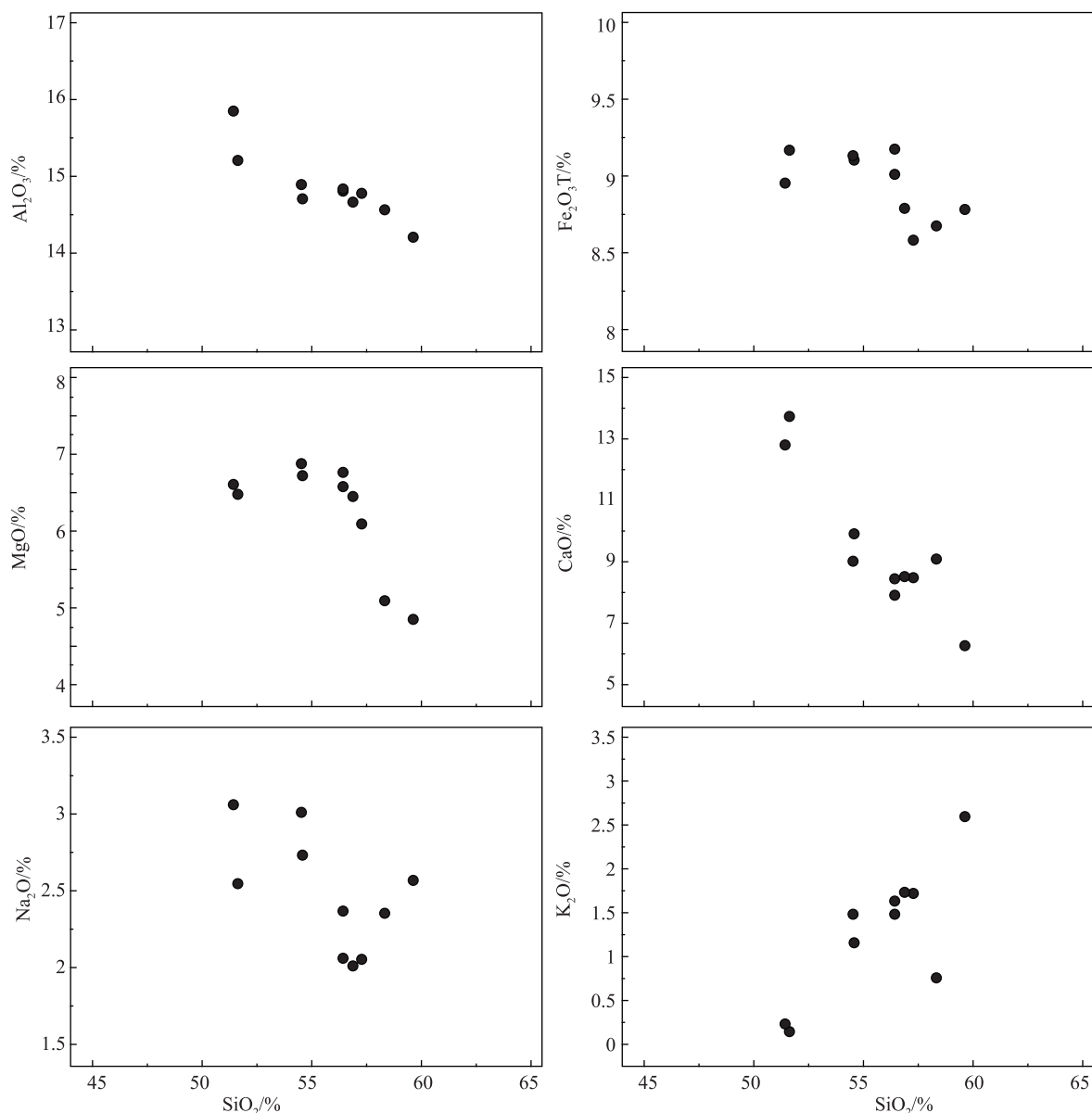


图6 富宁—那坡地区早—中三叠世火山岩 Harker 图解

Fig. 6 Harker diagrams of the Early-Middle Triassic volcanic rocks in the Funing-Napo area

$10^{-6} \sim 41.3 \times 10^{-6}$) 和 Yb 含量 ($2.79 \times 10^{-6} \sim 4.09 \times 10^{-6}$), 低的 Sr 含量 ($106 \times 10^{-6} \sim 179 \times 10^{-6}$)、Sr/Y ($2.57 \sim 5.25$) 和 $(La/Yb)_N$ 值 ($3.1 \sim 4.8$), 与岛弧岩浆岩的特征相似 (图 8-b) [39]。较低的 TiO_2 和 TFe_2O_3 含量, 与难熔地幔部分熔融实验产生的熔体成分类似 (图 8-c) [40-43], 暗示岩浆源区为相对难熔的地幔。古老的岩石圈地幔是典型的难熔地幔, 同时, 其在原始地幔标准化图上具有 Nb、Ta 的负异常 [44]。富宁—那坡地区火山岩相对高的 La/Sm 和低的 Sm/

Yb 值 (图 8-d), 暗示它们可能来自大陆岩石圈地幔部分熔融 [42]。通常, 微量元素原始地幔标准化蛛网图上具有 Nb、Ta 负异常, 较高的 LILE/HFSE 值, 被解释为俯冲相关流体或熔体进入难熔地幔后的结果 [45]。富宁—那坡地区早—中三叠世火山岩具有高 Pb、Y、Th/La (>0.7) 值, 低 Sr/Y 和 $(La/Yb)_N$ 值特征, 证实岩浆生成过程中有俯冲洋壳流体或沉积物熔体加入到地幔源区 [46-47]。相对低的 Ba/La (<20) 和高的 Th/Yb ($1.8 \sim 3.8$) 值, 暗示俯冲洋壳沉

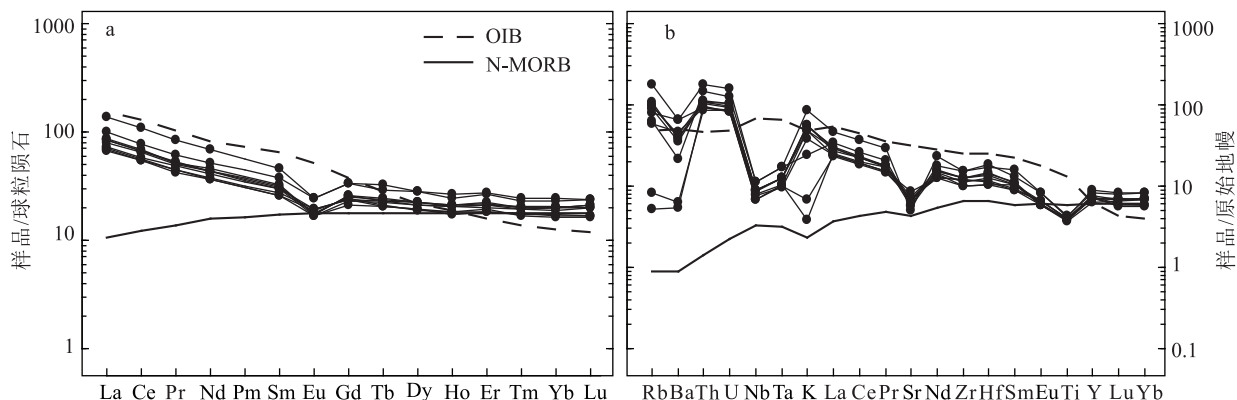


图 7 富宁—那坡地区早—中三叠世火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)(球粒陨石、原始地幔、洋岛玄武岩(OIB)和正常洋中脊玄武岩(N-MORB)值据参考文献[36])

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized spider diagram(b) for the Early-Middle volcanic rocks in the Funing-Napo area

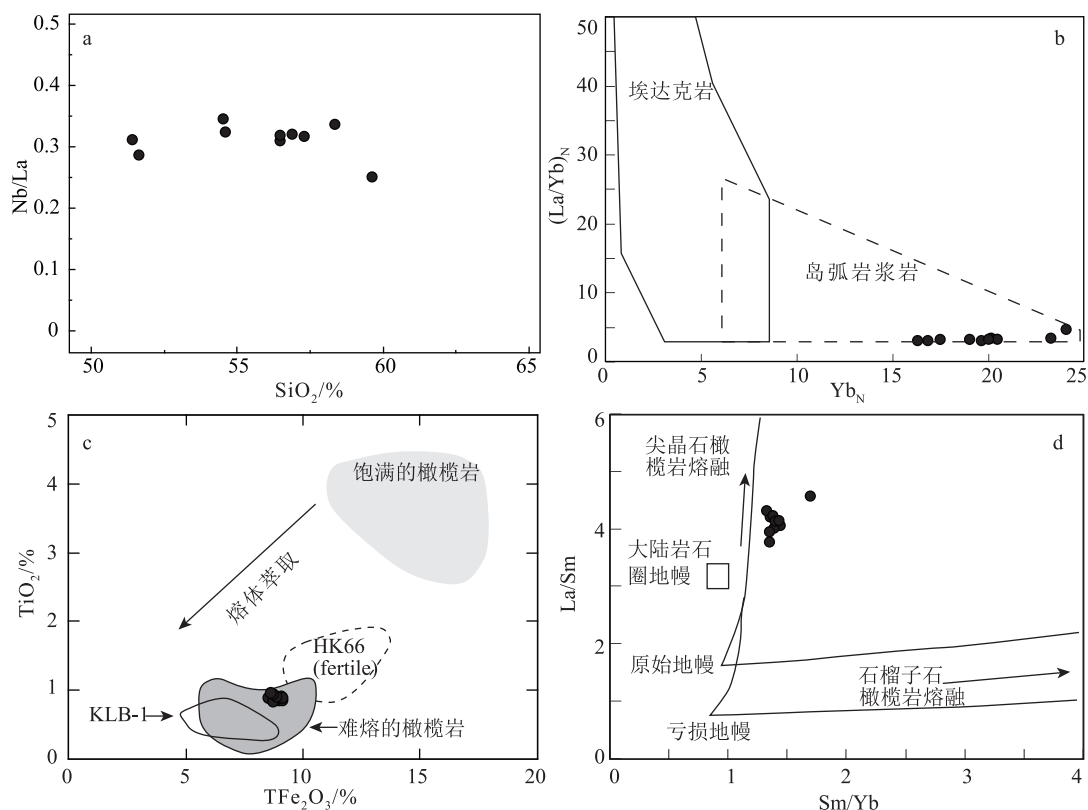


图 8 富宁—那坡地区早—中三叠世火山岩 SiO_2 -Nb/La(a)、 Yb_N -(La/Yb)_N(b)、 TiFe_2O_3 -TiO₂(c)和 Sm/Yb-La/Sm(d)图解 (b 据参考文献[39], c 图中橄榄岩值据参考文献[40-41], d 据参考文献[42])

Fig. 8 Diagrams of SiO_2 -Nb/La(a), Yb_N -(La/Yb)_N(b), TiFe_2O_3 -TiO₂(c) and Sm/Yb-La/Sm(d) for the Early-Middle Triassic volcanic rocks in the Funing-Napo area

积物熔体相对于流体是主要的交代介质。因此,富宁—那坡地区火山岩可能源自受俯冲洋壳沉积物熔体和流体交代的岩石圈地幔部分熔融。

5.3 形成环境

富宁—那坡地区早—中三叠世火山岩富集 LILE、相对亏损 Nb、Ta 和 Ti(图 7),具有类似岛弧

火山岩的地球化学特征。在 $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Ta}/\text{Yb}$ 图(图9)上,所有样品点都落入火山弧玄武岩区域^[48],表明它们可能形成于与俯冲相关的弧环境。利用 Zr 含量和 Zr/Yb 值可以有效判断具有岛弧特征的火山岩是形成于岛弧或活动陆缘环境,还是大陆板内玄武岩受到地壳或岩石圈混染,呈现类似“岛弧”玄武岩的特征。岛弧玄武岩总体具有较低的 Zr 含量($<130 \times 10^{-6}$)和 Zr/Y 值(<4)^[49]。富宁—那坡地区早—中三叠世火山岩 Zr 含量为 $110 \times 10^{-6} \sim 173 \times 10^{-6}$,平均值为 137×10^{-6} , Zr/Yb 值为 $3.2 \sim 4.6$,平均值为 4,与上述岛弧玄武岩特征相似,表明它们形成于岛弧或活动陆缘环境。

地质填图和剖面实测查明,研究区火山岩属于水下喷发就位,火山岩之上大多直接覆盖中—上三叠统砂岩,局部火山岩凹地发育一套碳酸盐岩质砾岩和含砾粗砂岩。而在火山岩隆起边缘斜坡或底部,发育碳酸盐岩碎屑流和块体流沉积,局部与火山岩互层状产出(图3)。岩相学研究表明,这套碳酸盐岩沉积中含火山碎屑^[30]。上述碳酸盐岩沉积特征和火山—沉积序列与岛弧环境中的碳酸盐岩沉积特征相似^[50-52],也暗示早—中三叠世火山岩形成于与俯冲相关的环境。综上所述,全岩地球化学、火山—沉积序列和相关沉积学证据都指示,富宁—那坡地区早—中三叠世火山岩形成于与俯冲相关

的弧环境。

5.4 地质意义

前文已述, Lepvrier 等^[19]和 Faure 等^[4]认为,滇东南八布超镁铁质—镁铁质岩不属于蛇绿岩组合,并根据 Song Chay 构造带中识别出的蛇绿岩认为,古特提斯分支洋盆沿 Song Chay 和 Song Ma 缝合带闭合,两者原来为一条缝合带,被后期走滑断裂错断到现今的位置。但上述质疑是基于 Hoa 等^[53]对越南东北部高平(Cao Bang)晚古生代玄武岩的研究结果,缺少直接的证据。近年来,学者对滇东南八布和越南东北部 Cao Bang 晚古生代超镁铁质—镁铁质岩系统的岩石学、地球化学和同位素地球化学研究,进一步证实它们是蛇绿岩组合^[20-21, 23]。同时,结合南盘江盆地的硅质岩^[22]研究成果,表明中越边境一带可能存在一个晚古生代(328~270 Ma)洋盆。该洋盆是属于哀牢山缝合带代表的古特提斯分支洋盆南延部分^[3, 11-12],还是华南大陆南缘拉伸背景下形成的局限小洋盆^[23, 54],还需要进一步研究。

关于该洋盆的俯冲消减过程,多数学者基于越南东北部发育的一系列北—北东向逆冲推覆构造认为,其向南俯冲于印支地块之下^[3, 55-57],也有学者认为其向北俯冲于扬子地块之下^[54, 58]。大洋板块俯冲消减过程中,在汇聚板块边缘通常形成海沟、俯冲—增生杂岩、弧前盆地、火山—岩浆弧等地质体^[59]。地质填图工作^[20]查明,滇东南八布蛇绿岩呈岩块形式构造就位于三叠系细—粉砂岩和泥岩中。越南东北部 Cao Bang 一带,除超镁铁质—镁铁质岩外,还出露晚二叠世—早三叠世流纹岩、花岗岩和碳酸盐岩^[53],这些不同类型的岩石也以岩块形式裹挟于三叠系细碎屑岩中。Halpin 等^[23]通过系统的野外地质调查表明,不同岩块间及岩块与围岩碎屑岩间均为断层接触,提出该套组合属于构造混杂带。空间上,该构造混杂带向北西方向延伸到中国境内,与八布蛇绿岩相连(图1-b),上述构造混杂带基质为中—下三叠统复理石^[19]沉积^[60]。碎屑锆石年代学研究表明,八布—Cao Bang 构造混杂岩带细碎屑岩具有相似的碎屑锆石年龄谱,最主要和最年轻的2组峰值年龄为 285~265 Ma^[23, 61]和 255~245 Ma(未发表数据),表明二叠纪和早—中三叠世岩浆活动是其主要的物源供给。它们与其中的蛇绿岩残片及其他岩块构成了与俯冲相关的蛇绿混杂岩带。空间上,八布—Cao Bang 蛇绿混杂岩带位于由那

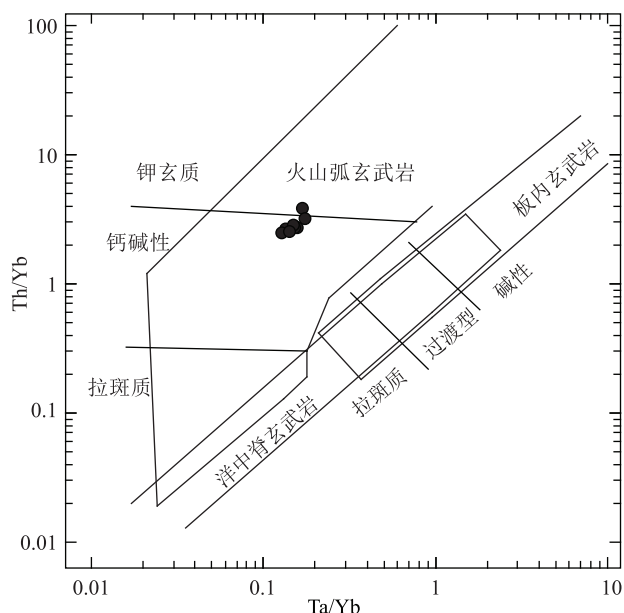


图9 富宁—那坡地区早—中三叠世火山岩 $\text{Ta}/\text{Yb}-\text{Th}/\text{Yb}$ 图解^[48]

Fig. 9 Diagram of $\text{Ta}/\text{Yb}-\text{Th}/\text{Yb}$ for the Early-Middle Triassic volcanic rocks in the Funing-Napo area

坡—富宁早—中三叠世中基性火山岩和凭祥早三叠世酸性火山岩构成的弧火山岩带南侧,暗示该洋盆可能向北俯冲消减。由于 Song Chay 缝合带中蛇绿岩缺少相应的年代学、岩石学和地球化学证据^[4],其与八布—Cao Bang 蛇绿混杂岩带的关系还待进一步研究。

6 结 论

(1)富宁—那坡地区中基性火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄约为 247 Ma,与其野外产于中三叠统百逢组之下的地质事实相符,结合前人研究结果,确定其形成于早—中三叠世(247~242 Ma)。

(2)富宁—那坡地区早—中三叠世火山—沉积组合总体具有下部为玄武安山岩、上覆碳酸盐岩质砾岩、含砾粗砂岩和钙质砂岩的沉积序列;玄武安山岩富集 LILE 和 LREE,具有显著的 Nb、Ta 和 Ti 的负异常,表明这套火山—沉积组合形成于弧环境。

(3)中越边界地区八布—Cao Bang 蛇绿混杂岩带和富宁—那坡—凭祥早—中三叠世弧火山岩空间展布特征表明,该晚古生代洋盆发生了向北的俯冲消减。

致谢:中国科学院大学江文、周斌和邓莉,广西区域地质调查研究院彭展和覃斌贤工程师,成都理工大学李伟歌、羊洪志等参加了野外地质填图和剖面测量工作;SHRIMP 锆石 U-Pb 定年分析工作得到了北京离子探针中心董春燕和杨淳老师的帮助;中国地质科学院地质研究所张进研究员和审稿专家对本文提出了宝贵意见,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] Sone M, Metcalfe I. Parallel Tethyan sutures in mainland Southeast Asia: New insights for Palaeo-Tethys closure and implications for the Indosinian orogeny[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2008, 340(2): 166-179.
- [2] Metcalfe I. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 66: 1-33.
- [3] Cai J, Zhang K. A new model for the Indochina and South China collision during the Late Permian to the Middle Triassic[J]. *Tectonophysics*, 2009, 467(1): 35-43.
- [4] Faure M, Lepvrier C, Nguyen V V, et al. The South China block - Indochina collision: Where, when, and how? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 260-274.
- [5] Jian P, Liu D, Kröner A, et al. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China(I): Geochemistry of ophiolites, arc/back - arc assemblages and within - plate igneous rocks[J]. *Lithos*, 2009, 113(3/4): 748-766.
- [6] Jian P, Liu D, Kröner A, et al. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China(II): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/back - arc assemblages and within - plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province [J]. *Lithos*, 2009, 113(3/4): 767-784.
- [7] Lai C, Meffre S, Crawford A J, et al. The Central Ailaoshan ophiolite and modern analogs[J]. *Gondwana research*, 2014, 26(1): 75-88.
- [8] Findlay R H, Trinh P T. The Structural Setting of the Song Ma Region, Vietnam and the Indochina - South China Plate Boundary Problem[J]. *Gondwana Research*, 1997, 1(1): 11-33.
- [9] Liu J, Tran M, Tang Y, et al. Permo-Triassic granitoids in the northern part of the Truong Son belt, NW Vietnam: Geochronology, geochemistry and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(2): 628-644.
- [10] Zhang R Y, Lo C H, Chung S L, et al. Origin and tectonic implication of Ophiolite and Eclogite in the Song Ma Suture Zone between the South China and Indochina Blocks[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2013, 31: 49-62.
- [11] 鍾大賚, 吳根耀, 季建清, 等. 滇東南發現蛇綠岩[J]. *科學通報*, 1998, (13): 1365-1370.
- [12] Genyao W, Dalai Z, Qi Z, et al. Babu - Phu Ngu Ophiolites: A Geological Record of Paleotethyan Ocean Bordering China and Vietnam[J]. *Gondwana Research*, 1999, 2(4): 554-557.
- [13] 王忠誠, 吳浩若, 邝國敦. 桂西晚古生代海相玄武岩的特征及其形成环境[J]. *岩石学报*, 1997, (2): 135-140.
- [14] Guo F, Fan W, Wang Y, et al. Upper Paleozoic Basalts in the Southern Yangtze Block: Geochemical and Sr - Nd Isotopic Evidence for Asthenosphere - Lithosphere Interaction and Opening of the Paleo - Tethyan Ocean[J]. *International Geology Review*, 2004, 46(4): 332-346.
- [15] 董云鹏, 朱炳泉. 滇东南建水岛弧型枕状熔岩及其对华南古特提斯的制约[J]. *科学通报*, 1999, (21): 2323-2328.
- [16] 吳根耀, 吳浩若, 鍾大賚, 等. 滇桂交界处古特提斯的洋岛和岛弧火山岩[J]. *现代地质*, 2000, (4): 393-400.
- [17] 吳根耀, 季建清, 何順東, 等. 广西凭祥地区早二叠世的岩浆弧及其构造意义[J]. *矿物岩石*, 2002, (3): 61-65.
- [18] 吳浩若. 晚古生代—三叠纪南盘江海的构造古地理问题[J]. *古地理学报*, 2003, 5(1): 63-76.
- [19] Lepvrier C, Faure M, Van V N, et al. North-directed Triassic nappes in Northeastern Vietnam (East Bac Bo) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 56-68.
- [20] 張斌輝, 丁俊, 張林奎, 等. 滇東南八布蛇綠岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. *地质学报*, 2013, 87(10): 1498-1509.
- [21] Liu H C, Peng T, Guo X. Geochronological and geochemical constraints on the coexistent N-MORB and SSZ-type ophiolites in Babu area (SW China) and tectonic implications [J]. *Journal of the Geological Society*, 2018, 175: 667-678.

- [22] 黄虎, 杜远生, 黄志强, 等. 桂西晚古生代硅质岩地球化学特征及其对右江盆地构造演化的启示[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(02): 304–316.
- [23] Halpin A J, Thanh T H, Chun - Kit L, et al. U - Pb zircon geochronology and geochemistry from NE Vietnam: A tectonically disputed territory between the Indochina and South China blocks[J]. *Gondwana Research*, 2016, 34: 254–273.
- [24] Zhou M F, Zhao J H, Qi L, et al. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd isotope geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing area, SW China [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 151(1): 1–19.
- [25] Huang H, Du Y, Yang J, et al. Origin of Permian basalts and clastic rocks in Napo, Southwest China: Implications for the erosion and eruption of the Emeishan large igneous province [J]. *Lithos*, 2014, 208/209: 324–338.
- [26] 陈雪峰, 刘希军, 许继峰, 等. 桂西那坡基性岩地球化学: 峨眉山地幔柱与古特提斯俯冲相互作用的证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2016, 40(3): 531–548.
- [27] 胡丽沙, 杜远生, 杨江海, 等. 广西那龙地区中三叠世火山岩地球化学特征及构造意义[J]. *地质论评*, 2012, 58(3): 481–494.
- [28] 江文, 向忠金, 夏文静, 等. 滇东南富宁地区基性侵入岩与峨眉山地幔柱存在成因关系吗?——来自 1:5 万洞波幅和航磁地质填图的证据[J]. *岩石学报*, 2017, 33(10): 3109–3122.
- [29] 皮桥辉, 胡瑞忠, 彭科强, 等. 云南富宁者桑金矿床与基性岩年代测定——兼论滇黔桂地区卡林型金矿成矿构造背景[J]. *岩石学报*, 2016, 32(11): 3331–3342.
- [30] 夏磊, 闫全人, 向忠金, 等. 广西那坡盆地火山岩-碳酸盐岩混杂型滑塌堆积: 特殊的弧前域构造指相标志及其大地构造意义[J]. *岩石学报*, 2018, 34(3): 685–700.
- [31] Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, et al. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale [J]. *Journal of the Geological Society*, 1992, 149(2): 171–184.
- [32] Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect: SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards [J]. *Chemical Geology*, 2004, 205(1/2): 115–140.
- [33] Williams I S, Buick I S, Cartwright I. An extended episode of early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1996, 14(1): 29–47.
- [34] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chemical Geology*, 1977, 20: 325–343.
- [35] Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A Classification and Glossary of Terms [M]. Blackwell, Oxford, 1989: 1–193.
- [36] Sun S S, McDonough M F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society Special Publication*, 1989, 42: 313–345.
- [37] Hofmann A W, Jochum K P, Seufert M, et al. Nb and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1986, 79(1): 33–45.
- [38] Rudnick R L, Gao S. Composition of the Continental Crust [J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 3: 1–64.
- [39] Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids [J]. *Lithos*, 1999, 46(3): 411–429.
- [40] Falloon T J, Green D H, Hatton C J, et al. Anhydrous partial melting of a fertile and depleted peridotite from 2 to 30 kbar and application to basalt petrogenesis [J]. *Journal of Petrology*, 1988, 29(6): 1257–1282.
- [41] Hirose K, Kushiro I. Partial melting of dry peridotites at high pressures: Determination of compositions of melts segregated from peridotite using aggregates of diamond [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 114(4): 477–489.
- [42] Xiao L, Xu Y G, Mei H J, et al. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: implications for plume-lithosphere interaction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 228(3/4): 525–546.
- [43] Hirose K. Melting experiments on Iherzolite KLB-1 under hydrous conditions and generation of high-magnesian andesitic melts [J]. *Geology*, 1997, 25(1): 42–44.
- [44] Wu F, Walker R J, Yang Y, et al. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(19): 5013–5034.
- [45] Kepezhinskas P, McDermott F, Defant M J, et al. Trace element and Sr+Nd+Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica acta*, 1997, 61(3): 577–600.
- [46] Woodhead J D, Hergt J M, Davidson J P, et al. Hafnium isotope evidence for ‘conservative’ element mobility during subduction zone processes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192(3): 331–346.
- [47] Hanyu T, Tatsumi Y, Nakai S, et al. Contribution of slab melting and slab dehydration to magmatism in the NE Japan arc for the last 25 Myr: Constraints from geochemistry [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2006, 7(8): 1–29.
- [48] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [C] // Thorpe R S. *Andesites*. London: John Wiley & Sons, 1982: 525–548.
- [49] Xia L. The geochemical criteria to distinguish continental basalts from arc related ones [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 139: 195–212.
- [50] Watkins R. Volcaniclastic and carbonate sedimentation in late Paleozoic island-arc deposits, Eastern Klamath Mountains, California [J]. *Geology*, 1985, 13: 709–713.
- [51] Soja C. Island-arc carbonates: characterization and recognition in the ancient geologic record [J]. *Earth-science reviews*, 1996, 41(1/2): 31–65.
- [52] Dorobek S. Carbonate-platform facies in volcanic-arc settings: Characteristics and controls on deposition and stratigraphic development [J]. *The Geological Society of America Special Paper*, 2007, 436: 1–36.
- [53] Hoa T T, Izokh A E, Polyakov G V, et al. Permo-Triassic magmatism

- and metallogeny of Northern Vietnam in relation to the Emeishan plume[J]. Russian Geology and Geophysics, 2008, 49(7): 480–491.
- [54] Qin X F, Wang Z Q, Zhang Y L, et al. Geochemistry of Permian mafic igneous rocks from the Napo–Qinzhou Tectonic Belt in Southwest Guangxi, Southwest China: Implications for Arc – back arc basin magmatic evolution[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(5): 1182–1199.
- [55] 吴根耀, 马力, 钟大赉, 等. 滇桂交界区印支期增生弧型造山带: 兼论与造山作用耦合的盆地演化[J]. 石油实验地质, 2001(1): 8–18.
- [56] 陈泽超, 林伟, Michel F, 等. 越南东北部早中生代构造事件的年代学约束[J]. 岩石学报, 2013, 29(5): 1825–1840.
- [57] 杜远生, 黄虎, 杨江海, 等. 晚古生代—中三叠世右江盆地的格局和转换[J]. 地质论评, 2013, 59(1): 1–11.
- [58] 覃小锋, 王宗起, 张英利, 等. 桂西南早中生代酸性火山岩年代学和地球化学: 对钦—杭结合带西南段构造演化的约束[J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 794–808.
- [59] Condie K C. Plate tectonics and crustal evolution [M]. Pregmon Press, Oxford, 1997.
- [60] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [61] 杨江海, 杜远生, 于鑫, 等. 滇东南八布早二叠世含火山岩屑砂岩指示古特提斯洋俯冲[J]. 地球科学, 2017, 42(1): 24–34.
- ① Geology and Earth Resource of Viet Nam. Geological map of Viet Nam (1 : 3500000). Publishing House for Science and Tectnology, Ha Noi, 2011.
- ② 中国地质调查局武汉地质调查中心. 1 : 1000000 中南地质图. 2012.
- ③ 云南省地质局. 1 : 20 万富宁幅地质图及区域地质调查报告. 1978.
- ④ 广西壮族自治区地质局. 1 : 20 万百色幅, 德隆幅地质图及区域地质调查报告. 1976.

《地质通报》第 40 卷第 2~3 期要目预告

海上丝绸之路沿线深水油气资源勘探方向	王建强等
国际海洋地质领域研究发展态势分析	吴秀平等
南黄海盆地崂山隆起 CSDP-2 井中—古生界海相地层吸附烃类气体成因类型与源区特征	李双林等
南黄海盆地下古生界油气地质条件与勘探前景	张鹏辉等
印支运动在南黄海盆地的响应及其对油气地质条件的影响	梁杰等
西太平洋维嘉海山漂移历史和沉降过程	韦振权等
下扬子区海相古生界高成熟烃源岩评价指标的优选	赵青芳等
中太平洋海盆富稀土沉积层及其声学特征研究	王海峰等
海南三亚海域沉积物分布特征及其沉积环境指示	张亮等
海南南部沿海地下水水文地球化学及成因	习龙等
南海北部陆坡聚集流体活动系统及其对天然气水合物成藏的指示意义	张旭东等
富钴结壳关键元素赋存状态与富集机理的研究进展	邓贤泽等
西太平洋海底多金属结核空间分布与多波束回波强度关系	马金凤等
东帝汶海槽断裂特征与构造演化模式	魏新元等
海山富钴结壳矿床三维评价模型应用	刘永刚等
土耳其海洋油气勘探开发现状及合作潜力分析	吴林强等
天然气水合物储层岩心保压转移与测试进展	刘乐乐等
渤海湾某海洋平台场址浅层气分布与成因研究	周其坤等
基于便携式 X 射线荧光光谱法的深海沉积物现场成分快速检测及适用性估	黄威等