

滇中甸中地区中二叠世晚期镁铁—超镁铁质 岩体特征及其与峨眉地幔柱关系

——来自锆石 U-Pb 年龄及岩石地球化学证据

刘军平^{1,2)}, 王晓峰¹⁾, 王小虎^{1,2)}, 杨爱平^{1,2)}, 宋冬虎¹⁾,
田素梅¹⁾, 夏彩香¹⁾, 张坤¹⁾, 杨仕潘¹⁾

1) 云南省地质调查院, 昆明, 650216;

2) 国土资源部三江成矿作用及资源勘查利用重点实验室, 昆明, 650051

内容提要: 通过 1:5 万区域地质调查, 在峨山县甸中地区新发现了镁铁—超镁铁质碱性岩体, 其岩性为含石榴磷灰辉石岩及正长辉长岩。岩石地球化学表明, 该岩体 SiO₂ 含量为 (42.74% ~ 45.11%), 普遍具有高 MgO (8.78% ~ 11.13%)、富铁 (全铁含量)、低 TiO₂ (0.88% ~ 2.45%), 低 Na₂O (0.17% ~ 0.62%)、富碱的特征; 富集 Rb、Ba、Sr、Th 等大离子亲石元素 (LILE), 相对亏损 Nb、Zr、Ti、Hf 等高场强元素 (HFSE) 及重稀土元素 Yb、Y; 岩浆形成过程中中等的部分熔融程度 (约 10% ~ 15%), 且后期经历了明显的结晶分异作用。对辉石岩及辉长岩进行锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年, 年龄分别为 260.2 ± 1.6 Ma (MSWD = 0.4, n = 10) 和 264.0 ± 1.3 Ma (MSWD = 2.4, n = 23), 属中二叠世晚期, 与峨眉山玄武岩具有相似的地球化学特征及侵位年龄。结合区域资料及上述特征, 本文认为, 峨山县甸中地区镁铁—超镁铁质碱性岩体应属于峨眉山地幔柱活动产物, 是峨眉山玄武岩的侵入相, 代表了峨眉山玄武岩的一个分枝柱头; 本次的发现, 对丰富峨眉山大火成岩省资料具有重要的意义。

关键词: 峨眉山玄武岩; 镁铁—超镁铁; 地幔柱; 分枝柱头; 滇中地区

“峨眉山玄武岩”1928年由赵亚曾在四川峨眉山命名, 时代属中二叠世晚期至晚二叠世早期, 因其具有大陆溢流玄武岩的性质, 又被称为峨眉山大火成岩省, 主要分布在川西、云南、贵州及昌都等地。大批学者在峨眉山玄武岩空间分布、厚度变化、喷发时限、岩相学特征、地球化学特征、古地磁特征、源区性质、岩石成因、岩浆演化、岩浆温度、成矿作用、大陆增生、大陆裂解和熔融深度, 以及与二叠纪生物大灭绝的关系等方面取得重要认识和突破 (侯增谦等, 1999; 宋谢炎等, 2001, 2002; 何斌等, 2003, 2006; 张招崇等, 2006; 张招崇, 2009; Sun Yadong et al., 2010; 肖龙等, 2003; 朱江等, 2011; Liu Chengying et al., 2012; 秦亚等, 2018; 莫宣学, 2019)。

传统“峨眉山玄武岩”岩石组合可分早、中、晚三个旋回, 分别由碱性玄武岩、大陆拉斑玄武岩和酸性凝灰岩组成, 随着对峨眉山玄武岩研究的深入, 普

遍认为峨眉山玄武岩是地幔柱活动产物 (Xu Yigang et al., 2001, 2004; Zhang Zhaochong et al., 2008, 2009; Zheng Liandi et al., 2010; Gregory, 2014)。峨眉山玄武岩除了上述分布广泛的喷出岩外, 峨眉山玄武岩还包括侵入岩类岩石, 如宾川—丽江地区、大理邓川—凤仪一带及金平地区, 单个岩体规模不大, 但常成群、成带出现基性—超基性岩类 (朱士飞等, 2006; 易立文等, 2014; 刘德民等, 2019)。在富宁地区, 亦有大量的陆内拉斑—偏碱性系列基性侵入岩, 均属于二叠纪地史时期 (~260 Ma) 地幔柱形成的峨眉山玄武岩的范畴^{①②}, 这些发现极大的改变了峨眉山玄武岩传统认识; 由此峨眉山玄武岩岩石组合到底包括哪些岩石类型? 是目前地学界必须研究的课题之一。

笔者等首次在易门—罗茨断裂以西区域甸中镇大龙潭乡一带发现镁铁—超镁铁质碱性岩体, 目前

注: 本文为云南省 1:5 万撒马基幅、因民幅、贵城幅、舒姑幅区域地质调查 (编号: D201905)、云南 1:5 万二街、易门、鸣矣河、上浦贝幅区域地质调查 (编号: DD20160017)、云南区域地质调查片区总结与服务产品开发 (编号: 121201102000150012-02) 的成果。

收稿日期: 2019-12-31; 改回日期: 2020-06-24; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.05.015

作者简介: 刘军平, 男, 1983年生, 高级工程师, 硕士, 主要从事区域地质与构造地质调查研究; Email: 271090834@qq.com。通讯作者: 王晓峰, 男, 1985年生, 工程师, 硕士, 从事岩石学、构造方向与区域地质研究; Email: 1045503848@qq.com。

并未有类似岩体的报道,岩性为深灰色含石榴磷灰辉石岩及灰绿色正长辉长岩。本文报道了镁铁—超镁铁质岩体锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄、地球化学特征、岩浆演化及讨论了与峨眉山大火成岩省的关系。结合已有区域相关资料,我们的新发现对丰富峨眉山大火成岩省资料具有重要的意义。

1 岩体地质和岩相学特征

研究区位于滇中峨山县甸中地区,位于扬子陆块区之上扬子古陆块的康滇基底断隆带,主要分布在绿汁江断裂以西及易门—罗茨断裂以东区域,地层区划隶属华南地层大区扬子地层区康滇地层分区之昆明地层小区(图 1)。研究区出露地层有中元古界昆阳群黑山头组(Pt_2hs)、富良棚组(Pt_2f)、大龙口组(Pt_2d)、美党组(Pt_2m),三叠系干海子组(T_3g)、舍资组(T_3s)及侏罗系禄丰群(J_1l)(图 1)。

中元古界昆阳群为一套浅变质的陆源碎屑—碳酸盐岩—火山岩建造;三叠系干海子组(T_3g)为一套河湖相含煤碎屑岩建造,三叠系舍资组(T_3s)为一套湖泊砂岩—粉砂岩组合;侏罗系禄丰群(J_1l)为一套潮湿—干旱气候环境的红色碎屑岩建造^①。

镁铁—超镁铁质岩体位于峨山县甸中镇大龙潭乡(图 1),地理坐标为东经:102°07'01",北纬:24°25'13"。行政区划属甸中镇大龙潭乡管辖,甸中镁铁—超镁铁质岩岩体呈岩株状产出,出露面积约 1.5 km²,围岩为中元古界昆阳群大龙口组(Pt_2d)及中元古代碱闪霓石正长岩体(锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄为 1007 ± 10 Ma,刘军平,待刊)(图 2a,f)。中部被北北西向断裂切割,铁镁—超镁铁质岩体岩性以深灰色含石榴磷灰辉石岩为主少量灰绿色正长辉长岩,两者岩石成分从较超基性向基性变化,岩石结构上由细粒向粗粒演化,变化的有序性和单向性明

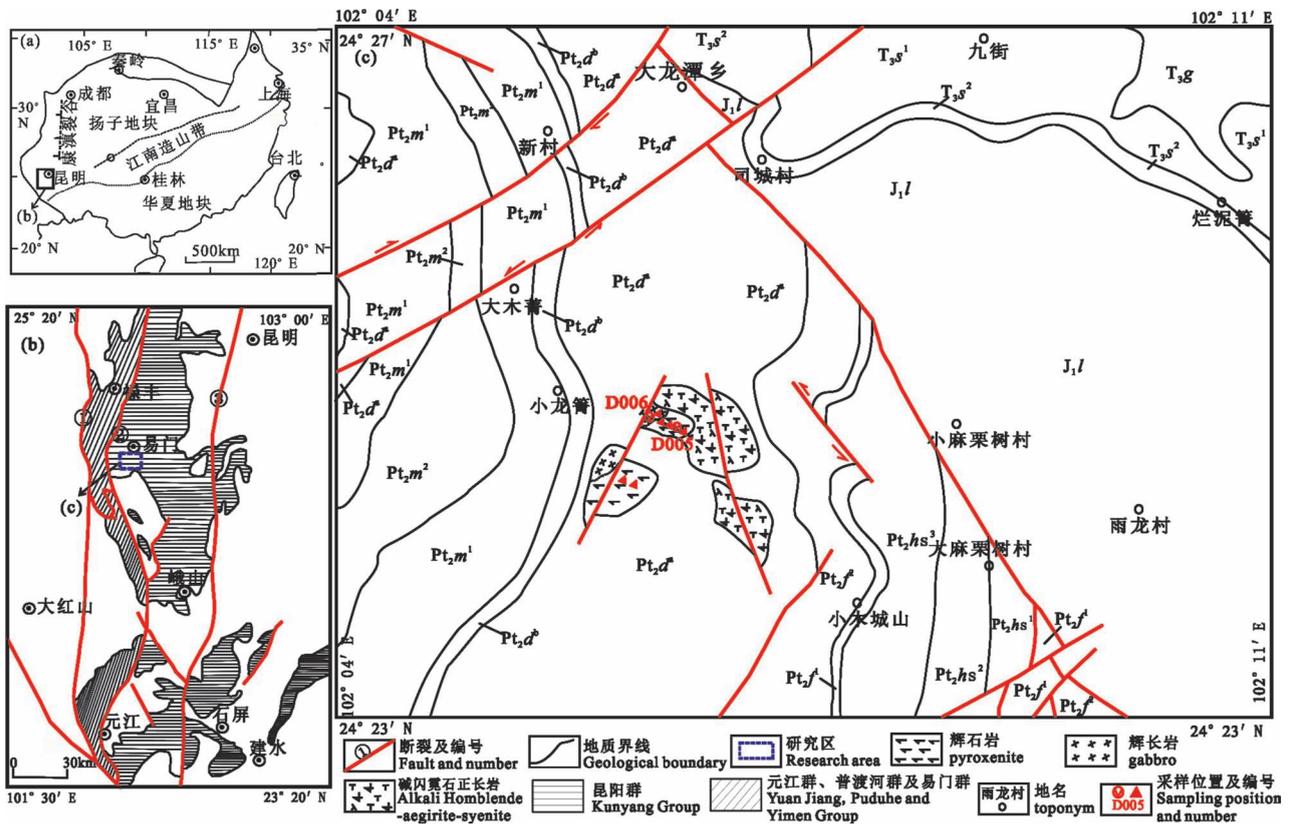


图 1 云南甸中地区大地构造位置图(a,b)、地质简图及采样点(c)

Fig. 1 Geotectonic location map (a, b) and simplified geological map (c) of Dianzhong area, Yunnan

J_1l —下侏罗统禄丰群; T_3s —上三叠统舍资组; T_3g —上三叠统干海子组; 中元古界昆阳群: Pt_2m —美党组, Pt_2d —大龙口组,

Pt_2f —富良棚组, Pt_2hs —黑山头组; ①—绿汁江断裂; ②—易门—罗茨断裂; ③—普渡河断裂

J_1l —Lower Jurassic Lufeng Group; T_3s —Upper Triassic Shezi Formation; T_3g —Upper Triassic Qianhaizi Formation; Mesoproterozoic Kunyang Group; Pt_2m —Meidang Formation, Pt_2d —Dalongkou Formation, Pt_2f —Fuliangpeng Formation, Pt_2hs —Heishantou Formation; ①—Luzhijiang fault; ②—Yimen—Luoci fault; ③—Puduhe fault

显,且在空间上紧密共生,形成时间、成分及结构变化上表现出清楚的亲缘和演化关系,说明它们是同一岩浆热事件的产物,野外两者为渐变过渡接触,整

个岩体由中心至边部矿物颗粒由中粒变为细粒,围岩普遍角岩化(图1),岩石受后期构造影响仅发生碎裂岩化、绢云母化。本次采集较新鲜的深灰色含

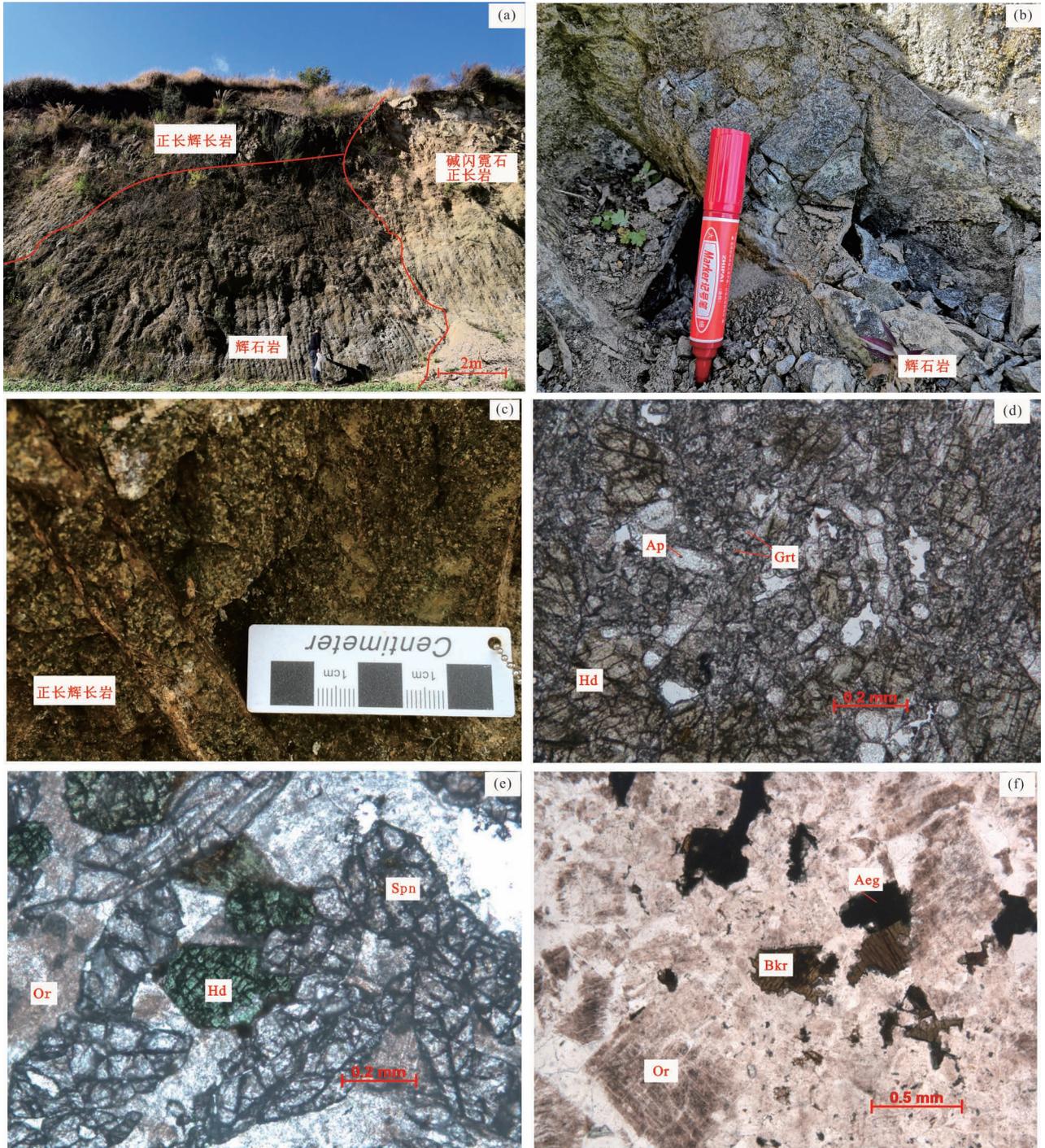


图2 云南甸中地区镁铁—超镁铁质岩野外露头(a)、手标本(b,c)、显微照片(d,e)及中元古代碱闪霓石正长岩显微照片(f)

Fig. 2 Outcrop photo(a), hand specimen (b,c) and micrograph (d, e) of the mafic—ultramafic rocks and Mesoproterozoic alkali hornblende—aegirite—syenite micrograph(f) in Dianzhong area, Yunnan

Ap—磷灰石;Grt—石榴子石;Hd—钙铁辉石;Spn—榍石;Or—正长石;Aeg—霓石;Bkr—棕闪石
Ap—apatite;Gr—gamet;Hd—hedenbergite;Spn—sphene;Or—orthoclase;Aeg—aegirine;Bkr—barkevicite

石榴磷灰辉石岩 (D005) 及正长辉长岩 (D006) 进行薄片、地球化学及同位素分析。

深灰色含石榴磷灰辉石岩 (D005): 岩石具不等粒半自形—自形短柱状结构, 块状构造, 主要矿物为钙铁辉石 (90% ~ 93%), 次要矿物为正长石 (4% ~ 6%), 副矿物磷灰石 (5% ~ 8%)、石榴子石 (少) 等。钙铁辉石粒径大小不等, 为 0.3 ~ 3 mm, 半自形—自形短柱状、粒状, 横切面为板状八边形, 多色性弱, N_g —黄绿色, N_p —浅黄绿色, 正高突起, 最高干涉色达二级绿, 多数纵切面为斜消光, $c \wedge N_g = 47^\circ \sim 48^\circ$, 二轴晶正光性, 光轴角中等; 钾长石呈他形充填于钙铁辉石间隙中, 强烈黏土化; 磷灰石 0.1 ~ 0.5 mm, 自形长柱状、粒状, 正中突起, 干涉色一级灰, 平行消光; 石榴子石粒径 0.05 ~ 0.1 mm, 无色, 正高突起, 糙面明显, 全消光, 见不规则裂纹。镜下特

征见图 2b、2d。

灰绿色正长辉长岩 (D006): 岩石具辉长结构向他形—半自形细粒粒状结构过渡, 块状构造, 主要矿物为钙铁辉石 (50% ~ 55%)、正长石 (32% ~ 35%), 次要矿物为斜长石 (0 ~ 3%)、黑云母 (1% 左右), 副矿物榍石 (8% ~ 10%)、磷灰石 (少) 等。其中钙铁辉石粒径多在 0.5 ~ 1.5 mm 间, 半自形—自形短柱状、粒状, 横切面近八边形, 见两组辉石式解理, 多色性不明显, N_g —绿色、黄绿色, N_p —浅绿色, 正高突起, 最高干涉色达二级绿, 横切面对称消光, 多数纵切面为斜消光, $c \wedge N_g = 47^\circ$ 左右, 二轴晶正光性, 光轴角中等; 正长石多呈他形充填于钙铁辉石间隙中, 部分为半自形, 强烈黏土化; 斜长石 0.3 ~ 0.8 mm, 半自形板状—他形粒状, 黏土化, 隐约见聚片双晶; 黑云母半自形—自形片状, 强烈铁化, 隐约见一

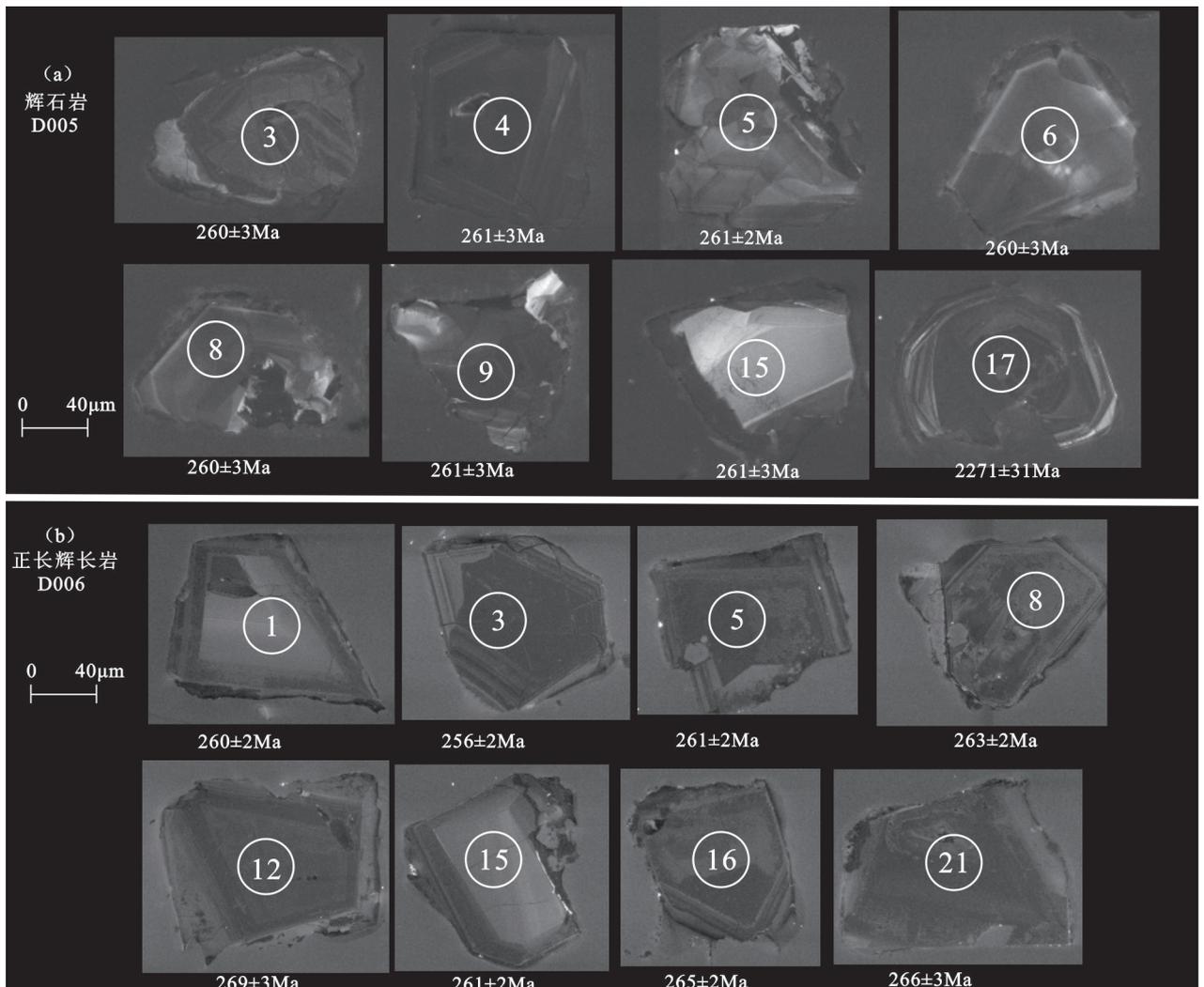


图 3 云南甸中地区镁铁—超镁铁质岩代表性锆石阴极发光 (CL) 图像

Fig. 3 The CL images of zircons from the mafic—ultramafic rocks in Dianzhong area, Yunnan

表 1 云南甸中地区镁铁—超镁铁质岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析表
 Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of Zircons from the mafic—ultramafic rocks in Dianzhong area, Yunnan

测点号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄 (Ma)						谐和度 (%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	
辉石岩, D005, E102°07'01", N24°25'13"																	
1	343	196	208	0.9	0.1873	0.0039	13.31	0.2956	0.5153	0.0056	2720	35	2702	21	2679	24	99
2	169	688	771	0.9	0.0568	0.0018	0.5512	0.0182	0.0703	0.0008	487	70	446	12	438	5	98
3	218	1582	1409	1.1	0.0514	0.0016	0.2922	0.0094	0.0412	0.0004	261	72	260	7	260	3	99
4	185	1221	1550	0.8	0.0529	0.0018	0.3012	0.0098	0.0414	0.0004	324	71	267	8	261	3	97
5	379	2784	2280	1.2	0.0492	0.0015	0.2804	0.0082	0.0413	0.0004	167	70	251	7	261	2	96
6	325	1785	3593	0.5	0.0506	0.0013	0.2873	0.0070	0.0412	0.0005	233	57	256	6	260	3	98
7	588	3993	3783	1.1	0.0531	0.0013	0.3474	0.0082	0.0474	0.0005	332	56	303	6	298	3	98
8	381	3040	2574	1.2	0.0511	0.0013	0.2914	0.0076	0.0412	0.0004	243	59	260	6	260	3	99
9	320	2365	2533	0.9	0.0553	0.0016	0.3165	0.0091	0.0413	0.0005	433	63	279	7	261	3	93
10	216	1477	2014	0.7	0.0556	0.0017	0.3179	0.0092	0.0413	0.0004	435	69	280	7	261	3	92
11	636	375	579	0.6	0.1584	0.0028	10.22	0.1933	0.4643	0.0044	2439	29	2455	18	2458	20	99
12	877	3327	14364	0.2	0.0547	0.0011	0.3070	0.0063	0.0405	0.0004	398	44	272	5	256	3	93
13	1067	2113	13607	0.2	0.0559	0.0010	0.4714	0.0124	0.0611	0.0014	450	45	392	9	382	9	97
14	347	2720	2449	1.1	0.0530	0.0014	0.3025	0.0079	0.0413	0.0004	332	29	268	6	261	3	97
15	1651	15596	5745	2.7	0.0512	0.0010	0.2938	0.0064	0.0414	0.0005	250	44	262	5	261	3	99
16	1246	351	1574	0.2	0.1936	0.0034	13.56	0.2496	0.5057	0.0044	2773	29	2720	18	2638	19	96
17	556	317	723	0.4	0.1436	0.0026	8.089	0.1542	0.4067	0.0039	2271	31	2241	17	2200	18	98
正长辉长岩, D006, E102°07'01", N24°25'13"																	
1	48	1293	834	1.6	0.0530	0.0010	0.3018	0.0057	0.0412	0.0003	328	44	268	4	260	2	97
2	111	5010	1583	3.2	0.0551	0.0013	0.3195	0.0067	0.0420	0.0003	417	50	282	5	265	2	94
3	213	10808	2586	4.2	0.0527	0.0008	0.3072	0.0047	0.0420	0.0003	322	35	272	4	265	2	97
4	114	5618	1510	3.7	0.0523	0.0009	0.3051	0.0052	0.0420	0.0003	298	41	270	4	265	2	98
5	99	4289	1725	2.5	0.0527	0.0009	0.3011	0.0049	0.0413	0.0003	322	39	267	4	261	2	97
6	88	3577	1352	2.6	0.0515	0.0007	0.2941	0.0041	0.0410	0.0003	261	33	262	3	259	2	99
7	28	685	506	1.4	0.0516	0.0011	0.2938	0.0062	0.0410	0.0003	333	48	262	5	259	2	99
8	63	1929	1046	1.8	0.0510	0.0008	0.2944	0.0047	0.0416	0.0003	239	32	262	4	263	2	99
9	69	1955	1138	1.7	0.0531	0.0010	0.3084	0.0061	0.0418	0.0004	332	38	273	5	264	2	96
10	64	2083	1051	2.0	0.0510	0.0009	0.2953	0.0049	0.0417	0.0003	243	34	263	4	263	2	99
11	32	808	575	1.4	0.0511	0.0011	0.2961	0.0062	0.0418	0.0003	256	48	263	5	264	2	99

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		谐和度 (%)
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	
12	54	1214	1035	1.2	0.0525	0.0010	0.3099	0.0058	0.0426	0.0004	3.09	43	274	5	269	2	98
13	38	1086	648	1.7	0.0557	0.0010	0.3279	0.0060	0.0425	0.0003	4.39	41	288	5	269	2	93
14	66	2968	921	3.2	0.0521	0.0009	0.3079	0.0053	0.0426	0.0003	2.87	36	273	4	269	2	98
15	120	4837	1664	2.9	0.0512	0.0007	0.2937	0.0041	0.0413	0.0003	2.50	31	261	3	261	2	99
16	97	3108	1596	1.9	0.0523	0.0008	0.3045	0.0046	0.0420	0.0003	2.98	33	270	4	265	2	98
17	32	967	559	1.7	0.0525	0.0011	0.3054	0.0060	0.0421	0.0003	3.09	46	271	5	266	2	98
18	82	3635	1079	3.4	0.0519	0.0011	0.3020	0.0066	0.0419	0.0004	2.80	48	268	5	264	2	98
19	46	1225	815	1.5	0.0547	0.0011	0.3107	0.0058	0.0411	0.0004	3.98	44	275	5	260	2	94
20	190	10392	1992	5.2	0.0542	0.0010	0.3131	0.0055	0.0417	0.0004	3.89	39	277	4	263	2	95
21	60	2605	862	3.0	0.0536	0.0014	0.3137	0.0083	0.0422	0.0004	3.54	57	277	6	266	3	96
22	48	1709	716	2.4	0.0527	0.0011	0.3070	0.0064	0.0422	0.0004	3.22	48	272	5	266	2	97
23	36	889	632	1.4	0.0524	0.0011	0.3072	0.0060	0.0425	0.0003	3.02	44	272	5	268	2	98

组完全解理; 榭石粒径 0.3 ~ 1.3 mm, 菱形、不规则粒状, 多色性弱, Ng—浅褐色, Np—无色, 正极高突起, 高级白干涉色; 磷灰石, 自形粒状, 正中突起, 干涉色一级灰。镜下特征见图 2c、2e。

2 样品测试

锆石分选在南京宏创地矿完成, 原岩样品经人工粉碎后, 经人工淘洗后去除轻矿物部分, 将得到的重砂部分经电磁选后得到含有少量杂质的锆石样品, 最后在双目镜下挑选出锆石晶体。选择晶型较好, 无裂隙的锆石颗粒粘贴在环氧树脂表面制成锆石样品靶, 打磨样品靶, 使锆石的中心部位暴露出来, 然后进行抛光。对锆石进行反射光、透射光显微照相和阴极发光 (CL) 图像分析, 最后根据反射光、透射光及锆石 CL 图像选择代表性的锆石颗粒和区域进行 U-Pb 测年。

U-Pb 同位素定年在湖北省地质实验室测试中心重点实验室及武汉上谱分析科技有限责任公司岩石矿物研究室利用 LA-ICP-MS 分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLasPro, ICP-MS 为 Agilent 7700。激光剥蚀过程中采用氦气作为载气, 氩气为补充气以调节灵敏度, 二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流 (Ar + He) 中加入少量氮气, 以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度 (Hu Zhaochu et al., 2008; 吴元保和郑永飞, 2004)。激光剥蚀系统配置了使激光脉冲频率低达 1Hz 的信号平滑装置, 可使系统获得光滑的分析信号。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号, 激光束斑直径 32 μm , 锆石微量元素含量利用 NIST610 作为外标, Si 作为内标进行定量计算。使用 Isoplot 程序 (3.0 版) (Ludwing, 2003) 计算加权平均值和绘制 U-Pb 谐和图。比 1000 Ma 年轻的岩浆锆石采用 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄, 老于 1000 Ma 的锆石采用 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$ 年龄, 年龄加权平均值的误差为 2σ (王海然等, 2013)。

选择 5 件镁铁—超镁铁质岩体样品进行主量元素、稀土和微量元素分析 (表 1)。样品磨碎至 200 目后, 在武汉上谱分析科技有限责任公司进行主量和微量元素分析测试。主量元素使用 X-射线荧光光谱仪 (XRF-1500) 法测试。用 0.6 g 样品和 6 g 四硼酸锂制成的玻璃片在 Shimadzu XRF-1500 上测定氧化物的质量分数值, 相对误差优于 2% ~ 3%。微量元素及稀土元素利用酸溶法制备样品, 使用 ICP-

MS (Element II) 测试,分析精度(按照 GSR-1 和 GSR-2 国家标准):当元素质量分数值大于 10×10^{-6} 时,相对误差小于 5%,当质量分数值小于 10×10^{-6} 时,相对误差小于 10%。

3 分析结果

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

本次用于锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄测试的样品采集位置见图 1,样品分析数据见表 1。样品深灰绿色含石榴磷灰辉石岩(D005)为深灰绿色,具不等粒半自形—自形短柱状结构,块状构造。灰绿色辉长岩(D006)为灰绿色,辉长结构,他形—半自形细粒粒状结构—块状构造。将这两件样品先经手工粉碎,后按常规重力及电磁法浮选出锆石颗粒,最后在实体镜下挑选出振荡环带较好的锆石约 150 余粒。

其中样品 D005 共分选出 70 余粒,样品 D006 选出 80 余粒。锆石多为浅紫红色,个别呈褐色,粒状、短柱状、碎粒状,金刚光泽,透明,部分具磨蚀特征,锆石长 $60 \sim 110 \mu\text{m}$,少数达 $150 \mu\text{m}$ 。

根据阴极发光(CL)图像可将这些锆石分为两类:第一类锆石自形程度较好,棱角分明,发育较宽的韵律环带,Th/U 值较大,为典型的镁铁—超镁铁质岩浆结晶锆石(Hoskin and Schaltegger, 2003; 吴元保和郑永飞, 2004; 李再会等, 2012; 刘军平等, 2018b, c); 第二类锆石多呈半自形,边部常有一定程度的磨圆,无明显环带结构,具明显核幔结构,锆石核部具扇形结构或椭圆状结构,可能为岩浆上升过程中捕获的围岩锆石(图 3)。本次对正长辉石岩(D005)共完成 19 个测点的锆石年龄测定(表 1),获得有效数据 17 个,17 个有效的分析点均具有较

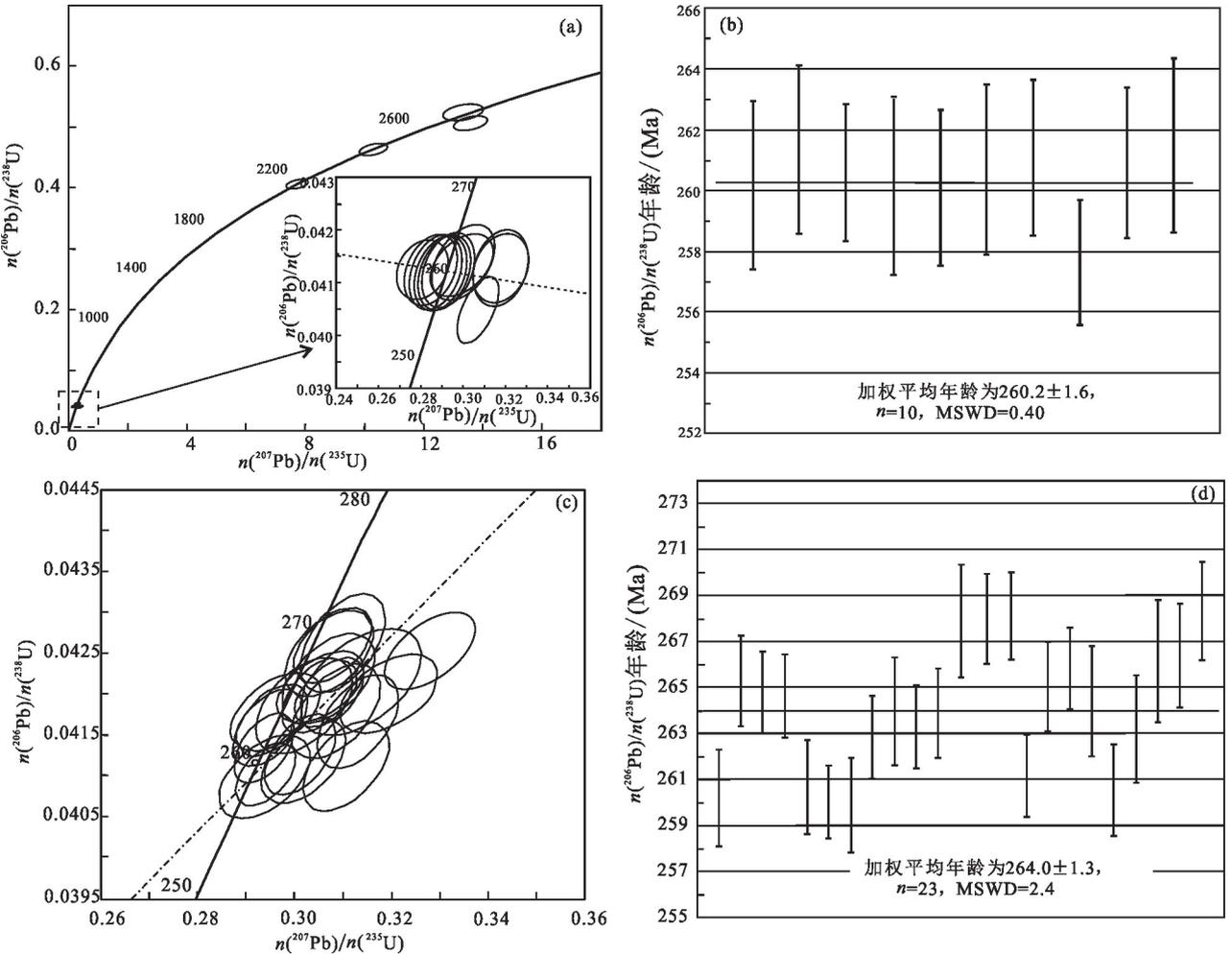


图 4 云南甸中地区镁铁—超镁铁质岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams of the zircons from mafic—ultramafic rocks in Dianzhong area, Yunnan

(a)、(b) 辉石岩样品;(c)、(d) 辉长岩样品
 (a), (b) pyroxene sample;(c), (d) gabbro sample

好的谐和度,谐和度均大于 91%,从图 4a、b 可以看出,样品分析的 17 个点均沿谐和线或稍微偏离,其中有 10 个分析点较为集中,且振荡环带清楚,Th/U 值 0.2~2.7 范围内变化,均为岩浆成因锆石,10 个分析点获得²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 260.2 ± 1.6 Ma (MSWD = 0.4, n = 10),代表辉石岩侵位时代,说明其形成于晚二叠世早期。其中有 7 个颗粒老锆石年龄,集中在 298 ~ 438 Ma, 2271 ~ 2439 Ma 及 2720 ~ 2773 Ma,其所测锆石有一定磨圆,且振荡环带不清,具明显核—幔结构,可能是岩浆喷发过程捕获的围岩锆石,因此,进一步佐证了滇中存在太古宙—古元古代地层(朱华平等, 2011; 周邦国等, 2012; 高林志等, 2018; Cui Xiaozhuang et al., 2018; 李静等, 2018a, b; 刘桂春等, 2018; 刘军平等, 2018a, 2019, 2020b, c)。

正长辉长岩(D006)样品完成 23 个测点的锆石年龄测定(表 1),获得有效数据 23 个有效的分析点均具有较好的谐和度,谐和度均大于 92%。从图 4c、d 中可以看出,23 个分析点较为集中,且振荡环带清楚,Th/U 值较大(1.2 ~ 4.2),均为岩浆成因锆

石,23 个分析点获得²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 264.0 ± 1.3 Ma (MSWD = 2.4, n = 23),代表正长辉长岩的侵位时代,为中二叠世。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素

研究区镁铁—超镁铁质岩体主量元素分析结果详见表 2;从表中可见,甸中镁铁—超镁铁质岩体 SiO₂ = 42.74% ~ 45.11%,总体属于基性—超基性岩类。从其他主量元素来看,可分为两大类,辉石岩类 MgO = 10.67% ~ 11.13%,平均为 10.9%;ΣFeO + MgO 为 24.11% ~ 25.68%,实际矿物中镁铁矿物含量超过 90%,故属超镁铁岩类;Na₂O + K₂O = 2.02% ~ 2.06%;CaO = 18.15% ~ 19.60%;TiO₂ = 2.00% ~ 2.49%。辉长岩类 MgO = 8.93% ~ 9.34%,平均为 9.07%,低于辉石岩类;ΣFeO + MgO 为 16.01% ~ 16.85%,实际矿物中镁铁矿物含量为 80% ~ 90%,故属镁铁岩类;Na₂O + K₂O = 1.91% ~ 2.49%;CaO = 23.54% ~ 25.29%,高于辉石岩类;TiO₂ = 0.90% ~ 0.99%,低于辉石岩类。两类岩石镁质指数 Mg[#] = 62 ~ 75,平均为 71,属于原始

表 2 云南甸中地区镁铁—超镁铁岩的主量元素(%)和微量元素(μg/g)分析结果表

Table 2 Major and trace element compositions of the mafic—ultramafic rocks in Dianzhong area, Yunnan

样品编号	D005-1	D005-2	D006-1	D006-2	D006-3	D006-4	样品编号	D005-1	D005-2	D006-1	D006-2	D006-3	D006-4
岩石名称	辉石岩	辉石岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	岩石名称	辉石岩	辉石岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩	辉长岩
SiO ₂	44.17	42.74	45.11	44.00	44.54	43.70	Dy	4.79	4.92	3.89	4.14	4.33	4.57
TiO ₂	2.00	2.49	0.97	0.90	0.99	0.92	Ho	0.92	0.94	0.73	0.78	0.83	0.86
Al ₂ O ₃	5.36	6.15	8.95	8.46	8.46	8.71	Er	2.54	2.59	2	2.11	2.25	2.32
Fe ₂ O ₃	3.24	3.72	2.01	1.78	1.83	1.92	Tm	0.37	0.38	0.29	0.3	0.32	0.33
FeO	10.07	11.67	5.83	5.64	5.53	5.73	Yb	2.33	2.34	1.78	1.84	1.98	2.02
MnO	0.18	0.21	0.12	0.12	0.11	0.12	Lu	0.41	0.41	0.31	0.32	0.35	0.34
MgO	11.13	10.67	9.21	8.78	9.34	8.93	Y	26.1	26.8	20.8	21.7	22.7	24
CaO	19.60	18.15	22.27	25.29	23.54	24.20	Zr	95.1	99.3	102	110	114	93
Na ₂ O	1.68	1.42	2.32	1.66	1.95	2.16	Zn	84.8	131	162	165	129	192
K ₂ O	0.34	0.63	0.17	0.25	0.28	0.20	V	307	413	123	110	121	114
P ₂ O ₅	1.71	1.45	2.74	2.81	3.12	3.12	Th	1.43	1.01	1.33	1.67	1.41	1.32
总量	99.48	99.30	99.70	99.69	99.69	99.71	Sc	35.4	34.5	23.9	25.6	25.7	23.6
Na ₂ O+K ₂ O	2.02	2.06	2.49	1.91	2.23	2.36	Sr	266	283	543	617	603	456
Mg [#]	67	62	74	74	75	74	Rb	7.9	18.8	9.8	10.5	12.9	7.1
La	13.7	13.6	14.4	15.7	15.3	16.7	Ni	125	113	50.7	50.1	51.3	49
Ce	30	30.6	30.8	33	32.7	36	Nb	7.9	7.79	4.81	5.92	4.55	4.73
Pr	4.4	4.57	4.31	4.63	4.69	5.04	Hf	3.2	3.24	3.35	3.72	3.96	3.19
Nd	19.3	20.2	18.3	19.7	19.9	21.6	Ta	1.34	1.57	1.11	1.25	1.09	1.01
Sm	4.22	4.39	3.75	4	4.09	4.39	ΣREE	114.78	117.75	106.52	113.67	115.09	124.03
Eu	1.17	1.3	1.04	1.09	1.12	1.19	δCe	0.93	0.93	0.93	0.92	0.92	0.94
Gd	3.87	4.02	3.5	3.75	3.81	4.08	δEu	0.87	0.93	0.86	0.85	0.86	0.85
Tb	0.73	0.75	0.62	0.66	0.68	0.73	(La/Yb) _N	3.97	3.91	5.45	5.75	5.21	5.55

注:主元素原始分析数据首先按 11 项氧化物进行标准化,然后按里特曼法进行全铁调整。

玄武岩浆(65 ~ 72)。总体上看,辉石岩类和辉长岩类富含大量碱性矿物正长石、碱性角闪石,说明镁铁—超镁铁质岩为碱性侵入岩系列。镁铁—超镁铁质碱性岩体低钛、高镁性质与峨眉山玄武岩具有相似性,可能属地幔热柱活动的产物,且低钛岩石是浅部较高程度部分熔融的产物,而高钛岩石是深部较低程度部分熔融的产物(徐义刚和钟孙霖,2001;宋谢炎等,2001;徐义刚,2002;张招崇等,2006;张招崇,2009)。由此可见,含钛量的高低可代表源区部分熔融的程度,故甸中镁铁—超镁铁质岩体应属于地幔热柱在不同深度、不同程度的部分熔融的产物,即辉石岩类(相对高钛)是地幔柱在深部较低程度部分熔融的产物,而辉长岩类(相对低钛)是浅部较高程度部分熔融的产物,这也很好的解释了两类岩石在主量元素的差异。另外,上述两类岩石普遍具有较高的CaO,暗示了在部分熔融过程中,有较多富钙的单斜辉石参与熔融,同时,也进一步说明了甸中镁铁—超镁铁质碱性岩体的源岩应属辉石岩类。Ren Zhongyuan(2019)通过对丽江地区苦橄岩内熔体包裹体的研究表明,峨眉山玄武岩的源岩应属辉石岩类,由此可见,甸中镁铁—超镁铁质碱性岩体与峨眉山玄武岩具有相同的源区特征,二者具有亲源性。

3.2.2 微量和稀土元素

稀土、微量元素分析结果详见表2。甸中镁铁—超镁铁质岩体稀土总量较低, $\Sigma\text{REE} = 106.52 \sim 124.03 \mu\text{g/g}$,平均为 $115.31 \mu\text{g/g}$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 3.91 \sim 5.75$;从稀土元素特征分析,镁铁—超镁铁

质岩类轻/重稀土元素分异程度较低(图5a),略具平坦型的稀土元素配分曲线,负铈异常不明显,且普遍具有弱程度的负铈异常($\delta\text{Ce} = 0.92 \sim 0.94$,平均为0.93),暗示了岩浆形成于较高的氧逸度环境(刘军平等,2020b,d)。

在MORB标准化微量元素蛛网图(图5b)中可以看出,微量元素总体变化不大,暗示同源演化特征,选择性富集Rb、Ba、Sr、Th等大离子亲石元素,相对亏损Nb、Zr、Ti、Hf等高场强元素(Ta不亏损可能受下地壳麻粒岩相岩石混染所致)及重稀土元素Yb、Y;岩石亏损Nb,而Ta不亏损, $\text{Nb}/\text{Ta} = 4.17 \sim 5.90$,显示Nb—Ta有明显的分馏。岩石的Zr—Hf值(28.79 ~ 30.65)接近(或略小于)原始地幔(36.27),远高于大陆地壳(11),具幔源岩浆特征。总体上看,甸中镁铁—超镁铁质碱性岩体明显区别于不相容元素亏损的洋中脊玄武岩(MORB),显示了板内玄武岩特有的大隆起型配分特征,具有与OIB相似的特征,与峨眉山玄武岩地幔柱热点地化较相似。不活动性元素Sr、Ta等不同程度富集,明显区别于与俯冲作用有关的汇聚板块边缘的岛弧、活动陆缘岩浆弧火山岩特征(刘军平等,2020c,d)。

4 讨论

4.1 与峨眉山大火成岩省的关系

从前述岩石主量元素特征来看,甸中镁铁—超镁铁岩体普遍富镁,暗示岩浆形成过程中以部分熔融为主导的成岩过程,指示了异常高的地温梯度构造背景(张招崇等,2006;张招崇,2009)。它们的

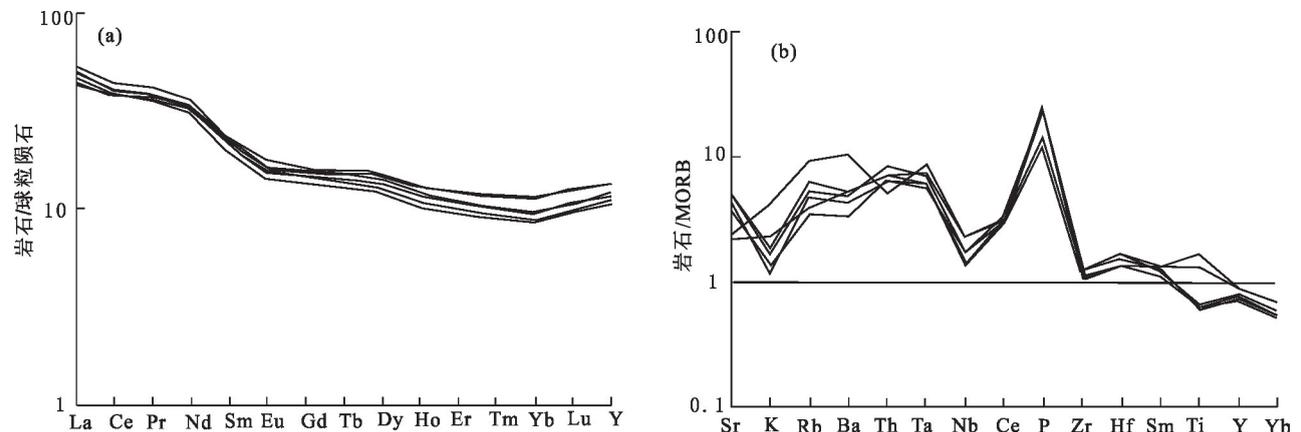


图5 云南甸中地区镁铁—超镁铁岩球粒陨石标准化稀土元素配分形式(a)与MORB标准化微量元素蛛网图(b)(据Sun and McDonough,1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized rare earth elements patterns (a) and MORB-normalized trace elements spidergrams (b) of mafic—ultramafic rocks in Dianzhong area, Yunnan (after Sun and McDonough, 1989)

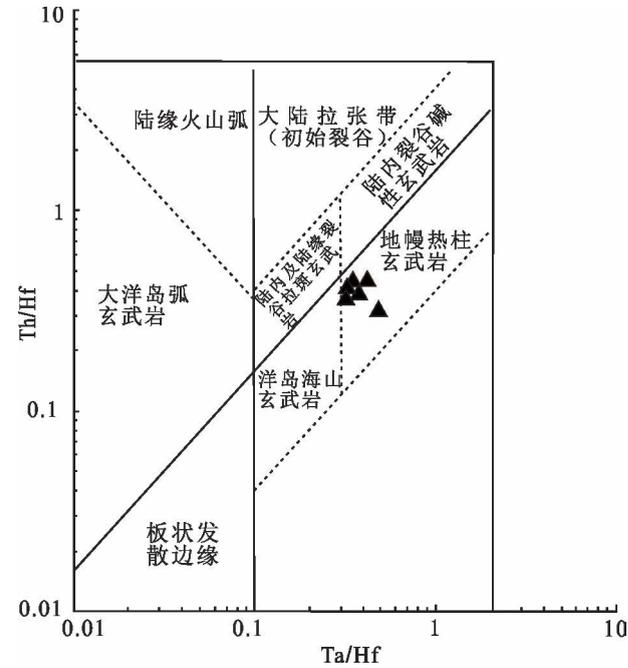


图 6 云南甸中地区镁铁—超镁铁岩 Th/Hf—Ta/Hf 图解 (据汪云亮等,2001)

Fig. 6 Th/Hf—Ta/Hf diagram of mafic—ultramafic rock in Dianzhong area , Yunnan (after Wang Yunliang et al. , 2001&)

Ta/Hf 值都大于或等于 0.3,与汪云亮等(2001)所定义的地幔热柱成因玄武岩(Ta/Hf > 0.3)较一致。在 Th—Ta—Hf 图解中(图 7),镁铁—超镁铁质岩石样品基本全部落入地幔热柱玄武岩区;在 Ta/Th—Zr/Nb 和 Th/Yb—Th/Nb 构造环境判别图解中(图 8),所有样品均落入板内玄武岩(WPB)区内,说明滇中甸中地区发生了陆内裂谷拉张事件,导致了大规模的地幔物质上涌,应为全球中—晚二叠世大规

模地幔柱活动的响应,可能与地幔柱活动密切相关(张招崇等,2006,2009;孙君一等,2019)。

在 Zr—Nb 图解(图 8a)中,样品显示了近原始的地幔源区特征,与前述主量元素得出的结论一致。总体上看,研究区镁铁—超镁铁岩应属中—晚二叠世时期深部热流上涌,在不同深度、不同程度的部分熔融产物,且源区可能为辉石岩类。综合前述特征来看,甸中镁铁—超镁铁质碱性岩体普遍富镁,暗示岩浆形成过程中以部分熔融为主导的成岩过程与 Ni—Zr 图解指示 10% ~ 15% 部分熔融相一致(图 8b),指示了异常高的地温梯度构造背景(张招崇等,2006;张招崇,2009)。且高镁岩浆岩在峨眉山大火成岩省中具有很强的指示意义,通常代表了地幔柱头的分布位置(刘德民等,2019),甸中岩体从源区性质、成岩过程、成岩时代等方面都与峨眉山玄武岩具有相似的特征,故应属峨眉山大火成岩省的重要组成部分,从甸中镁铁—超镁铁质碱性岩体的规模来看,因属峨眉山大火成岩省一个较小的分枝柱头。

传统“峨眉山玄武岩”岩石组合以碱性玄武岩、大陆拉斑玄武岩为主,随着地幔柱发展,普遍认为峨眉山玄武岩是地幔柱活动产物;峨眉山玄武岩岩石组合也得到了极大丰富,大量学者认为峨眉山玄武岩中超基性—基性岩包体的原始超基性岩浆属于峨眉山地幔柱活动产物,且与主岩形成背景相似,说明峨眉山玄武岩岩石组合包括超基性—基性岩类岩石(朱士飞等,2006;易立文等,2014)。而研究区内镁铁—超镁铁质岩石地化显示为典型的地幔柱产物,与云南中甸地区峨眉山玄武岩中超基性—基性岩包体及丽江苦橄岩地化特征相似(朱士飞等,2006;易立文等,2014;秦亚等,2018)。时代上,2 件样品共

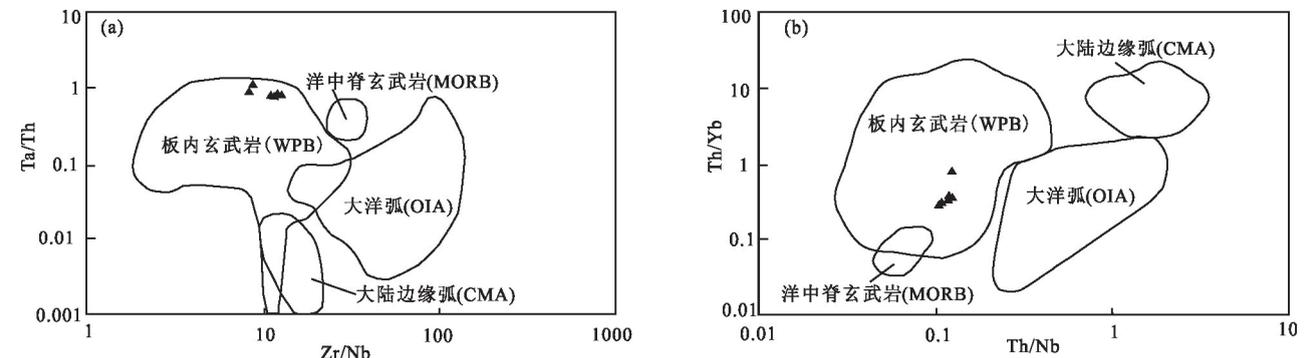


图 7 云南甸中地区镁铁—超镁铁岩 Zr/Nb—Ta/Th 及 Th/Nb—Th/Yb 构造判别图(据周家云等,2008)

Fig. 7 Zr/Nb—Ta/Th and Th/Nb—Th/Yb tectonic formations discrimination diagrams of mafic—ultramafic rocks in Dianzhong area, Yunnan (after Zhou Jiayun et al. , 2008&)

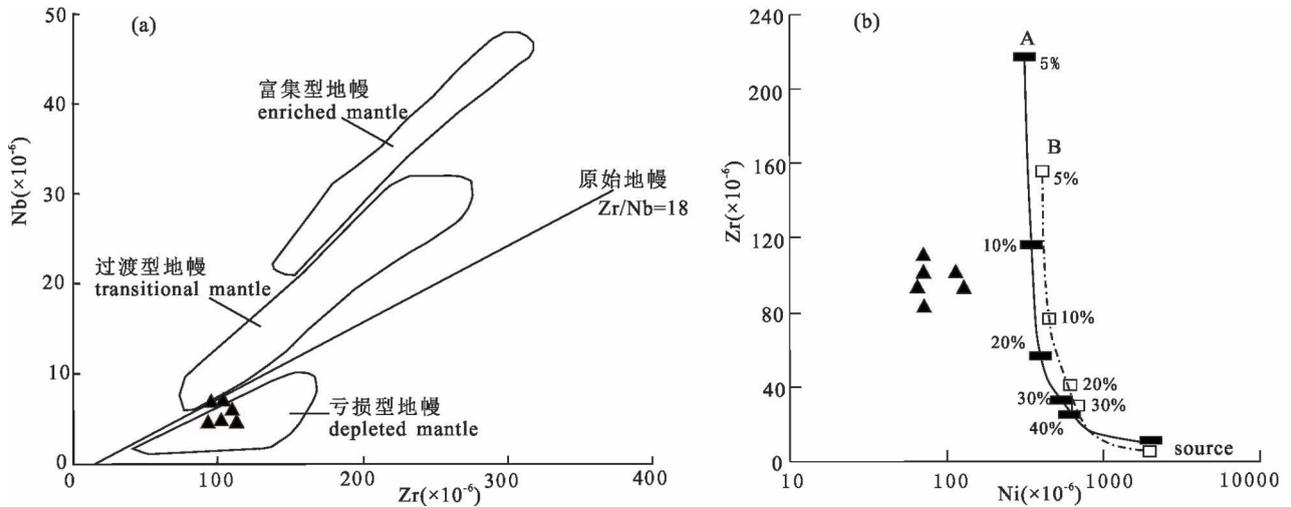


图8 云南甸中地区镁铁—超镁铁岩 Zr—Nb (a, 底图据赵国春等, 2003) 及 Ni—Zr 图解 (b, 据 Hastie A R et al, 2007)

Fig. 8 Zr—Nb (a, after Zhao Guochun et al., 2003) and Ni—Zr (b, after Hastie et al., 2007) diagrams of mafic—ultramafic rocks in Dianzhong area, Yunnan

40 粒单颗粒锆石 U-Pb LA-ICP-MS 测年结果表明, 甸中镁铁—超镁铁质碱性岩体的岩浆活动时限, 为 260.2~264 Ma, 属于中二叠世晚期至晚二叠世早期岩浆活动的产物。甸中镁铁—超镁铁质碱性岩体不仅从地球化学特征与区域上峨眉山玄武岩的地球化学特征相吻合外, 且年代学上较为一致, 进一步暗示其属于峨眉山玄武岩的一部分。甸中地区正是峨眉山幔柱的一个分枝柱头。最新资料表明^{①②}, 峨眉山玄武岩不仅包括传统意义上的玄武岩及本次认为的镁铁—超镁铁岩类, 还可能包括碱性岩类岩石, 极大的丰富了峨眉山大火成岩省资料。

4.2 捕获锆石及变质锆石的指示意义

《云南省区域地质志》(第二版、修编) 及云南 1:5 万二街幅等四幅区调近期在滇中关键地区的火山岩及侵入岩中获得了 3.0~1.85 Ga 的锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄; 并厘定出一套太古宙—古元古代地层, 名称为中太古界元江群、新太古界普渡河群、古元古界易门群, 并进一步细分为 15 个组级岩石地层单元, 与扬子北缘黄陵地区崆岭杂岩年龄相当 (李静等, 2018a, b; 刘桂春等, 2018; 刘军平等, 2018a, 2019, 2020a, b, c)。本文辉石岩样品共获得了 17 个有效的 U-Pb 同位素年龄值。其中, 年龄值较老的 7 颗锆石应为岩浆上升过程中捕获的通道围岩的岩浆锆石, 集中在 298~438 Ma, 2271~2439 Ma 及 2720~2773 Ma。结合最新区域相关同位素研究资料, 笔者等认为: ①有两粒锆石的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄值为 2773±29 Ma、2720±35 Ma 属新太古代

中期, 与中太古界元江群绿汁江组时代相当 (李静等, 2018a); ②有一粒锆石的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄值为 2439±29 Ma 属古元古代早期, 与易门群阿不都组沉积年龄及易门铜厂地区英云闪长岩侵位时代相当 (李静等, 2018a; 刘军平等, 2020e); ③有一粒锆石的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄值为 2271±31 Ma 属古元古代中期, 与易门群罗洼垭组及撮科杂岩年龄相当, 可能是 Kenorland 超大陆裂解阶段的岩浆活动 (Cui Xiaozhuang et al., 2018; 李静等, 2018a)。④三粒锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值为 298~438 Ma, 说明滇中地区可能存在古生代岩浆活动热事件, 安宁地区石虎山碱性岩体、易门地区狮子山基性岩及禄丰地区小黑山玄武岩均有显示 (刘军平等, 2020a, b, d)。以上继承性锆石可与扬子陆块西缘 2.7 Ga、2.4 Ga、2.2 Ga 及 0.3~0.4 Ga 等数期重要的区域构造—热事件相对比 (李静等, 2018; 刘军平等, 2018a, 2019, 2020b)。

5 结论

(1) 镁铁—超镁铁质岩为低钛、高镁碱性岩系列, 是二叠纪地幔柱产物, 为峨眉山玄武岩重要组成部分, 与全球中—晚二叠世大规模地幔柱活动相呼应, 极大地丰富了峨眉山大火成岩省资料。

(2) 镁铁—超镁铁质岩具有 260.2~264 Ma 锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄, 属于中二叠世晚期至晚二叠世早期, 是对地幔柱上涌、岩浆侵位这一过程的年代学记录。

(3) 镁铁—超镁铁质岩存在 298 ~ 438 Ma、2271 ~ 2439 Ma 及 2720 ~ 2773 Ma 的继承性锆石,进一步佐证了滇中地区存在太古宙—古元古代的地质体;且与扬子陆块西南缘 2.7 Ga、2.4 Ga、2.2 Ga 及 0.3 ~ 0.4 Ga 等数期重要的区域构造—热事件可以对比。

致谢: 论文写作过程中得到了云南省地质调查局教授级高工李静热心帮助, 锆石 LA-ICP-MS 分析和阴极发光照片得到了南京宏创地质勘查技术服务有限公司袁秋云及湖北省地质实验室测试中心岩石矿物研究室朱丹、潘诗洋的帮助。审稿专家提出了宝贵的修改意见。在此一并表示衷心感谢。

注 释 / Notes

- ① 云南省地质调查院. 2017. 云南 1:5 万隆伦街等 4 幅区域地质矿产调查报告.
- ② 云南省地质调查院. 2018. 云南省区域地质志(第二版, 修测) 地质调查报告.
- ③ 云南省地质调查院. 2018. 云南 1:5 万二街幅、易门县幅、鸣矣河幅、上浦贝幅区域地质调查报告.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 高林志, 张恒, 张传恒, 丁孝忠, 尹崇玉, 武振杰, 宋彪. 2018. 滇东昆阳群地层序列的厘定及其在中国地层表的位置. 地质论评, 64(2): 283 ~ 297.
- 何斌, 徐义刚, 肖龙, 王康明, 沙绍礼. 2003. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布, 来自沉积地层学的新证据. 地质学报, 77(2): 194 ~ 202.
- 何斌, 徐义刚, 肖龙, 王雅玫, 王康明, 沙绍礼. 2006. 峨眉山地幔柱上升的沉积响应及其地质意义. 地质论评, 52(1): 30 ~ 37.
- 侯增谦, 汪云亮, 张成江, 宋谢炎. 1999. 峨眉火成岩省地幔热柱的主要元素及 Cr, Ni 地球化学特征. 地质论评, 45(增刊): 880 ~ 884.
- 李静, 刘桂春, 刘军平, 胡绍斌, 曾文涛, 孙柏东, 张虎, 邓仁宏, 张志斌, 刘发刚, 段向东, 俞赛赢, 王晓峰, 赵云江, 周坤. 2018a. 滇中地区早前寒武纪地质研究新进展. 地质通报, 37(11): 1957 ~ 1969.
- 李静, 刘军平, 孙柏东, 刘桂春, 胡绍斌, 曾文涛, 张虎, 邓仁宏, 俞赛赢. 2018b. 滇中易门地区古元古界易门群亮山组多细胞生物的年代学约束. 地质通报, 37(11): 2087 ~ 2098.
- 李再会, 林仕良, 丛峰, 谢韬, 邹光富. 2012. 滇西高黎贡山群变质岩的锆石年龄及其构造意义. 岩石学报, 8(5): 1529 ~ 1541.
- 刘德民, 郭宏杰, 张根袁, 孔令昊, 邵俊琦, 张婧琪. 2019. 滇东南建水地区高镁火山岩包体的成因和构造背景. 地球科学, 44(5): 1749 ~ 1760.
- 刘桂春, 李静, 胡绍斌, 邓仁宏, 刘发刚, 陈光艳, 冯庆来, 徐桂香. 2018. 滇中元江古元古代浊积岩特征及其地质意义. 地质通报, 58(11): 2007 ~ 2014.
- 刘军平, 曾文涛, 徐云飞, 孙柏东, 胡绍斌, 刘桂春, 宋冬虎, 吕勃焯, 王晓峰. 2018a. 滇中易门地区约 1.85 Ga 凝灰岩的厘定及其地质

意义. 地质通报, 37(11): 2055 ~ 2062.

- 刘军平, 曾文涛, 徐云飞, 胡绍斌, 孙柏东, 宋冬虎, 吕勃焯, 王伟. 2018b. 滇中峨山地区中元古界昆阳群黑山头组火山岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 37(11): 2063 ~ 2070.
- 刘军平, 胡绍斌, 李静, 孙柏东, 孙载波, 王伟, 关学卿, 徐桂香. 2018c. 滇西云县地区团梁子岩组变质岩锆石 U-Pb 定年及其构造意义. 地质通报, 37(11): 2079 ~ 2086.
- 刘军平, 李静, 王伟, 孙柏东, 曾文涛, 宋冬虎, 关学卿, 吕勃焯, 郝学锋, 孙鹏. 2019. 滇中易门地区早前寒武纪地层化石的发现及其意义. 沉积与特提斯地质, 39(4): 57 ~ 65.
- 刘军平, 孙柏东, 王晓峰, 刘伟, 马进华, 关学卿, 宋冬虎, 吕勃焯. 2020a. 滇中禄丰地区中元古代早期球陨玄武岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其大地构造意义. 地质论评, 66(1): 35 ~ 51.
- 刘军平, 李静, 王根厚, 孙柏东, 胡绍斌, 俞赛赢, 王小虎, 宋冬虎. 2020b. 扬子板块西南缘基性侵入岩锆石定年及地球化学特征——Columbia 超级大陆裂解的响应. 地质论评, 66(2): 350 ~ 364.
- 刘军平, 李静, 段向东, 曹晓民, 胡绍斌, 李开毕, 王路, 关学卿, 曾文涛, 刘发刚, 张虎, 俞赛赢. 2020c. 滇中易门地区富硒土壤物质来源及其天然富硒野生菌初步研究. 地质论评, 66(3): 786 ~ 794.
- 刘军平, 孙柏东, 崔晓庄, 熊波, 宋冬虎, 白春东, 张坤, 杨仕潘. 2020d. 云南安宁地区石虎山花岗岩年代学、地球化学特征和锆石 Hf 同位素组成及其成因. 中国地质, 47(3): 334 ~ 349.
- 刘军平, 孙柏东, 关学卿, 宋冬虎, 吕勃焯, 朱勋早, 马进华. 2020e. 云南易门英云闪长岩锆石 U-Pb 年龄(2.43 Ga)报道[OL]. 中国地质; <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20200601.1613.012.html>.
- 莫宣学. 2019. 岩浆作用与地球深部过程. 地球科学, 44(5): 1487 ~ 1493.
- 秦亚, 杨启军, 孙明行, 付伟. 2018. 贵州赫章地区玄武岩地质地球化学特征及其对峨眉山玄武岩的响应. 桂林理工大学学报, 38(1): 1 ~ 13.
- 宋谢炎, 侯增谦, 曹志敏, 卢纪仁, 汪云亮, 张成江, 李佑国. 2001. 峨眉大火成岩省的岩石地球化学特征与时限. 地质学报, 75(4): 498 ~ 506.
- 宋谢炎, 侯增谦, 汪云亮, 张成江, 曹志敏, 李佑国. 2002. 峨眉山玄武岩的地幔热柱成因. 矿物岩石, 22(4): 27 ~ 32.
- 孙君一, 于文佳, 崔加伟, 李重, 罗照华. 2019. 川西拉拉含矿镁铁质层状岩体的成因及构造背景. 地质力学学报, 25(1): 139 ~ 150.
- 王海然, 赵红格, 乔建新, 高少华. 2013. 锆石 U-Pb 同位素测年原理及应用. 地质与资源, 22(3): 229 ~ 242.
- 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf—Ta/Hf 图解判别. 岩石学报, 17(3): 413 ~ 421.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589 ~ 1604.
- 肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 何斌. 2003. 云南金平晚二叠纪玄武岩特征及其与峨眉地幔柱关系—地球化学证据. 岩石学报, 19(1): 38 ~ 48.
- 徐义刚, 钟孙霖. 2001. 峨眉山大火成岩省: 地幔柱活动的证据及其熔融条件. 地质化学, 30(1): 1 ~ 9.
- 徐义刚. 2002. 地幔柱构造、大火成岩省及其地质效应. 地学前缘, 9(4): 341 ~ 353.
- 易立文, 刘显凡, 邓江红, 卢秋霞, 李湘玉, 赵甫峰, 李春辉. 2014. 云南中甸峨眉山玄武岩中超基性—基性岩包体元素地球化学分析. 地质学报, 88(8): 1504 ~ 1512.
- 张招崇, Mahoney J, 王福生, 赵莉, 艾羽, 杨铁铮. 2006. 峨眉山大火成岩省西部苦橄岩及其共生玄武岩的地球化学: 地幔柱头部分熔

- 融的证据. 岩石学报, 2(6): 1538 ~ 1552.
- 张招崇. 2009. 关于峨眉山大火成岩省一些重要问题的讨论. 中国地质, 36(3): 634 ~ 646.
- 赵国春, 胡健民, 孟庆任. 2003. 武当地块西部席状基性侵入岩群地球化学特征: 南秦岭古生代底侵作用的依据. 岩石学报, 19(4): 612 ~ 622.
- 周邦国, 王生伟, 孙晓明, 廖震文, 郭阳, 蒋小芳, 朱华平, 罗茂金, 刘才泽, 马东, 沈战武, 张海. 2012. 云南东川望厂组熔结凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义. 地质论评, 58(2): 359 ~ 368.
- 周家云, 郑荣才, 朱志敏, 陈家彪, 沈冰, 李潇雨, 罗丽萍. 2008. 拉拉铜矿黄铁矿微量元素地球化学特征及其成因意义. 矿物岩石, 28(3): 64 ~ 71.
- 朱华平, 范文玉, 周邦国, 王生伟, 罗茂金, 廖震文, 郭阳. 2011. 论东川地区前震旦系地层层序: 来自锆石 SHRIMP 及 LA-ICP-MS 测年的证据. 高校地质学报, 17(3): 452 ~ 461.
- 朱江, 张招崇, 侯通, 康健丽. 2011. 贵州盘县峨眉山玄武岩系顶部凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄: 对峨眉山大火成岩省与生物大规模灭绝关系的约束. 岩石学报, 27(9): 2743 ~ 2751.
- 朱士飞, 钱壮志, 姜常义, 秦勇, 高艳青. 2006. 云南宾川—丽江地区二叠纪镁铁—超镁铁岩及其成矿问题探讨. 桂林工学院学报, 26(4): 456 ~ 462.
- Cui Xiaozhuang, Wang Jian, Sun Zhiming, Wang Wei, Deng Qi, Ren Guangming, Liao Shiyong, Huang Mingda, Chen Fenglin, Ren Fei. 2018. Early Paleoproterozoic (ca. 2.36 Ga) post-collisional granitoids in Yunnan, SW China: Implications for linkage between Yangtze and Laurentia in the Columbia supercontinent. *Journal of Asian Earth Sciences*, 169: 308 ~ 322.
- Gao Linzhi, Zhang Heng, Zhang Chuanheng, Ding Xiaozhong, Yin Chongyu, Wu Zhenjie, Song Biao. 2018. Determination of the stratigraphic sequence of the Kunyang Group in eastern Yunnan and its location in the Chinese stratigraphic table. *Geological Review*, 64(2): 283 ~ 297.
- Gregory S J. 2014. The Emeishan Large Igneous Province: A synthesis. *Geoscience Frontiers*, 5(3): 369 ~ 394.
- Hastie A R, Kerr A C, Pearce J A, Mitchell S F. 2007. Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th—Co discrimination diagram. *Journal of Petrology*, 48(12): 2341 ~ 2357.
- He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, Wang Kangming, Sha Shaoli. 2003. Generation and spatial distribution of the Emeishan large igneous province: New evidence from stratigraphic records. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 194 ~ 202.
- He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, Wang Yamei, Wang Kangming, Sha Shaoli. 2006. Sedimentary responses to uplift of Emeishan mantle plume and its implications. *Geological Review*, 52(1): 30 ~ 37.
- Hoskin P W O and Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 27 ~ 62.
- Hou Zengqian, Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Song Xieyan. 1999. Chemical characteristic of major elements, Cr and Ni of mantle plume in Emei Igneous Province. *Geological Review*, 45 (Suppl.): 880 ~ 884.
- Hu Zhaochu, Gao Shan, Liu Yongsheng, Hu Shenghong, Chen Haihong, Yuan Honglin. 2008. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23(8): 1093 ~ 1101.
- Li Jing, Liu Junping, Sun Baidong, Liu Guichun, Hu Shaobin, Zeng Wentao, Zhang Hu, Deng Renhong, Yu Saiying. 2018a. Chronological constraints on multi-cellular organism fossil from Liangshan Formation of Paleoproterozoic Yimen Group in central Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 37(11): 2087 ~ 2098.
- Li Jing, Liu Junping, Sun Baidong, Liu Guichun, Hu Shaobin, Zeng Wentao, Zhang Hu, Deng Renhong, Yu Saiying. 2018b. Chronological constraints on multi-cellular organism fossil from Liangshan Formation of Paleoproterozoic Yimen Group in central Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 37(11): 2087 ~ 2098.
- Li Zaihui, Lin Shiliang, Cong Feng, Xie Wei, Zou Guangfu. 2012. U-Pb ages of zircon from metamorphic rocks of the Gaoligongshan Group in western Yunnan and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 8(5): 1529 ~ 1541.
- Liu Chengying, Pan Yongxin, Zhu Rixiang. 2012. New paleomagnetic investigations of the Emeishan basalts in NE Yunnan, southwestern China: Constraints on eruption history. *Journal of Asian Earth Sciences*, 52(6): 88 ~ 97.
- Liu Demin, Guo Hongji, Zhang Genyuan, Kong Linghao, Shao Junqi, Zhang Jinq. 2019. Petrogenesis and tectonic setting of high-Mg volcanic rock xenoliths in Jianshui area, Southeast Yunnan, China. *Earth Science*, 44(5): 1749 ~ 1760.
- Liu Guichun, Li Jing, Hu Shaobin, Deng Renhong, Liu Fagang, Chen Guangyan, Feng Qinglai, Xu Guixiang. 2018. Characteristics and geological significance of Early Proterozoic turbidite in Yuanjiang of central Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 37(11): 2007 ~ 2014.
- Liu Junping, Zeng Wentao, Xu Yunfei, Sun Baidong, Hu Shaobin, Liu Guichun, Song Donghu, Lü Boye, Wang Xiaofeng. 2018a. The definition and geological significance of tuffs about 1.85 Ga in Yimen area, central Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 37(11): 2055 ~ 2062.
- Liu Junping, Zeng Wentao, Xu Yunfei, Hu Shaobin, Sun Baidong, Song Donghu, Lü Boye, Wang Wei. 2018b. U-Pb dating of zircons of the volcanic rocks from Heishantou Formation of Mesoproterozoic Kunyang Group in Eshan County, central Yunnan Province, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 37(11): 2063 ~ 2070.
- Liu Junping, Hu Shaobin, Li Jing, Sun Baidong, Sun Zaibo, Wang Wei, Guan Xueqing, Xu Guixiang. 2018c. U-Pb age of zircon from metamorphic rocks of the Tuanliangzi Formation in western Yunnan Province and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 37(11): 2079 ~ 2086.
- Liu Junping, Li Jing, Wang Wei, Sun Baidong, Zeng Wentao, Song Donghu, Guan Xueqing, Lü Boye, Hao Xuefeng, Sun Peng. 2019. The discovery and significance of the fossils from the Early Precambrian strata in the Yimen region, central Yunnan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39(4): 57 ~ 65.
- Liu Junping, Sun Baidong, Wang Xiaofeng, Liu Wei, Ma Jinhua, Guan Xueqing, Song Donghu, Lü Boye. 2020a. The zircon U-Pb age, geochemical characteristics and tectonic significance of the spherical basalt in the early Mesoproterozoic in Lufeng area central Yunnan. *Geological Review*, 66(1): 35 ~ 51.
- Liu Junping, Li Jing, Wang Genhou, Sun Baidong, Hu Shaobin, Yu Saiying, Wang Xiaohu, Song Donghu. 2020b. Geochemistry and U-Pb age of zircons of mafic intrusion in the southwestern margin of the Yangtze plate: Response to breakup of the Columbia supercontinent. *Geological Review*, 66(2): 350 ~ 364.

- Liu Junping, Li Jing, Duan Xiangdong, Cao Xiaomin, Hu Shaobin, Li Kaibi, Wang Lu, Guan Xueqing, Zeng Wentao, Liu Fagang, Zhang Hu, Yu Saiying. 2020c&. Material sources of selenium-rich soil and its natural selenium-rich wild bacteria in Yimen area, central Yunnan. *Geological Review*, 66(3): 786 ~ 794.
- Liu Junping, Sun Baidong, Cui Xiaozhuang, Xiong Bo, Song Donghu, Bai Chungdong, Zhang Kun, Yang Shipan. 2020d&. The isotopic composition and genesis of geochronology, geochemistry and zircon Hf of Shihushan granite porphyries in Anning area Yunnan Province. *Geology in China*. 47(3): 334 ~ 349.
- Liu Junping, Sun Bodong, Guan Xueqing, Song Donghu, Lü Boye, Zhu Xunzao, Ma Jinhua. 2020e&. Report of the zircon U-Pb age (2.43 Ga) of tonalite in Yimen, Yunnan. *Geology in China* [OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.p.20200601.1613.012.html>
- Ludwig K R. 2003. Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, California, 39.
- Mo Xuanxue. 2019&. Magmatism and deep geological process. *Earth Science*, 44(5): 1487 ~ 1493.
- Qin Ya, Yang Qijun, Sun Minghang, Fu Wei. 2018&. Geological and geochemical characteristics of Hezhang basalt in Guizhou and its response to Emeishan basalt. *Journal of Guilin University of Technology*, 38(1): 1 ~ 13.
- Ren Zhongyuan, Wu Yadong, Zhang Le, Nichols Alex. 2017. Primary magmas and mantle sources of Emeishan basalts constrained from major element, trace element and Pb isotope compositions of olivine-hosted melt inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 208: 63 ~ 85.
- Song Xieyan, Hou Zengqian, Cao Zhimin, Lu Jiren, Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Li Youguo. 2001&. Geochemical characteristics and period of the Emei Igneous Province. *Acta Geologica Sinica*, 75(4): 498 ~ 506.
- Song Xieyan, Hou Zhengqian, Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Cao Zhimin, Li Youguo. 2002&. The mantle plume features of Emeishan basalts. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 22(4): 27 ~ 32.
- Sun Junyi, Yu Wenjia, Cui Jiawei, Li Zhong, Luo Zhaohua. 2019&. The petrogenesis and tectonic setting of the ore-bearing mafic layered intrusions in Lala area, western Sichuan. *Journal of Geomechanics*, 25(1): 139 ~ 150.
- Sun Weidong, McDonough William F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society Special Publication, 42: 313 ~ 345.
- Sun Yadong, Lai Xulong, Wignall P B, Widdowsin M, Ali J R, Jiang Haishui, Wang Wei, Yan Chunbo, Bond D P G, Vedrine S. 2010. Dating the onset and nature of the Middle Permian Emeishan Large Igneous Province eruptions in SW China using conodont biostratigraphy and its bearing on mantle plume uplift models. *Lithos*, 119(1/2): 20 ~ 33.
- Wang Hairan, Zhao Hongge, Qiao Jianxin, Gao Shaohua. 2013&. Theory and application of zircon U-Pb isotope dating technique. *Geology and Resources*, 22(3): 229 ~ 242.
- Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Xiu Jiaozhi. 2001&. Th/Hf—Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 413 ~ 421.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004&. Study on the mineralogy of zircon and its constraints on the interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589 ~ 1604.
- Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, He Bin. 2003&. Later Permian flood basalts at Jinping area and its relation to Emei mantle plume: Geochemical evidences. *Acta Petrologica Sinica*, 19(1): 38 ~ 48.
- Xu Yigang, Chuang Sunlin. 2001&. The Emeishan large igneous province: Evidence for mantle plume activity and melting conditions. *Geochimica*, 30(1): 1 ~ 9.
- Xu Yigang, Chuang Sunlin, Jahn Borming, Wu Genyao. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian—Triassic Emeishan flood basalts in southern China. *Lithos*, 58: 145 ~ 168.
- Xu Yigang, He Bin, Chuang Sunlin, Martin Menzies. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood—basalt province. *Geology*, 32: 917 ~ 920.
- Xu Yigang. 2002&. Mantle plumes, large igneous provinces and their geologic consequences. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 341 ~ 353.
- Yi Liwen, Liu Xianfan, Deng Jianghong, Lu Qiuxia, Li Xiangyu, Zhao Fufeng, Li Chunhui. 2014&. Geochemistry and petrogenesis of ultrabasic—basic xenoliths from Emeishan basalt in Zhongdian, Yunnan. *Acta Geologica Sinica*, 88(8): 1504 ~ 1512.
- Zhang Zhaochong, Mahoney J J, Wang Fusheng, Zhao Li, Ai Yu, Yang Teyu. 2006&. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China: Evidence for a plume-head origin. *Acta Petrologica Sinica*, 2(6): 1538 ~ 1552.
- Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, Saunders Andrew D, Ai Yu, Li Ying, Zhao Li. 2009. Petrogenetic modeling of three mafic—ultramafic layered intrusions in the Emeishan large igneous province, SW China, based on isotopic and bulk chemical constraints. *Lithos*, 113(3~4): 369 ~ 392.
- Zhang Zhaochong, Zhi Xiachen, Chen Lei, Saunders A D and Reichow M K. 2008. Re-Os isotopic compositions of picrites from the Emeishan flood basalt province, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 276(1~2): 30 ~ 39.
- Zhang Zhaochong. 2009&. A discussion on some important problems concerning the Emeishan large igneous province. *Geology in China*, 36(3): 634 ~ 646.
- Zhao Guochun, Hu Jianmin, Meng Qingren. 2003&. Geochemistry of the basic sills in the western Wudang block: The evidences of the Paleozoic underplating in south Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 612 ~ 622.
- Zheng Liandi, Yang Zhenyu, Tong Yabo, Yuan Wei. 2010. Magnetostratigraphic constraints on two-stage eruptions of the Emeishan continental flood basalts. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 11(12): 1 ~ 70.
- Zhou Bangguo, Wang Shengwei, Sun Xiaoming, Liao Zhenwen, Guo Yang, Jiang Xiaofang, Zhu Huaping, Luo Maojin, Liu Caize, Ma Dong, Shen Zhanwu, Zhang Hai. 2012&. Zircon SHRIMP U-Pb age of molten tuff in Wangchang Formation, Dongchuan, Yunnan, and its significance. *Geological Review*, 58(2): 359 ~ 368.
- Zhou Jiayun, Zheng Rongcai, Zhu Zhimin, Chen Jiabiao, Shen Bing, Li Xiaoyu, Luo Liping. 2008&. Geochemical characteristics of trace elements of pyrite and its implications to the metallogenesis in the Lala copper deposit. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(3): 64 ~ 71.
- Zhu Huaping, Fan Wenyu, Zhou Bangguo, Wang Shengwei, Luo Maojin, Liao Zhenwen, Guo Yang. 2011&. On the Pre-Sinian

stratigraphic sequence in Dongchuan area; Evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS dating. *College of Geology*, 17(3): 452 ~ 461.

Zhu Jiang, Zhang Zhaochong, Hou Tong, Kang Jianli. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the tuffs on the uppermost of the Emeishan basalt succession in Panxian County, Guizhou Province; Constraints on genetic link between Emeishan large igneous province

and the mass extinction. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2743 ~ 2751.

Zhu Shifei, Qian Zhuangzhi, Jiang Changyi, Qin Yong, Gao Yanqing. 2006. Mafic—ultramafic rocks in Permian period and mineralogical potentialities. *Journal of Guilin University of Technology*, 26(4): 456 ~ 462.

Characteristics of the late Middle Permian mafic—ultramafic rocks in Dianzhong area, central Yunnan, and their relationship with the Emei Mantle Plume —Evidence from zircon U-Pb age and petrogeochemistry

LIU Junping^{1,2)}, WANG Xiaofeng¹⁾, WANG Xiaohu^{1,2)}, YANG Aiping^{1,2)}, SONG Donghu¹⁾,
TIAN Sumei¹⁾, XIA Caixiang¹⁾, ZHANG Kun¹⁾, YANG Shipan¹⁾

1) *Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming*, 650216;

2) *MLR Key Laboratory of Sanjiang Metallogeny and Resources Exploration and Utilization, Kunming*, 650051

Objectives: After a regional geological survey of 1 : 50 000, new mafic—ultramafic alkaline rock bodies were newly discovered in the Dianzhong area of Eshan County. The lithology is garnet-containing apatite rock and syenite. Petrogeochemistry shows that the SiO₂ content of the rock is 42.74% ~ 45.11%, which generally has high MgO (8.78% ~ 11.13%), iron-rich (full iron content), low TiO₂(0.88% ~ 2.45%), and low Na₂O (0.17% ~ 0.62%), alkali-rich characteristics.

Results: Enrichment of large ion lithophilic elements (LILE) such as Rb, Ba, Sr, and Th, relative loss of high field strength elements (HFSE) such as Nb, Zr, Ti, Hf and heavy rare earth elements Yb, Y, during the magma formation process, it had a moderate degree of partial melting (about 10% to 15%), and experienced significant crystal differentiation in the later stage. Zircon U-Pb LA-ICP-MS dating of pyroxene and gabbro, 260.2 ± 1.6 Ma (MSWD = 0.4, n = 10) and 264.0 ± 1.3 Ma (MSWD = 2.4, n = 23).

Conclusions: Belongs to the late Middle Permian, and has similar geochemical characteristics and emplacement age to the Emeishan basalt. Based on the regional data and the above characteristics, this paper believes that the mafic—ultramafic alkaline rock in the Dianzhong area of Eshan County belongs to the product of the Emeishan mantle plume. This discovery is of great significance for enriching the data of the Emeishan large igneous province.

Keywords: Emeishan basalt; mafic—ultramafic rock; mantle plume; branch stigma; central Yunnan

Acknowledgements: This paper is the results of regional geological survey of 1 : 50000 Samaki, Yinmin, Guicheng and Shugu in Yunnan Province (No. D201905), 1 : 50000 Erjie, Yimen, Mingyihe and Shangpubei in Yunnan Province (No. DD20160017), regional geological survey area summary and service product development in Yunnan Province (No. 121201102000150012-02)

First author: LIU Junping, male, born in 1983, senior engineer, master's degree, mainly engaged in regional geological and structural geological investigation and research; Email: 271090834@qq.com

Manuscript received on: 2019-12-31; Accepted on: 2020-06-24; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2020.05.015