

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.105



# 滇西金沙江—红河构造带鲁甸始新世 煌斑岩成因及动力学背景

贺娟<sup>1</sup>, 王启宇<sup>1,2</sup>, 闫国川<sup>3</sup>

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川成都 610081
2. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590
3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

**摘要:**前人对金沙江—红河构造带上的煌斑岩研究工作主要集中在南段哀牢山地区,对构造带中段鲁甸地区新发现的煌斑岩脉进行了锆石 U-Pb 年代学和全岩地球化学研究,结果表明,煌斑岩形成时代为始新世末期,与滇西新生代富碱斑岩高峰期一致.鲁甸煌斑岩具有高钾、富碱、高 Mg<sup>#</sup>,富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE),亏损高场强元素(HFSE,尤其是 Ta-Nb-Ti)的特征.其岩浆源区为受俯冲流体和熔体交代的岩石圈地幔,源区组分为含金云母的尖晶石相方辉橄榄岩.结合同期的镁铁质火山岩和富碱斑岩研究成果,滇西区域的岩石圈地幔富集过程可能为元古宙时期与罗迪尼亚超大陆聚合相关的俯冲作用.始新世时期,在印度和亚洲大陆碰撞过程中,金沙江—红河构造带的富集岩石圈地幔发生拆沉或对流减薄,软流圈物质上涌,引发富集的岩石圈地幔部分熔融,形成本期煌斑岩岩浆作用.

**关键词:**煌斑岩;金沙江—红河构造带;富集地幔;岩石成因;鲁甸;滇西;地质年代学;地球化学.

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)08-2586-14

收稿日期: 2018-05-30

## Genesis and Geodynamic Settings of the Eocene Lamprophyres from Jinshajiang-Red River Tectonic Belt, Ludian, Western Yunnan Province

He Juan<sup>1</sup>, Wang Qiyu<sup>1,2</sup>, Yan Guochuan<sup>3</sup>

1. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China
2. College of Earth Sciences and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China
3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**Abstract:** Researches on the lamprophyres from the Jinshajiang-Red River tectonic belt are mainly concentrated in the southern Ailaoshan area. The zircon U-Pb geochronology and the whole rock geochemistry of the newly discovered Ludian lamprophyres located in the middle segment of the belt are applied in this paper. Zircon U-Pb dating proves Eocene emplacement age of Ludian lamprophyres, which is consistent with the peak age of the Cenozoic magmatism in the Jinshajiang-Red River alkali-rich intrusion belt. Geochemical data indicate that Ludian lamprophyres have the characteristics of high K<sub>2</sub>O, high (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) and Mg<sup>#</sup>, low TiO<sub>2</sub>, being enriched in LILE and LREE, depleted in HFSE (especially Ta-Nb-Ti). The source of the Ludian lamprophyres should be the lithosphere mantle which had been enriched by subduction-related fluids and melts, and the source should be phlogopite bearing spinel harzburgite. Combined with the study of coeval mafic lava and felsic intrusion, we put forward that the mantle in western Yunnan might have been enriched by the Protozoic subduction related to the assembly of the Rodinia supercontinent. In the Eocene, following the collision between Indian and Asia, the continental lithosphere in the Jinshajiang-Red River tectonic belt underwent convective thinning or delamination, which induced rising of the asthenosphere, and then partial

**基金项目:**国家重点研究发展计划(No.2015CB452601);中国地质调查局项目(No.DD20160016);国家自然科学基金项目(No.41603038).

**作者简介:**贺娟(1986-),女,博士研究生,主要从事岩石学与岩石地球化学研究. ORCID:0000-0002-8141-711X. E-mail:hejuan7@yeah.net

**引用格式:**贺娟,王启宇,闫国川,2018.滇西金沙江—红河构造带鲁甸始新世煌斑岩成因及动力学背景.地球科学,43(8):2586-2599.

melting of the enriched lithosphere mantle which generated the lamprophyre melt.

**Key words:** lamprophyres; Jingshajiag-Red River tectonic belt; enriched mantle; petrogenesis; Ludian; western Yunnan; geochronology; geochemistry.

### 0 引言

富碱斑岩成因机制及其与成矿的关系受到了密切关注 (Hou *et al.*, 2003; Deng *et al.*, 2014; He *et al.*, 2016; 林彬等, 2017), 但是与富碱斑岩同期的煌斑岩的研究工作还相对薄弱. 煌斑岩是一种具斑状结构的暗色浅成岩浆岩, 富含自形镁铁质矿物斑晶, 且岩石挥发分含量高, 常以小规模的岩脉、岩墙等形式产于多种构造环境中. 煌斑岩的研究工作有

助于揭示岩石圈地幔的富集过程、壳—幔相互作用及地球各圈层物质循环等地质作用, 是研究地球深部信息的“探针”和“窗口”, 受到越来越多学者的关注 (和文言等, 2014; Lu *et al.*, 2015).

前人对金沙江—红河构造带上的煌斑岩研究工作主要集中在南段哀牢山地区 (徐恒等, 2015; 图 1), 本文选取该带中段鲁甸地区新发现的煌斑岩脉, 对其进行岩石学、锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究, 探讨其形成机制、源区组分, 并结合同期

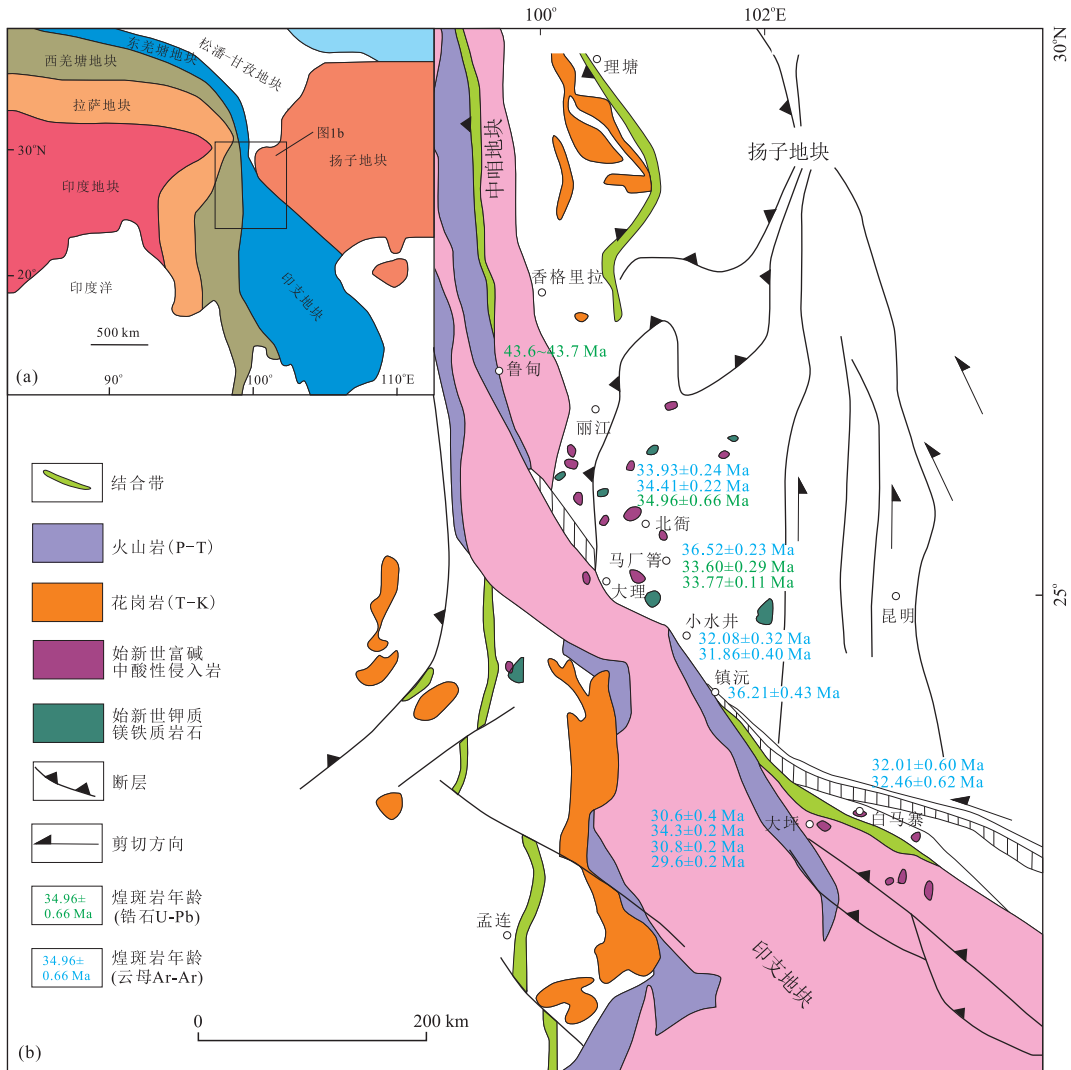


图 1 区域地质构造简图(a)和金沙江—红河构造带区域构造简图(b)

Fig.1 Simplified geological map of study area (a) and simplified geological map of Jinshajiang-Red River tectonic belt (b) 底图据 He *et al.* (2016). 年龄数据来源: 北衙 (和文言等, 2014; Lu *et al.*, 2015); 马厂箐 (贾丽琼等, 2013; 徐恒等, 2015); 小水井 (符德贵等, 2010); 镇沅 (陈福川等, 2015); 白马寨 (管涛等, 2006); 大坪 (王江海等, 2001; Chen *et al.*, 2014)

的镁铁质火山岩、富碱斑岩研究成果,总结始新世时期钾质岩浆活动过程,为滇西地区地幔演化过程、始新世构造动力学背景提供约束。

### 1 区域地质概况与样品

金沙江结合带代表古特提斯洋在三江地区其中一个分支金沙江洋盆的残留,沿该带断续分布有复理石基质和超基性岩、辉长岩、辉绿岩、玄武岩、硅质岩等岩块组成的混杂岩。60~55 Ma 时期,印度与亚洲大陆开始碰撞。随着板块的持续汇聚,在滇西地区表现为“挤出”构造,沿金沙江结合带发生左旋剪切运动(Leloup *et al.*, 1995; Guo *et al.*, 2016; 宫伟和姜效典, 2017)。在滇西区域沿金沙江—红河一带及扬子西缘、印支地块发育 40~30 Ma 的钾质岩浆活

动,包括煌斑岩、镁铁质火山岩和中酸性富碱斑岩(Guo *et al.*, 2005; Lu *et al.*, 2013, 2015)。

滇西地区新发现的鲁甸煌斑岩岩脉侵位于金沙江结合带混杂岩中,围岩为混杂岩的复理石基质。岩脉总体呈北东—南西向脉状产出,出露长度约为 600 m,宽为 30~50 m(图 2)。岩石类型主要为橄辉云斜煌岩,风化色为土黄色,球形风化发育(图 3)。岩石新鲜面呈深灰色、灰黑色,发育典型的煌斑结构。斑晶主要为辉石(5%~10%)、黑云母(5%~10%)和橄榄石(10%),大小多为 0.4~0.5 mm。橄榄石斑晶呈自形一半自形粒状、似卵状,平行消光,三级黄绿干涉色,无解理,裂理发育,部分沿裂隙及边缘被黑云母交代,可见少量铁质析出(图 3)。辉石主要为单斜辉石,多呈自形柱状,斜消光,显微镜下呈淡绿色,二级蓝—绿干涉色,部分可见环带,杂乱分布或

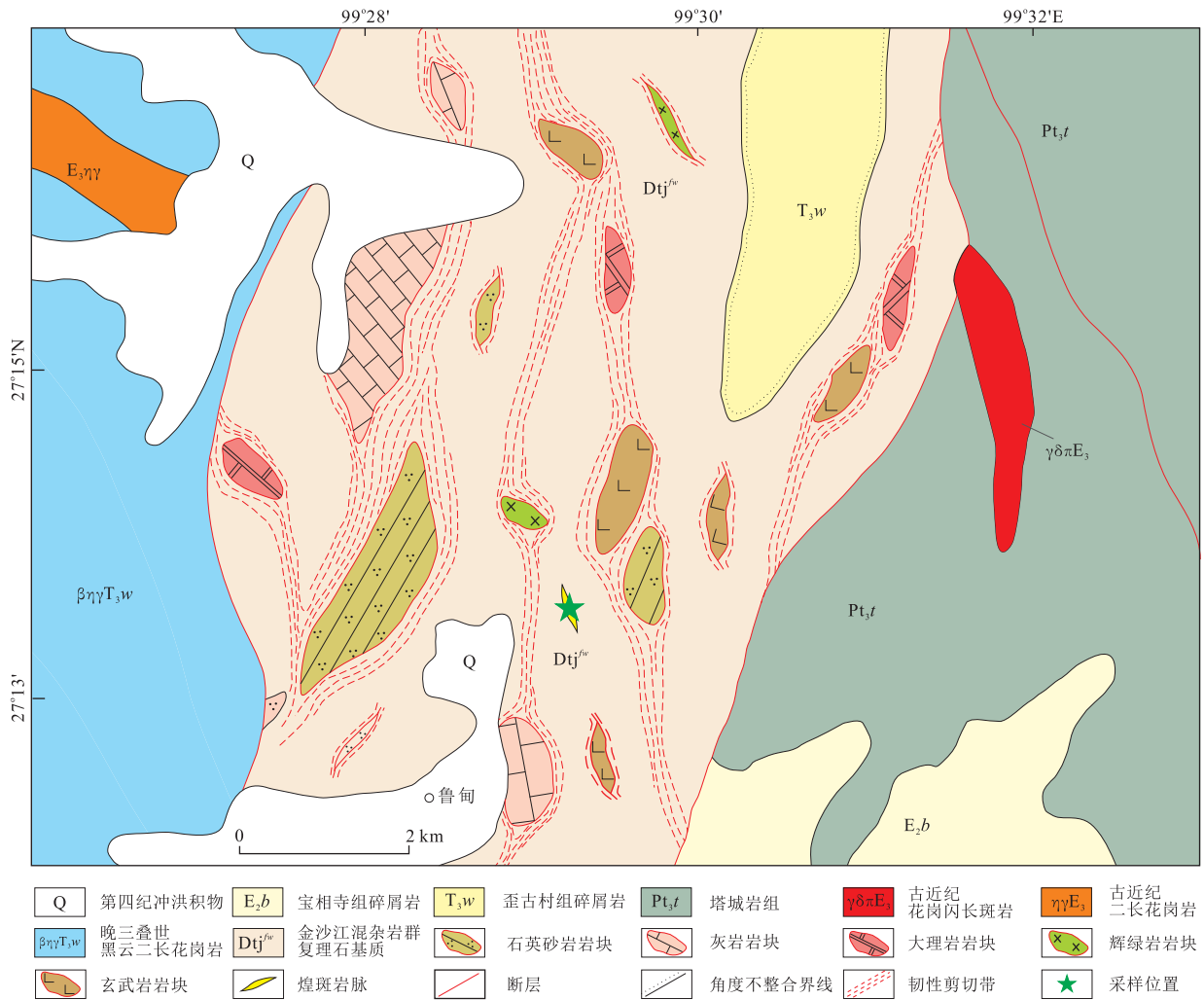


图 2 云南鲁甸地质简图

Fig.2 Geological sketch of Ludian, Yunnan Province



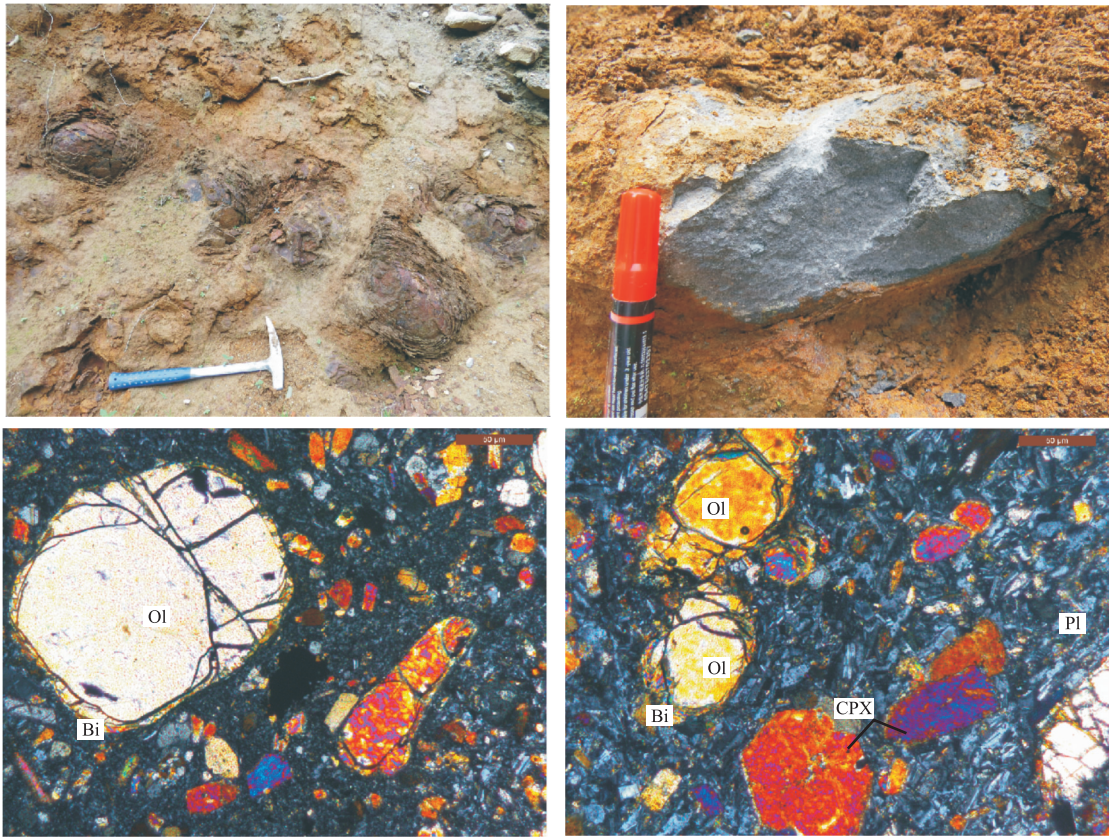


图 3 鲁甸煌斑岩野外露头 and 镜下特征

Fig.3 Outcrop and microphotographs of Ludian lamprophyres

Ol.橄榄石;Bi.黑云母;Pl.斜长石;CPX.单斜辉石

呈聚斑状产出,部分与黑云母呈文象交生.黑云母呈叶片状,多色性强,多沿边部析出铁质、磷灰石等.基质主要由斜长石(65%)、黑云母(15%)和辉石(5%)等组成,粒度多为 0.1~0.3 mm.副矿物主要有磷灰石、磁铁矿和锆石等.

## 2 样品分析方法

煌斑岩中锆石的分选工作由河北省廊坊区域地质调查研究所地质实验室利用常规单矿物分选技术完成,使用环氧树脂凝固成靶.由北京铀年领航科技有限公司对锆石靶进行阴极发光(CL)、透射光和反射光照相,据此选择并标记合适的锆石位置进行 U-Pb 定年.LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成,所用仪器为 Agilent7500a 及与之配套的 193nm ArF 准分子激光器 GeoLas2005 型激光剥蚀系统,测定束斑直径为 32  $\mu\text{m}$ .详细的仪器操作条件和数据处理方法见 Liu *et al.*(2008).

样品主量元素分析在中国地质调查局成都地质

调查中心采用 XRF(RigakuR1X 2100 型)玻璃熔法完成,分析精度优于 4%.微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室采用酸溶法完成,所用仪器为 Perkin-Elmer Sciex ELAN 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS).样品在上机测试之前需要利用  $\text{HNO}_3$ 、 $\text{HF}$  和纯化(3N、4N)  $\text{HClO}_4$  反复进行一系列的溶解.使用美国地质调查局(USGS)和国内双重标准校正所测样品的元素含量.分析精度和准确度一般优于 5%.详细的测定方法和分析流程可参考 Chen *et al.*(2010).

## 3 实验测试结果

### 3.1 锆石 U-Pb 年代学

鲁甸煌斑岩的锆石 U-Pb 年代学测年结果见表 1.煌斑岩锆石颗粒长度为 50~100  $\mu\text{m}$ ,多数具清晰的岩浆振荡环带特征,但形态多样,笔者推测其含有不同成因的捕获锆石.19 颗锆石颗粒的年龄分散,锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄大致被分为 5 组,最新一组

表 1 鲁甸煌斑岩锆石 U-Pb 测年结果  
Table 1 Zircon U-Pb ages for Ludian lamprophyres

测点号	元素含量( $10^{-6}$ )				Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb	Th	U	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
1	375	865	660	1.31	0.071 2	0.002 3	1.521 2	0.048 5	0.154 6	0.001 8	0.049 3	0.001 2	939	20	927	10	
2	212	1 283	1 820	0.70	0.051 3	0.001 8	0.306 4	0.011 4	0.043 1	0.000 5	0.013 6	0.000 4	271	9	272	3	
3	475	1 135	1 239	0.92	0.071 0	0.002 2	0.913 0	0.039 2	0.091 4	0.002 0	0.055 5	0.001 2	659	21	564	12	
4	1 011	2 238	1 780	1.26	0.083 1	0.001 9	1.750 6	0.040 3	0.152 2	0.001 4	0.051 7	0.001 1	1 027	15	913	8	
5	176	8 589	7 227	1.19	0.047 0	0.002 1	0.044 2	0.002 0	0.006 8	0.000 1	0.002 4	0.000 1	44	2	44	1	
8	1 051	1 604	2 819	0.57	0.071 5	0.003 1	1.327 1	0.040 7	0.136 0	0.001 9	0.051 0	0.002 0	858	18	822	11	
9	170	9 827	9 471	1.04	0.048 2	0.002 2	0.035 7	0.001 6	0.005 4	0.000 1	0.001 8	0.000 1	36	2	35	0	
10	600	2 161	7 247	0.30	0.048 1	0.001 4	0.254 1	0.007 8	0.038 1	0.000 5	0.012 4	0.000 4	230	6	241	3	
11	878	1 656	2 094	0.79	0.066 7	0.001 8	1.325 8	0.037 1	0.143 6	0.001 7	0.044 3	0.001 1	857	16	865	10	
12	367	2 690	2 964	0.91	0.049 4	0.001 9	0.270 1	0.009 9	0.039 9	0.000 5	0.012 7	0.000 3	243	8	252	3	
14	242.6	225	2 651	0.08	0.051 7	0.002 2	0.296 2	0.013 7	0.041 5	0.000 6	0.052 7	0.002 3	263	11	262	4	
15	292	290	1 559	0.19	0.058 7	0.002 5	0.703 9	0.032 8	0.087 4	0.001 2	0.041 2	0.001 6	541	20	540	7	
16	115.6	4 151	6 294	0.66	0.048 3	0.002 9	0.043 9	0.002 9	0.006 6	0.000 1	0.002 4	0.000 1	44	3	42	1	
17	215	1 309	2 038	0.64	0.049 6	0.002 8	0.260 2	0.015 9	0.038 3	0.000 5	0.013 6	0.000 5	235	13	242	3	
18	1 400	1 980	2 209	0.90	0.076 6	0.003 8	2.128 7	0.119 6	0.202 6	0.002 6	0.067 8	0.001 8	1 158	39	1 189	14	
19	300	18 923	10 451	1.81	0.051 3	0.003 1	0.043 8	0.002 9	0.006 3	0.000 1	0.002 3	0.000 1	44	3	40	1	
22	553	1 172	1 141	1.03	0.068 3	0.002 7	1.345 9	0.058 1	0.143 3	0.002 0	0.051 1	0.001 4	866	25	863	11	
26	1 367	2 503	1 902	1.32	0.077 7	0.002 1	2.148 1	0.058 2	0.199 4	0.002 2	0.062 3	0.001 4	1 164	19	1 172	12	
27	138	1 052	1 176	0.90	0.051 3	0.002 6	0.280 1	0.013 9	0.039 4	0.000 5	0.012 6	0.000 4	251	11	249	3	

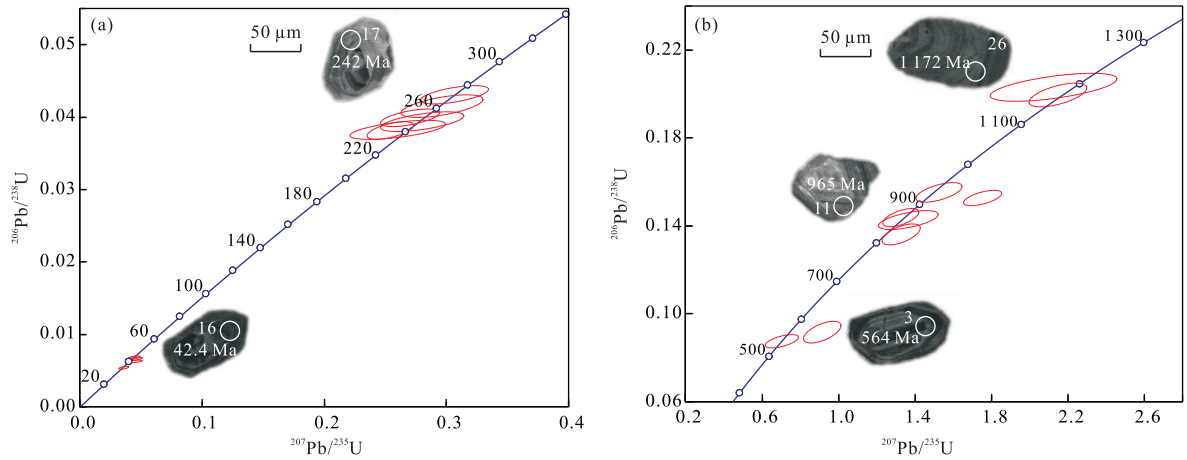


图 4 鲁甸煌斑岩代表性锆石 CL 图像和 U-Pb 年龄谐和图

Fig.4 Zircon CL images and U-Pb concordia diagrams of Ludian lamprophyres  
实线圈及数字代表 U-Pb 同位素测试点位及点号

年龄为 35~44 Ma(图 4),与滇西金沙江—红河富碱斑岩带岩浆活动高峰期(30~45 Ma)一致.前人对金沙江—红河富碱斑岩带中的煌斑岩做了大量的年代学研究,高精度的云母 Ar-Ar 和锆石 U-Pb 测年结果显示其形成时代集中在始新世末期(约 35 Ma;图 1).因此,鲁甸煌斑岩最新一组锆石年龄可能代表了其成岩年龄,与金沙江—红河构造带煌斑岩年龄一致,为始新世末期.较老年龄的锆石可能为岩浆在上升过程中捕获的锆石.

### 3.2 主量元素

鲁甸煌斑岩的主、微量元素分析结果见表 2. Rock(1987)对煌斑岩的研究表明,富含挥发分因而烧失量(LOI)小于 5 的岩石,通常被认为是新鲜的.

鲁甸煌斑岩的 7 件样品显示出较低的烧失量(0.69~2.24),表明岩石样品新鲜.样品 HB01H1 烧失量较高(LOI=5.80),可能受到后期蚀变等影响.

鲁甸煌斑岩的 SiO<sub>2</sub> 含量为 52.91%~57.57%,属中性岩类范畴,其 TiO<sub>2</sub> 含量小于 1.5%(0.70%~0.82%),为低钛煌斑岩,具有较高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(11.16%~13.34%)、富碱(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O; 5.40%~6.28%)特征.鲁甸煌斑岩显示较高的 MgO 含量(6.68%~8.64%)和 Mg<sup>#</sup> 值(62~68),与金沙江—红河构造带同期镁铁质火山岩相似,而明显高于同期酸性富碱斑岩(Huang *et al.*, 2010; Lu *et al.*, 2013).

在 Rock(1987)的 TAS 煌斑岩分类图解中,鲁甸煌斑岩与金沙江—红河构造带煌斑岩一致,其地

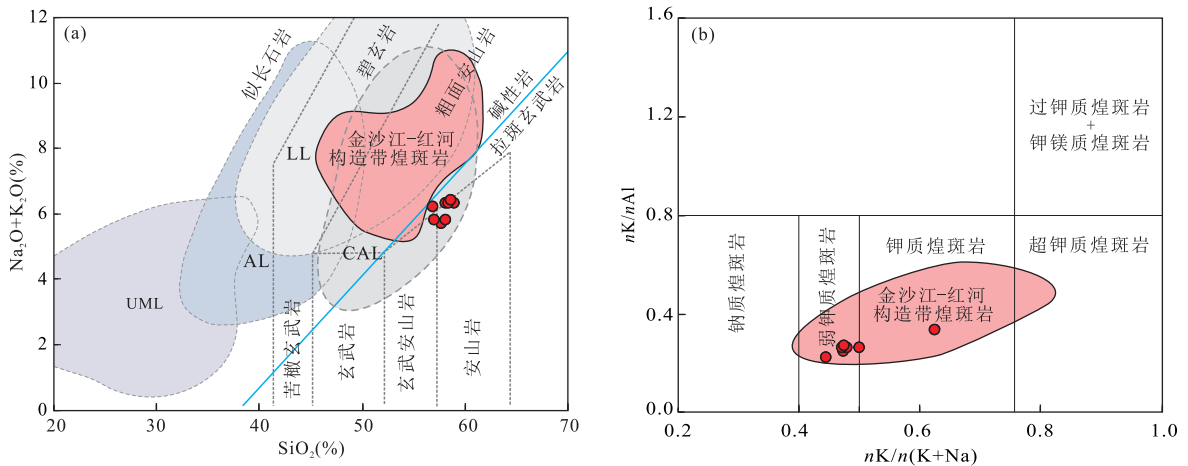


图 5 鲁甸煌斑岩 TAS 分类图解(a)和 nK/n(K+Na) - nK/nAl 图解(b)

Fig.5 TAS diagram (a) and nK/n(K+Na) - nK/nAl diagram (b) of Ludian lamprophyres

图 a 据 Rock(1987);CAL.钙碱性煌斑岩,UML.超基性煌斑岩,AL.碱性煌斑岩,LL.钾镁煌斑岩.图 b 据路凤香等(1991);金沙江—红河构造带煌斑岩数据来自黄智龙和王联魁(1996),管涛等(2006),贾丽琼等(2013),和文言等(2014)

表 2 鲁甸煌斑岩岩石化学分析(%)和稀土元素( $10^{-6}$ )分析结果Table 2 Chemical analysis (%) and rare earth elements ( $10^{-6}$ ) results for the samples of Ludian lamprophyres

样品号	HB-01-H1	HB-02-H1	HB-02-H2	HB-03-H1	HB-04-H1	HB-05-H1	HB-06-H1	HB-07-H1
SiO <sub>2</sub>	52.91	57.33	56.75	57.57	56.89	56.2	56.72	55.96
TiO <sub>2</sub>	0.78	0.74	0.82	0.73	0.73	0.74	0.70	0.71
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.16	12.98	13.05	12.61	12.92	12.04	12.62	13.34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.58	1.63	1.40	1.54	1.09	1.16	1.69	1.64
FeO	6.77	5.65	5.85	5.58	6.25	6.25	5.90	5.89
MnO	0.10	0.14	0.14	0.13	0.14	0.13	0.14	0.14
MgO	8.28	7.15	6.68	7.20	7.46	8.64	8.31	7.82
CaO	5.42	5.60	6.09	5.78	5.84	5.67	6.29	6.44
Na <sub>2</sub> O	1.56	2.70	2.63	2.64	2.61	2.25	2.54	2.62
K <sub>2</sub> O	3.84	3.58	3.52	3.55	3.57	3.36	3.05	3.52
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.33	0.35	0.38	0.34	0.32	0.32	0.33	0.37
LOI	5.80	1.14	1.77	1.44	1.20	2.24	0.84	0.69
Total	98.53	98.99	99.08	99.11	99.02	99.00	99.13	99.14
Sc	18.6	21.9	21.5	21.0	22.8	22.3	21.9	24.6
Ti	4 660	4 912	4 927	4 742	4 833	4 788	4 176	4 694
V	147	180	165	162	176	178	157	178
Cr	269	479	261	256	534	617	511	685
Mn	776	1 212	1 102	1 141	1 256	1 079	1 127	1 233
Co	33.3	34.9	31.9	33.1	36.1	34.7	35.6	39.6
Ni	246	246	219	243	252	253	307	280
Cu	81.0	71.0	67.9	57.6	69.0	59.6	56.5	67.5
Zn	57.8	83.1	83.2	81.4	87.8	63.2	77.1	75.2
Ga	16.0	17.0	16.1	16.7	17.2	16.5	14.2	15.8
Ge	7.93	7.82	6.32	6.56	7.86	7.62	6.89	7.49
Rb	186	152	139	146	151	161	123	156
Sr	575	1 113	915	1 080	1 064	694	715	901
Y	23.5	27.6	26.2	26.4	27.2	26.0	24.6	24.5
Zr	228	254	125	135	244	231	204	216
Nb	9.82	9.99	9.98	9.88	10.1	9.39	8.54	8.60
Cs	17.8	14.2	11.8	15.2	14.2	21.9	8.10	9.00
Ba	846	1 065	946	1 080	1 052	877	754	894
La	24.0	29.4	27.2	28.9	28.4	24.6	22.1	22.6
Ce	48.1	62.2	57.8	60.9	60.3	51.2	46.4	47.0
Pr	5.98	7.99	7.42	7.81	7.76	6.46	5.87	5.94
Nd	23.9	32.1	29.8	31.5	30.8	25.8	23.8	24.0
Sm	4.96	6.30	5.96	6.11	6.05	5.47	5.08	5.09
Eu	1.09	1.51	1.45	1.45	1.43	1.27	1.19	1.25
Gd	4.21	5.22	5.04	5.05	5.02	4.67	4.37	4.39
Tb	0.71	0.87	0.84	0.84	0.85	0.82	0.76	0.75
Dy	4.09	5.01	4.88	4.85	4.97	4.73	4.44	4.41
Ho	0.83	1.01	0.97	0.97	0.98	0.94	0.89	0.87
Er	2.37	2.88	2.73	2.73	2.81	2.69	2.55	2.52
Tm	0.36	0.42	0.40	0.39	0.41	0.40	0.37	0.37
Yb	2.30	2.70	2.48	2.51	2.63	2.54	2.40	2.35
Lu	0.35	0.41	0.37	0.37	0.40	0.39	0.36	0.36
Hf	3.47	3.90	2.33	2.58	3.76	3.54	3.10	3.25
Ta	0.69	0.72	0.70	0.70	0.72	0.67	0.60	0.62
Pb	22.3	29.0	27.2	29.1	29.0	20.4	26.1	24.5
Th	8.88	8.72	8.08	8.84	8.98	8.25	7.47	8.00
U	3.04	3.21	2.68	2.98	3.11	2.87	2.62	2.76



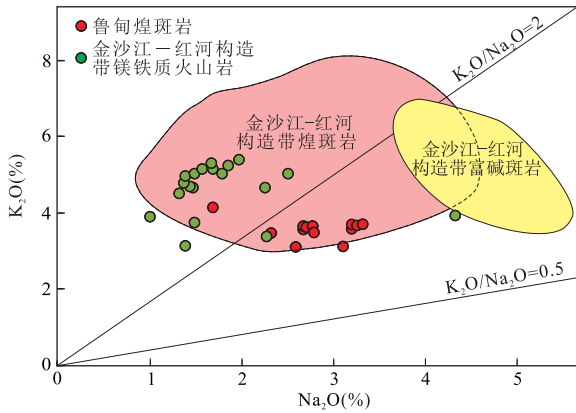


图 6 鲁甸煌斑岩  $K_2O-Na_2O$  图解

Fig.6  $K_2O-Na_2O$  diagram for Ludian lamprophyres 金沙江—红河构造带煌斑岩数据来源同图 5;金沙江—红河构造带富碱斑岩数据来自 Lu *et al.*(2013);金沙江—红河构造带镁铁质火山岩数据来自 Huang *et al.*(2010)

球化学性质属粗面安山岩,落入钙碱性煌斑岩区域(图5a).路凤香等(1991)在前人分类基础上,结合我

国煌斑岩资料,提出煌斑岩的  $K/Al-K/(K+Na)$  分类图解,鲁甸煌斑岩在该图解中被归为弱钾质煌斑岩到钾质煌斑岩(图 5b).鲁甸煌斑岩的  $K_2O/Na_2O$  值介于同期镁铁质火山岩与酸性富碱斑岩之间,在  $K_2O-Na_2O$  图解中其为钾玄质到超钾质系列(图 6).

3.3 微量元素

鲁甸煌斑岩样品的稀土总量为  $120 \times 10^{-6} \sim 158 \times 10^{-6}$ ,平均为  $139 \times 10^{-6}$ .在球粒陨石标准化配分图解中,样品具有右倾的轻稀土富集特征( $La_N/Yb_N=6.6 \sim 8.2$ ),具弱 Eu 负异常( $Eu^*=0.7 \sim 0.8$ )(图 7a).在微量元素原始地幔标准化蛛网图中,样品显示 Rb、Ba、Th、U、Pb 等大离子亲石元素(LILE)富集,Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素(HFSE)亏损的特征(图 7b).整体来看,鲁甸煌斑岩具有与金沙江—红河构造带新生代煌斑岩及镁铁质火山岩相似的特征.

鲁甸煌斑岩样品具有高 Cr( $256 \times 10^{-6} \sim 685 \times 10^{-6}$ )和 Ni( $216 \times 10^{-6} \sim 307 \times 10^{-6}$ )的特征,与高  $Mg^\#$  值一致,显示幔源岩浆性质.在 Ce/Yb-Sm 图解

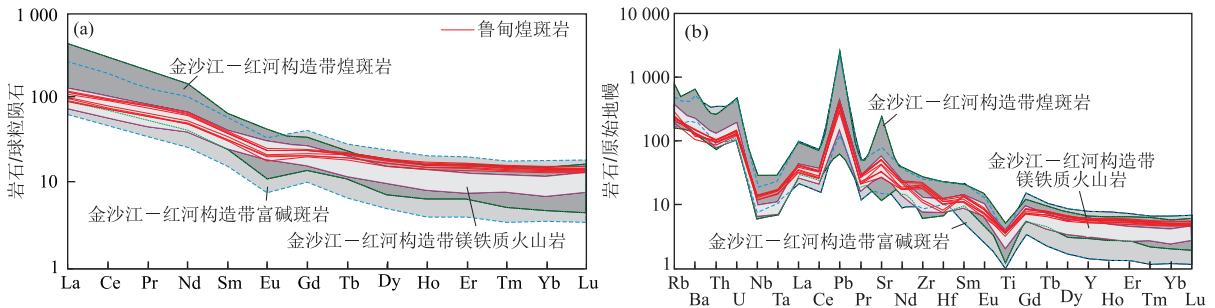


图 7 鲁甸煌斑岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig.7 The chondrite-normalized REE pattern (a) and the PM-normalized trace element spider diagram (b) for Ludian lamprophyres

金沙江—红河构造带煌斑岩、富碱斑岩和镁铁质火山岩数据来源同图 5 和 6;标准化数据引自 Sun and McDonough (1989)

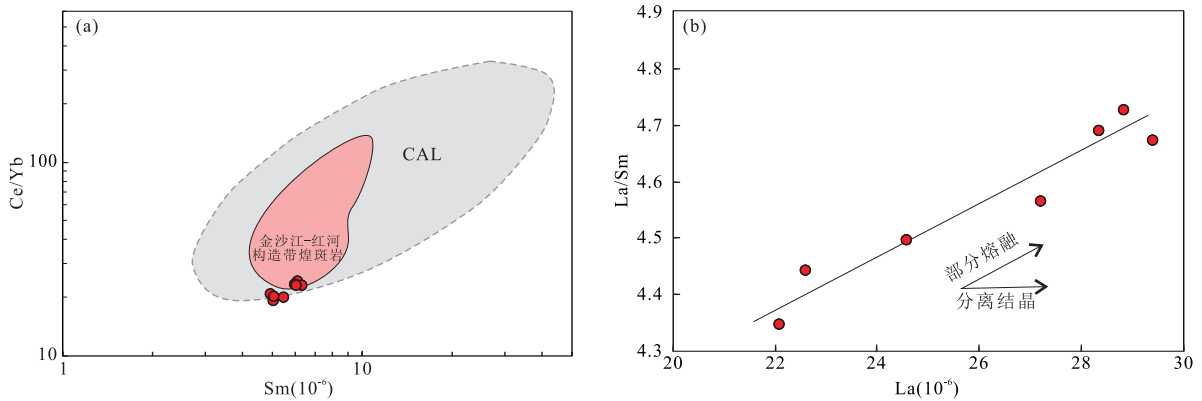


图 8 鲁甸煌斑岩的 Ce/Yb-Sm 图解(a)和 La/Sm-La 图解(b)

Fig.8 Ce/Yb-Sm diagram (a) and La/Sm-La diagram (b) for Ludian lamprophyres

图 a 底图据 Guo *et al.*(2005);图 b 数据来源同图 5



中,鲁甸样品和金沙江—红河构造带煌斑岩样品均落入钙碱性煌斑岩区域(图 8a),与主量元素分类结果相一致。

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因

La/Sm-La 图解被广泛应用于判断岩石形成过程中的部分熔融或分离结晶过程。鲁甸煌斑岩除受蚀变影响的样品 HB01H1 外,其余 7 个样品在 La/Sm-La 图解中形成一条直线,显示部分熔融趋势(图 8b),表明岩浆由源区物质经部分熔融形成,而非基性岩浆的分离结晶作用产物。鲁甸煌斑岩具有较高的 MgO 含量、Mg<sup>#</sup> 值和较高的相容元素 Cr、Ni 含量,表明其全部/部分来源于地幔物质。同时,鲁甸样品富集不相容元素(Rb、Ba、Th、U、K)、亏损 Ta-Nb-Ti、低 Nb/U(3.1~3.7)与 Ce/Pb(1.8~2.5) 比值等特征(图 7b),不同于典型的 MORB 或 OIB 岩浆,在其成岩过程中包含了富集组分。鲁甸煌斑岩样品中较多的捕获锆石表明该富集组分可能为地壳物质。地壳物质混染方式有 2 种,一种是发生了幔源基性岩浆与壳源硅质熔体的混合,另一种是地幔岩浆在上升侵位过程中受到了地壳物质混染。但是,鲁甸煌斑岩的特征元素 Nb/Ta(13.8~14.1)、Zr/Hf(52.4~66.5) 比值均远高于地壳平均值(Nb/Ta=11, Zr/Hf=33; Taylor and McLennan, 1985),且在图 9a 中均远离地幔与陆壳端元,表明其受地壳物质

影响较小,排除壳幔岩浆混合的成因模式。同时,La、Sm、Ba、Rb 与 MgO 不存在明显的负相关性(图略),进一步排除了大规模地壳混染过程。因此,鲁甸煌斑岩显示的富集特征应主要来源于地幔富集过程,其岩浆源区应为交代富集的陆下岩石圈地幔,与金沙江—红河构造带及世界上其他地方多数煌斑岩成因研究结果相一致(Guo *et al.*, 2005; 管涛等, 2006; 贾丽琼等, 2013; Chen *et al.*, 2014; 和文言等, 2014; Lu *et al.*, 2015; 徐恒等, 2015)。鲁甸煌斑岩是交代富集的陆下岩石圈地幔经部分熔融形成,且在岩浆上升过程中受到了少量地壳物质混染。

### 4.2 地幔源区组分

鲁甸煌斑岩总体富碱,高 K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 比值,属钾玄质到超钾质系列,富集大离子亲石元素和轻稀土元素,明显亏损 Ta-Nb-Ti,为钙碱性煌斑岩,由交代富集的陆下岩石圈地幔部分熔融形成。煌斑岩的钾含量远高于地壳平均值(1.1; Taylor and McLennan, 1985),指示其地幔源区存在富钾相矿物,可能为金云母和/或角闪石。由于 Rb、Ba 和 Sr 在金云母与角闪石中的分配系数不同,源自角闪石的熔体具有较低的 Rb/Sr(<0.06)和高的 Ba/Rb(>20) 比值,而与金云母平衡的熔体具有高 Rb/Sr(>0.1) 和低 Ba/Rb 比值(<20),因此 Rb/Sr—Ba/Rb 图解被广泛用于区分源区矿物(Chen *et al.*, 2014; 和文言等, 2014; Lu *et al.*, 2015)。金沙江—红河构造带的煌斑岩与镁铁质火山岩均分布于金云母区域(图 10a),显示源区为含金云母的地幔。同时,鲁甸煌斑

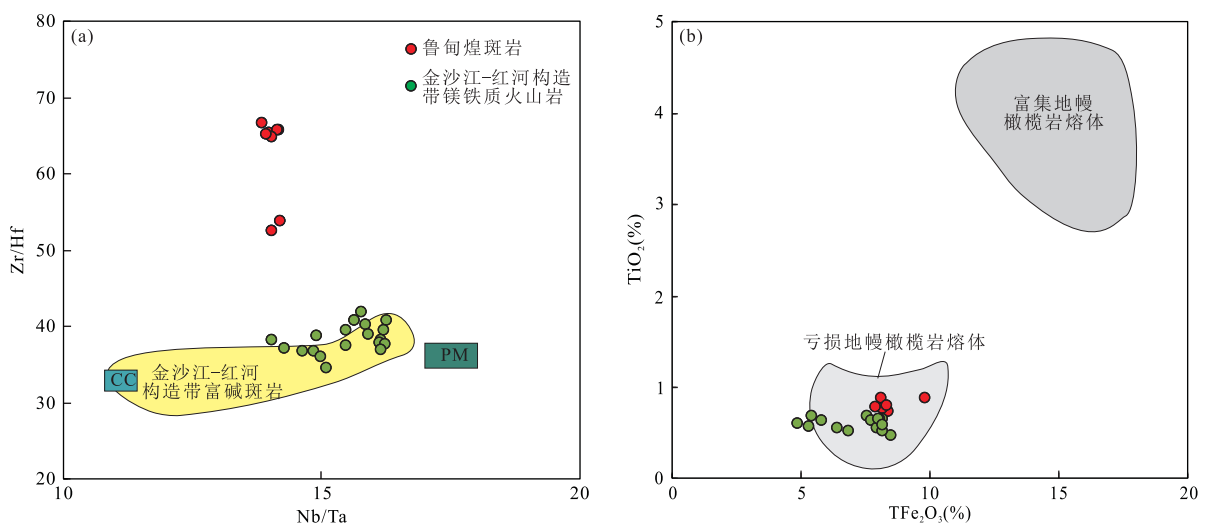


图 9 鲁甸煌斑岩的 Zr/Hf—Nb/Ta 图解(a)和 TiO<sub>2</sub>—TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 图解(b)

Fig. 9 Zr/Hf—Nb/Ta diagram (a) and TiO<sub>2</sub>—TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diagram (b) for Ludian lamprophyres

图 a 据 Sun and McDonough (1989); CC, 陆壳平均值, PM, 原始地幔平均值。图 b 据 Lu *et al.* (2015); 数据来源同图 6

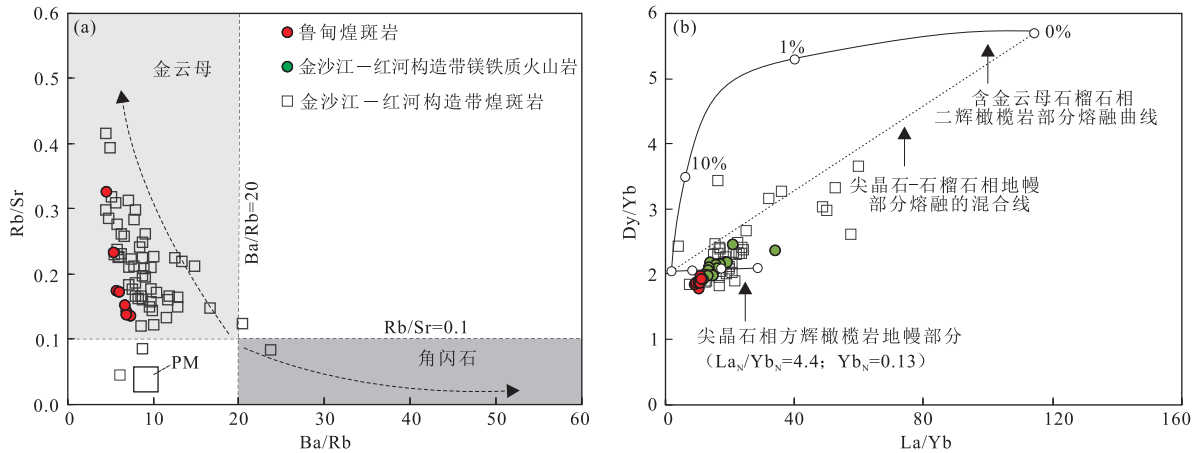


图 10 煌斑岩的 Rb/Sr—Ba/Rb 图解(a)和 Dy/Yb—La/Yb 图解(b)

Fig.10 Rb/Sr—Ba/Rb diagram (a) and Dy/Yb—La/Yb diagram (b) for Ludian lamprophyres

图 b 据和文言等(2014);数据来源同图 5 和 6

岩的高 Yb 含量( $2.3 \times 10^{-6} \sim 2.7 \times 10^{-6}$ )也显示源区无角闪石(Guo *et al.*, 2005).鲁甸煌斑岩的轻稀土元素(LREE)球粒陨石标准化值小于 100、重稀土元素(HREE)球粒陨石标准化值大于 10(图 7a),指示其熔融源区不存在残余的石榴石(Guo *et al.*, 2004).在部分熔融中尖晶石的稳定场通常会产生较低的 Dy/Yb 比值( $< 1.5$ ),而石榴石的稳定场通常会产生较高的 Dy/Yb 比值( $> 2$ )(Miller *et al.*, 1999);鲁甸煌斑岩的 Dy/Yb 比值为 1.8~2.0,金沙江—红河构造带镁铁质火山岩为 1.9~2.4,在 Dy/Yb—La/Yb 图解中均分布于尖晶石相方辉橄榄岩地幔部分熔融趋势线附近(图 10b),由此估算其源区深度为 75~80 km(和文言等, 2014).因此,金沙江—红河构造带的煌斑岩及同期镁铁质火山岩源区为含金云母的尖晶石相方辉橄榄岩组分的陆下岩石圈地幔.在该带马关、八寨等地煌斑岩中的含金云母尖晶石相橄榄岩包体的发现进一步证实了对于源区组分的推论(Wang *et al.*, 2001).

### 4.3 地幔富集过程

鲁甸煌斑岩及金沙江—红河带同期镁铁质火山岩的低  $TiO_2$  和  $TFe_2O_3$  特征,指示其地幔源区为亏损的橄榄岩(图 9b; Lu *et al.*, 2015).因此煌斑岩富集 LILE 和 LREE 的特征表明,在发生部分熔融形成本期岩浆活动之前,陆下岩石圈地幔经历了一个富集过程.金沙江—红河构造带中煌斑岩显著的地球化学特征为普遍亏损 Ta-Nb-Ti(图 7b),实验和实例研究已经证明 Ta-Nb-Ti 亏损是岛弧岩浆的特征,暗示地幔源区可能受到了与俯冲相关的富集作用(Turner, 2002).另一种可能的解释为钛铁矿和/

或金红石在源区的残留,由于其对 Nb、Ta 和 Ti 较高的相容性,使部分熔融形成的岩浆强烈亏损这 3 种元素(Foley and Wheller, 1990).Zr 和 Hf 为极不相容元素,基本不进入主要的地幔矿物相,但可作为 Ti 的类质同象进入副矿物钛铁矿和金红石,当源区有钛铁矿和金红石残留时也表现为亏损特征.金沙江—红河构造带新生代煌斑岩和镁铁质火山岩的 Zr、Hf 不显示相对 Nd、Sm 亏损的特征(图 7b),排除金红石/钛铁矿残留的影响, Ta-Nb-Ti 亏损特征是由于源区受到与俯冲过程相关的富集交代作用.

与俯冲相关的交代作用可大致分为 2 种:一是由洋壳或沉积物脱水形成的俯冲流体(Turner, 2002);二是洋壳或沉积物经部分熔融形成的熔体(Elliott *et al.*, 1997).利用 Th/Zr—Nb/Zr 判别图解,可以将俯冲过程中熔体的富集作用与流体有关的交代作用有效地区分开来.鲁甸煌斑岩的 Th/Zr 值和 Nb/Zr 值呈正相关关系(图 11a),说明其地幔源区的富集作用是熔体和流体交代共同作用形成. Ba/La 比值和 La/Yb 比值被实验和相关研究证明是代表来源于俯冲沉积物和玄武质洋壳流体及熔体的良好指标(Defant and Drummond, 1990),鲁甸煌斑岩与镁铁质火山岩均分布在流体与熔体共同作用的区域内(图 11b).因此,陆下岩石圈地幔的交代富集是洋壳俯冲过程中沉积物与玄武质洋壳脱水形成的流体与部分熔融的熔体共同作用导致.

新生代时期,金沙江—红河构造带远离正在发生的洋壳俯冲带,地幔的富集过程应该由地质历史时期“古老”的俯冲过程形成.前人在对其富集过程的研究中提出了 2 种观点:(1)贾丽琼等(2013)和文

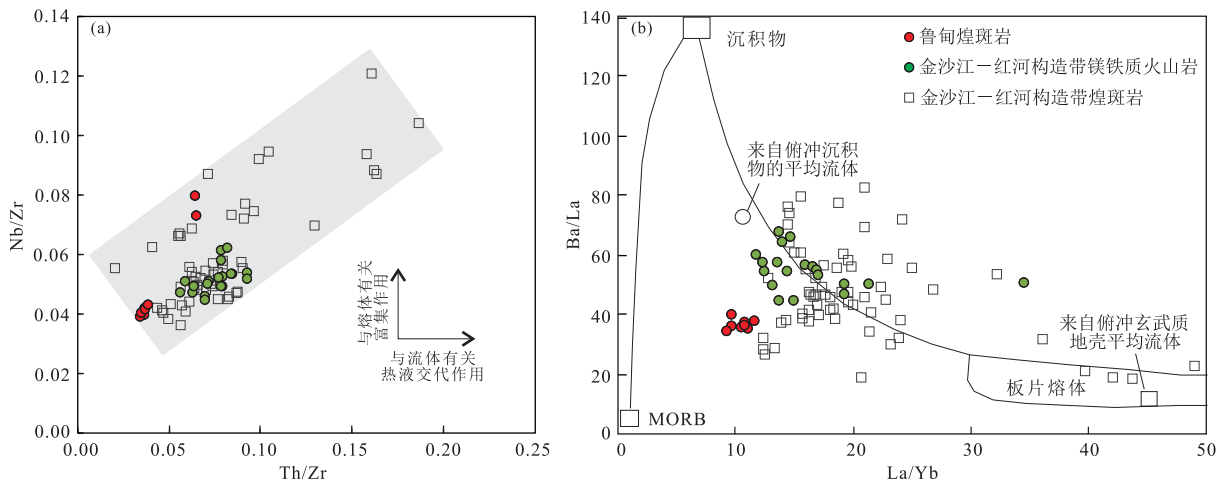


图 11 鲁甸煌斑岩的 Nb/Zr—Th/Zr 图解(a)和 Ba/La—La/Yb 图解(b)

Fig.11 Nb/Zr—Th/Zr diagram (a) and Ba/La—La/Yb diagram (b) for Ludian lamprophyres

图 b 底图据朱弟成等(2006)

言等(2014)通过对金沙江—红河带煌斑岩研究,提出该带陆下岩石圈地幔的富集与二叠纪时期金沙江洋向西俯冲相关;(2)Guo *et al.*(2005)、Chen *et al.*(2014)和 Lu *et al.*(2015)推测其地幔富集过程与元古宙时期的俯冲过程相关,可能为罗迪尼亚超大陆的形成时期.由于新生代煌斑岩、镁铁质火山岩和富碱斑岩并不局限于金沙江—红河构造带,在其东西两侧的扬子地块西缘、昌都—思茅地块均有发育(Guo *et al.*,2005;董方浏等,2007;Lu *et al.*,2012,2013;陈喜峰等,2015;Liu *et al.*,2015,2017),金沙江洋壳的西向俯冲过程不能完全解释扬子西缘陆下岩石圈地幔的富集.因此,金沙江—红河构造带地幔富集过程应主要受元古宙时期的俯冲过程影响,同时可能受到了金沙江洋西向俯冲作用.

#### 4.4 构造动力学背景

金沙江—红河构造带新生代的钾质—超钾质岩浆作用时代集中在 40~30 Ma(Huang *et al.*,2010;Lu *et al.*,2012,2013,2015;Deng *et al.*,2014),岩石组分有煌斑岩、镁铁质火山岩及广泛发育的中酸性富碱斑岩.这些钾质—超钾质岩浆发育于相同的大地构造背景及具有时空上的协同性,可将其结合起来讨论该期岩浆作用的构造动力学背景.研究表明,埃达克质的酸性富碱斑岩来源于加厚下地壳的部分熔融(Lu *et al.*,2013;Liu *et al.*,2015;He *et al.*,2016).镁铁质火山岩与煌斑岩具有一致的岩浆源区,其地球化学性质的部分差异可能源于不同的部分熔融程度或岩浆上升过程中少量地壳物质混染及分离结晶作用(Huang *et al.*,2010;He *et al.*,2016).

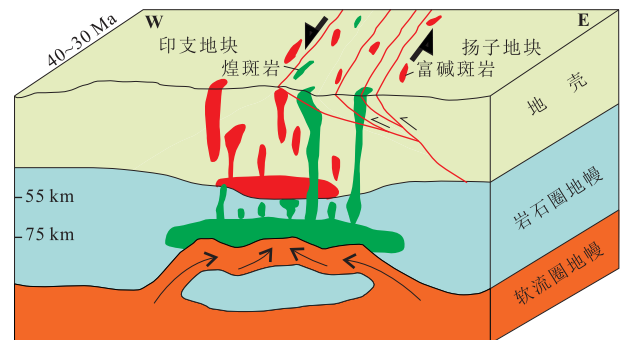


图 12 鲁甸煌斑岩构造岩浆成因模式

Fig.12 Tectono-magmatic model for Ludian lamprophyres

自金沙江洋闭合后,金沙江—红河构造带进入陆内演化阶段(Wang *et al.*,2000),印度与亚洲大陆的持续汇聚在滇西地区表现为“挤出”构造,沿金沙江结合带发生左旋剪切运动(Leloup *et al.*,1995).富碱斑岩体中包体的变质温压条件研究表明,始新世时期滇西区域的地壳厚度约为 55 km.在岩石圈加厚的背景下,处于构造活动区域的岩石圈地幔发生对流减薄或拆沉作用,导致软流圈上涌且发生减压熔融.与侵入的软流圈物质接触的岩石圈地幔发生部分熔融,在元古宙时期经历了与俯冲相关流体和熔体交代作用的岩石圈地幔形成了富集 LILE、LREE 而亏损 HFSE 的岩浆.岩浆沿先期深大断裂带侵入地壳浅部或喷出地表,形成煌斑岩和镁铁质火山岩.地幔部分熔融的岩浆在上升过程中为加厚的下地壳物质提供热量,使其发生部分熔融并与之混合,生成滇西地区广泛发育的富碱斑岩岩浆(图 12).富碱斑岩中包体的性质与成因研究证实

了下地壳区域的岩浆混合模式(He *et al.*, 2016)。

## 5 结论

(1)金沙江—红河构造带中段新发现的鲁甸煌斑岩的锆石 U-Pb 年龄结果显示,其形成时代为始新世末期,与该带岩浆活动高峰期一致。鲁甸煌斑岩为钙碱性煌斑岩,具有富集大离子亲石元素(LILE)、轻稀土元素(LREE),亏损高场强元素(HFSE,尤其是 Ta-Nb-Ti)的特征。

(2)鲁甸煌斑岩由富集岩石圈地幔部分熔融形成,源区物质为含金云母的尖晶石相橄榄岩。滇西地区岩石圈地幔的富集成因可能为元古宙时期与罗迪尼亚超大陆形成有关的洋壳俯冲过程中流体和熔体的交代作用。

(3)始新世时期(40~30 Ma),在印度—亚洲大陆汇聚作用影响下,滇西地区加厚的岩石圈地幔发生拆沉或对流减薄,软流圈地幔的上涌导致岩石圈地幔部分熔融形成煌斑岩和镁铁质火山岩,幔源岩浆上升过程中引发加厚下地壳物质熔融,形成富碱斑岩体。

致谢:本次研究工作的完成得益于成都地质调查中心王保弟研究员、王冬兵高级工程师的指导和倾力支持,在此表示衷心的感谢。感谢两位审稿专家对本文的修改完善提出的宝贵意见。

## References

- Chen, F. C., Wang, Q. F., Li, G. J., et al., 2015.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  Chronological and Geochemical Characteristics of Zhenyuan Lamprophyres in Ailaoshan Belt, Western Yunnan. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3203—3216 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. L., Xu, J. F., Wang, B. D., et al., 2010. Origin of Cenozoic Alkaline Potassic Volcanic Rocks at Konglongxiang, Lhasa Terrane, Tibetan Plateau: Products of Partial Melting of a Mafic Lower-Crustal Source. *Chemical Geology*, 273(3—4): 286—299. <https://doi.org/10.13039/501100002367>
- Chen, X. F., Zeng, P. S., Zhang, X. T., et al., 2015. Petrology and Geochemistry of the Zhuopan Alkaline Complex in Yongping, Yunnan Province: Constraints on Petrogenesis and Tectonic Setting. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2597—2608 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. H., Yao, S. Z., Pan, Y. M., 2014. Geochemistry of Lamprophyres at the Daping Gold Deposit, Yunnan Province, China: Constraints on the Timing of Gold Mineralization and Evidence for Mantle Convection in the Eastern Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 93: 129—145. <https://doi.org/10.13039/501100004613>
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662—665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Deng, J., Wang, Q. F., Li, G. J., et al., 2014. Cenozoic Tectono-Magmatic and Metallogenic Processes in the Sanjiang Region, Southwestern China. *Earth-Science Reviews*, 138: 268—299. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.05.015>
- Dong, F. L., Mo, X. X., Yu, X. H., et al., 2007. Trace Elements Geochemical and Nd-Sr-Pb Isotopes Characteristics of the Zhuopan Alkaline Complex in Yongping, Yunnan Province and Its Geological Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 986—994 (in Chinese with English abstract).
- Elliott, T., Plank, T., Zindler, A., et al., 1997. Element Transport from Slab to Volcanic Front at the Mariana Arc. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B7): 14991—15019. <https://doi.org/10.1029/97jb00788>
- Foley, S. F., Wheller, G. E., 1990. Parallels in the Origin of the Geochemical Signatures of Island Arc Volcanics and Continental Potassic Igneous Rocks: The Role of Residual Titanates. *Chemical Geology*, 85(1—2): 1—18. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(90\)90120-v](https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90120-v)
- Fu, D. G., Zhou, Y. M., Zhang, C. Q., et al., 2010. Geological Characteristics of Lamprophyres and Their Relations with Gold Mineralization of the Xiaoshuijing Gold Deposit in Central Yunnan Province. *Geology and Exploration*, 46(3): 414—425 (in Chinese with English abstract).
- Gong, W., Jiang, X. D., 2017. Thermal Evolution History and Its Genesis of the Ailao Shan-Red River Fault Zone in the Ailao Shan and Day Nui Con Voi Massif during Oligocene-Early Miocene. *Earth Science*, 42(2): 223—239. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.017>
- Guan, T., Huang, Z. L., Xu, C., et al., 2006.  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  Dating and Geochemical Characteristics of Lamprophyres in the Baimazhai Nickel Deposit, Yunnan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 873—883 (in Chinese with English abstract).
- Guo, F., Fan, W. M., Wang, Y. J., et al., 2004. Origin of Early Cretaceous Calc-Alkaline Lamprophyres from the Sulu Orogen in Eastern China: Implications for Enrichment Processes beneath Continental Collisional Belt. *Lithos*, 78(3): 291—305. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.05.015>



- 2004.05.001
- Guo, X. F., Wang, Y. J., Liu, H. C., et al., 2016. Zircon U-Pb Geochronology of the Cenozoic Granitic Mylonite along the Ailaoshan-Red River Shear Zone: New Constraints on the Timing of the Sinistral Shearing. *Journal of Earth Science*, 27 (3): 435 – 443. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0678-2>
- Guo, Z. F., Hertogen, J., Liu, J. Q., et al., 2005. Potassic Magmatism in Western Sichuan and Yunnan Provinces, SE Tibet, China: Petrological and Geochemical Constraints on Petrogenesis. *Journal of Petrology*, 46 (1): 33 – 78. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh061>
- He, W. Y., Mo, X. X., Yang, L. Q., et al., 2016. Origin of the Eocene Porphyries and Mafic Microgranular Enclaves from the Beiya Porphyry Au Polymetallic Deposit, Western Yunnan, China: Implications for Magma Mixing/Mingling and Mineralization. *Gondwana Research*, 40: 230 – 248. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.09.004>
- He, W. Y., Mo, X. X., Yu, X. H., et al., 2014. Genesis and Geodynamic Settings of Lamprophyres from Beiya, Western Yunnan: Constraints from Geochemistry, Geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (11): 3287 – 3300 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., 2003. The Himalayan Yulong Porphyry Copper Belt: Product of Large-Scale Strike-Slip Faulting in Eastern Tibet. *Economic Geology*, 98 (1): 125 – 145. <https://doi.org/10.2113/98.1.125>
- Huang, X. L., Niu, Y., Xu, Y. G., et al., 2010. Mineralogical and Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Post-Collisional Potassic and Ultrapotassic Rocks from Western Yunnan, SW China. *Journal of Petrology*, 51 (8): 1617 – 1654. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq032>
- Huang, Z. L., Wang, L. K., 1996. Geochemistry of Lamprophyres in Laowangzhai Gold Deposit, Yunnan Province. *Geochemistry*, 25 (3): 249 – 255 (in Chinese with English abstract).
- Jia, L. Q., Mo, X. X., Dong, G. C., et al., 2013. Genesis of Lamprophyres from Machangqing, Western Yunnan: Constraints from Geochemistry, Geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (4): 1247 – 1260 (in Chinese with English abstract).
- Leloup, P. H., Lacassin, R., Tapponnier, P., et al., 1995. The Ailao Shan-Red River Shear Zone (Yunnan, China), Tertiary Transform Boundary of Indochina. *Tectonophysics*, 251 (1 – 4): 3 – 84. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00070-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00070-4)
- Lin, B., Wang, L. Q., Tang, J. X., et al., 2017. Zircon U-Pb Geochronology of Ore-Bearing Porphyries in Baomai Deposit, Yulong Copper Belt, Tibet. *Earth Science*, 42 (9): 1454 – 1471 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.517>
- Liu, B., Liu, H., Zhang, C. Q., et al., 2015. Geochemistry and Geochronology of Porphyries from the Beiya Gold-Poly-metallic Orefield, Western Yunnan, China. *Ore Geology Reviews*, 69: 360 – 379. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.004>
- Liu, Y. S., Hu, Z. C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257 (1 – 2): 34 – 43. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.08.004>
- Liu, Z., Liao, S. Y., Wang, J. R., et al., 2017. Petrogenesis of Late Eocene High Ba-Sr Potassic Rocks from Western Yangtze Block, SE Tibet: A Magmatic Response to the Indo-Asian Collision. *Journal of Asian Earth Sciences*, 135: 95 – 109. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Lu, F. X., Shu, X. X., Zhao, C. H., 1991. A Suggestion on Classification of Lamprophyres. *Geological Science and Technology Information*, 10: 55 – 62.
- Lu, Y. J., Campbell McCuaig, T., Li, Z. X., et al., 2015. Paleogene Post-Collisional Lamprophyres in Western Yunnan, Western Yangtze Craton: Mantle Source and Tectonic Implications. *Lithos*, 233: 139 – 161. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Lu, Y. J., Kerrich, R., Cawood, P. A., et al., 2012. Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology of Potassic Felsic Intrusions in Western Yunnan, SW China: Constraints on the Relationship of Magmatism to the Jinsha Suture. *Gondwana Research*, 22 (2): 737 – 747. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.11.016>
- Lu, Y. J., Kerrich, R., McCuaig, T. C., et al., 2013. Geochemical, Sr-Nd-Pb, and Zircon Hf-O Isotopic Compositions of Eocene-Oligocene Shoshonitic and Potassic Adakite-Like Felsic Intrusions in Western Yunnan, SW China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Journal of Petrology*, 54 (7): 1309 – 1348. <https://doi.org/10.1093/petrology/egt013>
- Miller, C., Schuster, R., Klötzli, U., et al., 1999. Post-Collisional Potassic and Ultrapotassic Magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O Isotopic Constraints for Mantle Source Characteristics and Petrogenesis. *Journal of Petrology*, 40 (9): 699 – 715.
- Rock, N. M. S., 1987. The Nature and Origin of Lamprophyres: An Overview. *Geological Society, London, Special Publications*, 30 (1): 191 – 226. <https://doi.org/10.1093/petrology/egt013>

1144/gsl.sp.1987.030.01.09

- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. In: Saunder, A. D., Norry, M. J., eds., *Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications*, 42 (1): 313 — 345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution. An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks.* Blackwell Scientific Publication, Boston.
- Turner, S. P., 2002. On the Time-Scales of Magmatism at Island-Arc Volcanoes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1801): 2853—2871.
- Wang, J. H., Qi, L., Yin, A., et al., 2001. Emplacement Age and PGE Geochemistry of Lamprophyres in the Laowangzhai Gold Geyosit, Yunnan, SW China. *Science in China (Series D)*, 31(S1): 122—127 (in Chinese).
- Wang, J. H., Yin, A., Harrison, T. M., et al., 2001. A Tectonic Model for Cenozoic Igneous Activities in the Eastern Indo-Asian Collision Zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 188 (1—2): 123—133. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(01\)00315-6](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(01)00315-6)
- Wang, X. F., Metcalfe, I., Jian, P., et al., 2000. The Jinshajiang-Ailaoshan Suture Zone, China: Tectonostratigraphy, Age and Evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6): 675—690. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(00\)00039-0](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(00)00039-0)
- Xu, H., Cui, Y. L., Zhang, M. H., et al., 2015. Geochemistry and Geochronology of the Lamprophyres in the Bijiashan Ore Deposit, Dali City, Yunnan Province. Implications for Source Region and Diagenetic Environment. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 35(3): 41—51 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, X., Mo, X. X., Yu, X. H., et al., 2003. Mineralogical Characteristics and Petrogenesis of Deep-Derived Xenoliths in Cenozoic Syenite-Porphyry in Liuhe, Western Yunnan Province. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 93—104.
- Zhu, D. C., Pan, G. T., Mo, X. X., et al., 2006. Late Jurassic—Early Cretaceous Geodynamic Setting in Middle-Northern Gangdese: New Insights from Volcanic Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 534—546 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈福川, 王庆飞, 李龚健, 等, 2015. 滇西哀牢山镇沉煌斑岩  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  年代学和地球化学特征. *岩石学报*, 31(11): 3203—3216.
- 陈喜峰, 曾普胜, 张雪亭, 等, 2015. 云南永平卓潘碱性杂岩体岩石学和地球化学特征及成因研究. *岩石学报*, 31(9): 2597—2608.
- 董方浏, 莫宣学, 喻学惠, 等, 2007. 云南永平卓潘新生代碱性杂岩体的元素地球化学和 Nd-Sr-Pb 同位素特征及地质意义. *岩石学报*, 23(5): 986—994.
- 符德贵, 周文满, 张长青, 等, 2010. 滇中小水井金矿煌斑岩特征及与金矿化的关系. *地质与勘探*, 46(3): 414—425.
- 宫伟, 姜效典, 2017. 哀牢山—红河断裂带哀牢山—一大象山段渐新一早中新世热史演化及成因. *地球科学*, 42(2): 223—239. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.017>
- 管涛, 黄智龙, 许成, 等, 2006. 云南白马寨镍矿区煌斑岩  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  定年和地球化学特征. *岩石学报*, 22(4): 873—883.
- 和文言, 莫宣学, 喻学惠, 等, 2014. 滇西北衙煌斑岩的岩石成因及动力学背景: 年代学、地球化学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素约束. *岩石学报*, 30(11): 3287—3300.
- 黄智龙, 王联魁, 1996. 云南老王寨金矿区煌斑岩的地球化学. *地球化学*, 25(3): 249—255.
- 贾丽琼, 莫宣学, 董国臣, 等, 2013. 滇西马厂箐煌斑岩成因: 地球化学、年代学及 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素约束. *岩石学报*, 29(4): 1247—1260.
- 林彬, 王立强, 唐菊兴, 等, 2017. 西藏玉龙铜矿带包买矿床含矿斑岩锆石 U-Pb 年代学. *地球科学*, 42(9): 1454—1471. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.517>
- 路凤香, 舒小辛, 赵崇贺, 1991. 有关煌斑岩分类的建议. *地质科技情报*, 10: 55—62.
- 王江海, 漆亮, 尹安, 等, 2001. 云南老王寨金矿区煌斑岩的侵位年龄和铂族元素地球化学. *中国科学(D辑)*, 31(S1): 122—127.
- 徐恒, 崔银亮, 张苗红, 等, 2015. 云南大理笔架山矿区煌斑岩地球化学、年代学及其对源区和成岩环境的指示. *矿物岩石*, 35(3): 41—51.
- 赵欣, 莫宣学, 喻学惠, 等, 2003. 滇西六合地区新生代正长斑岩中深源包体的矿物学特征与成因意义. *地学前缘*, 10(3): 93—104.
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等, 2006. 冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世地球动力学环境: 火山岩约束. *岩石学报*, 22(3): 534—546.