

峨眉山大火成岩省基性墙群几何学研究及对地幔柱中心的指示意义*

李宏博^{1,2} 张招崇^{1**} 吕林素^{1,2}

LI HongBo^{1,2}, ZHANG ZhaoChong^{1**} and LÜ LinSu^{1,2}

1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室,北京 100083

2. 中国地质博物馆,北京 100034

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Geological Museum of China, Beijing 100034, China

2010-05-01 收稿, 2010-06-21 改回.

Li HB, Zhang ZC and Lü LS. 2010. Geometry of the mafic dyke swarms in Emeishan large igneous province: Implications for mantle plume. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10):3143–3152

Abstract Based on regional geological information at scale of 1 : 200000 and 1 : 50000 and our field observation, we study the geometry of mafic (diabase) dyke swarms in Emeishan large igneous province (ELIP). The pattern of the dyke swarms is radiating from a centre, which is composed of six giant dyke swarms with radiate angle $\sim 200^\circ$. The centre is located at the Yongren area, Yunnan Province, which likely locates the centre of mantle plume head which was responsible for the Permian Emeishan flood basalt event. Our new results from the dyke swarms are consistent with the location of the maximum crust uplift inferred by previous study from stratigraphic study. There are more dyke swarms in the middle and east than west, which can plausibly be interpreted by different erosion during post-LIP event.

Key words Emeishan large igneous province; Mafic dyke swarms; Geometry; Mantle plume

摘要 本文以 1 : 20 万和 1 : 5 万区调资料为基础,结合野外观察研究了峨眉山大火成岩省主要分布区内的基性(辉绿岩)岩墙群的几何学特征。结果表明,岩墙群的几何学特征表现为中心放射状,由 6 条巨型岩墙群组成,辐射角度近 200° 。其中心收敛于永仁一带,与地层学指示的最大隆起位置吻合,指示了二叠纪峨眉山玄武岩事件的地幔柱中心位置。岩墙群分布呈中东部较多而西部少的特点,这可能与不同的剥蚀程度有关。

关键词 峨眉山大火成岩省;基性岩墙群;几何学;地幔柱

中图法分类号 P542.5; P588.24

1 引言

峨眉山大火成岩省(ELIP)是目前我国唯一被国际地学界所承认的大陆流溢玄武岩省,以喷发于中二叠世时期的峨眉山玄武岩为主体,广布于中国西南地区(扬子克拉通西缘),空间范围南北长超过 1000km,东西宽超过 900km(宋谢炎等, 2002)。ELIP 被广泛地认为是地幔柱作用的产物,

除地球化学证据(Chung and Jahn, 1995; 徐义刚和钟孙霖, 2001; Xiao *et al.*, 2004)外,其它关键证据主要包括大规模岩浆作用爆发前岩石圈发生的千米级抬升(He *et al.*, 2003; Xu *et al.*, 2004)、高温苦橄岩(张招崇和王福生, 2002; Zhang *et al.*, 2006a)和苦橄岩橄榄石斑晶中自然金和自然铜的发现(Zhang *et al.*, 2006b)等。然而,在已经识别出的与地幔柱有关的大火成岩省中,地幔柱岩浆作用前的岩石圈千米级抬升不是一个普遍现象,如 ELIP 中可能存在的岩石圈

* 本文受国家自然科学基金(40925006)、教育部博士点基金(20090022110006)、973 项目(2009CB421002)和 111 计划(B07011)联合资助。

第一作者简介:李宏博,男,1978 年生,博士,助理研究员,岩石学专业,E-mail: li_h_b@sina.com.cn

** 通讯作者:张招崇,E-mail: zczhang@cugb.edu.cn

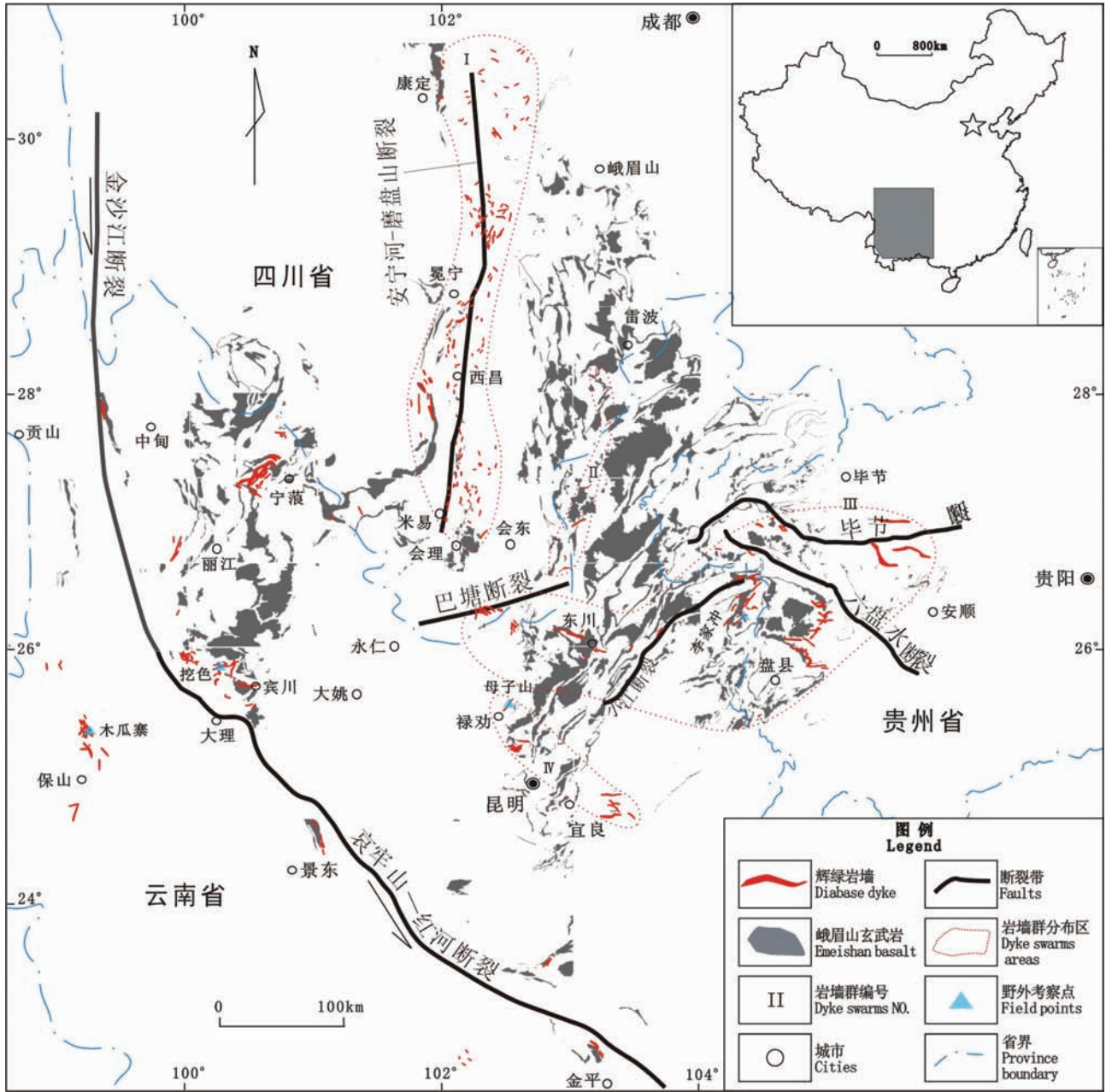


图1 ELIP 辉绿岩墙群分布图

玄武岩分布据 1:20 万区域地质调查资料重新绘制而成. 岩墙走向同原图, 长度略有延长. 有关岩墙群的详细说明见正文

Fig.1 Distribution of ELIP diabase dyke swarms

This map was based on the regional geologic survey reports and maps. The dyke strike is drawn on the light of regional geologic survey maps, but the length is artificially extended for clear observation. The detail information of dyke swarms can be seen in the text

千米级抬升最近就受到了质疑 (Peate and Bryan, 2008, 2009). 除高温苦橄岩和自然金等高压矿物可指示地幔柱的存在外, 巨型放射状岩墙群也是识别地幔柱存在与否的一个关键地质标志 (Bryan and Ernst, 2008). 一般认为, 大火成岩省中的基性岩墙群与地幔柱存在密切关系 (Ernst and Buchan, 1997; Campbell, 2001). 放射状岩墙群是与地幔柱有关的岩浆沿张性裂隙侵入而形成的. 长度超过 300km 的巨型岩墙

群的几何学研究是判别和指示地幔柱的重要方法, 因为其收敛中心指示了地幔柱头部的中心位置 (Ernst and Buchan, 1997, 2001; Ernst *et al.*, 1995a, b; Bryan and Ernst, 2008). 应用基性岩墙群的几何学特征对前寒武纪 LIP (如 Mackenzie LIP, Baragar *et al.*, 1996) 和中大西洋古陆重建 (Ernst and Buchan, 2001) 的研究都取得了重要的成果, 并为多数学者所接受 (Baragar *et al.*, 1996; Ernst and Buchan, 1997; Bryan

表 1 ELIP 辉绿岩墙统计表(岩墙排序从外缘到中心)

Table 1 ELIP diabase dyke swarms (from distal edge to centre)

编号	岩墙名称	位置	产状、走向及规模	时代及侵入地层(最新)	岩性
I号岩墙群					
I-01	石栏菜—阿东梁子岩墙	四川省康定县石栏菜、海船石一带及阿东梁子等地	岩墙,近 SN	二叠系,中、上泥盆统(D _{2,3})	辉绿岩
I-02	狮子崖岩墙	四川省康定县城北狮子崖	岩墙, NNE-SSW 向展布,长约 4.5km,宽 0.8km,面积 3.6km ²	二叠纪,泥盆系和二叠系岩层	辉绿岩
I-03	天全岩墙(脉)	四川省泸定县城北大渡河两岸	呈脉、脉群状产出,以 NE 组较发育,NW 组次之,倾角一般较陡,脉的大小不等,一般宽数米至数十米,长数米至数百米	二叠纪,中二叠统大隆组(P _{2d})	辉绿岩
I-04	黄草山-新民岩墙(脉)	四川省泸定县冷碛镇二郎山、石棉县新民乡及黄草山一带	岩脉,以 SN, NNE, NNW 为主,厚 0.1~20m,长几米至几百米	二叠系,黄草山元古代花岗岩体(γ_2),及中泥盆统	辉绿岩
I-05	托乌岩墙	四川省冕宁县拖乌乡	岩墙,岩脉,NE,EW	二叠纪,古生界地层	辉绿岩
I-06	解放桥-哈哈岩墙	四川省冕宁县解放桥至哈哈乡一带	岩墙,受区域构造控制呈 NE 向展布,长度大于 5km,可见宽度小于 650m	二叠纪,中泥盆统棋梓桥组(D _{2q})	辉绿岩
I-07	河边乡-南河岩墙	四川省冕宁县河边乡米市铺子及南河以北	岩墙,近 SN,面积在 0.5~2km ²	二叠纪,二叠系峨眉山玄武岩(P _{2β})	辉绿岩
I-08	安宁河岩墙	四川省冕宁县安宁河东林里乡至铁厂乡一带	岩墙,SN,NNE	二叠系,晚古生代普通花岗岩(γ_2^2)	辉绿岩
I-09	银厂岩墙	四川省西昌市银厂乡	岩墙(脉),NW	二叠纪,下二叠统(P ₁)	辉绿岩
I-10	盐源岩墙(脉)	四川省盐源县大板山、官房沟、牛场及明子山等地	岩墙,岩脉,NE,SN,其中大板山岩墙,近 SN,长 16km,东西宽 5km。其他岩脉宽数米,至数十米,延长数百米至数千米	二叠纪,上二叠统乐平组(P _{2l})下二叠统 P ₁ ,包括茅口组、栖霞组和梁山组)	辉绿辉长岩,辉绿岩
I-11	磨盘山岩墙	四川省西昌市磨盘山	岩墙,SN,NNW	二叠纪,二叠系峨眉山玄武岩(P _{2β})	辉绿岩
I-12	螺髻山岩墙(脉)	四川省西昌市螺髻山	岩墙,岩脉,35°∠20°,宽 515m,长 20~50m	晚二叠纪,上震旦统喇叭岗组(Z _{1l})	辉绿岩
I-13	德昌岩墙	四川省德昌县茨达乡茨达河沿岸	岩墙,SN,NNW,NNE	二叠纪,前寒武地层(P _{1hl})	辉绿岩
II号岩墙群					
II-01	雷波岩墙	四川省雷波县一车乡溜筒河沿岸	岩墙,SN	二叠纪,下二叠统(P ₁)	辉绿岩
II-02	金阳岩墙	四川省金阳县老寨子乡	岩墙,NE	二叠纪,二叠系峨眉山玄武岩(P _{2β})	辉绿岩,辉绿玢岩
II-03	鲁甸岩墙	四川省鲁甸县龙树乡	岩墙,NE	二叠纪,下二叠统栖霞组至茅口组(P _{1q-m})	辉绿岩,辉绿玢岩
II-04	鲁吉岩墙	四川省会东县鲁吉乡上桃园	岩墙,SN,NE,长 100~200m,宽 10~15m	二叠纪,下二叠统(P ₁)	辉绿玢岩
III号岩墙群					
III-01	毕节岩墙	贵州省毕节市纳雍、对门寨、张家寨、箐门口、高坡和珠场等地	岩墙,近 EW,NW,其中箐门口岩墙最大,长 15km,宽 20~70m	二叠纪,二叠系峨眉山玄武岩(P _{2β})	辉绿岩

续表 1

Continued Table 1

编号	岩墙名称	位置	产状、走向及规模	时代及侵入地层(最新)	岩性
III-02	威宁岩墙	贵州省威宁市幺站乡至珠市乡一带	岩墙, EW, NWW, NW	二叠纪, 下二叠统栖霞组至茅口组(P_1q-m)	辉绿岩
III-03	杨柳-格宜岩墙	云南省宣威市杨柳乡至格宜乡一带	岩墙, NE, EW, NW, 长 3 ~ 4km, 宽 300m	二叠纪, 二叠系峨眉山玄武岩($P_2\beta$)及下二叠统栖霞组第二段至茅口组(P_1q^2-m)	辉绿岩
III-04	白沙岩墙	贵州省普安县白沙乡降阶坪、大箐头一带	岩墙, NEE 断续展布, 分布范围长约 3km, 宽约 1km, 规模大者长 250m, 宽 50 ~ 70m	二叠纪, 下石炭统大塘组至摆佐组(C_1d-b)	辉绿岩, 辉绿玢岩
III-05	盘县岩墙	贵州省盘县顺场乡格所河西岸	岩墙, EW, NW	二叠纪, 下二叠统茅口组(P_1m)	辉绿岩
III-06	富村岩墙	云南省富源县富村镇	岩墙, NE	二叠纪, 下二叠统茅口组(P_1m)	辉绿岩
III-07	李家冲岩墙	云南省宣威市龙场镇	岩墙, NW, NE, 长约 600m, 最宽 300m	二叠纪, 上二叠统茅口组(P_1m)	辉绿岩
III-08	分箐地岩墙	云南省会泽县驾车乡分箐地西约 1km	岩墙, NE, 近 EW, NW	二叠纪, 下震旦统澄江组(Z_1c)	辉绿岩
III-09	寻甸岩墙	云南省寻甸县金源乡施嘎	呈小岩墙产出, NNW, 面积 600 × 70m	二叠纪, 二叠系峨眉山玄武岩($P_2\beta$)	辉绿岩
III-10	马脖子—普岔河岩墙	云南省东川市碧谷乡马脖子、普岔河一带	岩墙, 近 EW, NW	二叠纪, 上二叠统玄武岩组三段($P_2\beta^3$)	辉绿岩
III-11	雪山岩墙	四川省会东县雪山乡	岩墙, NW, SN	二叠纪, 上二叠统(P_1)	辉绿岩
III-12	嘎吉岩墙	四川省会东县嘎吉乡石口子	岩墙, 近 EW, NW, 长 100 ~ 200m, 宽 10 ~ 15m	二叠纪, 上二叠统(P_1)	辉绿玢岩
IV 号岩墙群					
IV-01	新平岩墙	云南省新平县水塘镇	岩墙, 总体呈 NW-SE	二叠纪, 上泥盆统打得群(D_3i)	辉绿岩
IV-02	富民岩墙	云南省富民县大营乡	岩墙, EW, NWW 为主, 面积 0.36 ~ 1.88km ²	二叠纪, 下二叠统茅口组(P_1m)	辉绿岩
IV-03	母子山岩墙	云南省禄劝县城东母子山	岩墙, 近 EW, NE	二叠纪, 下寒武统沧浪铺组(ϵ_1C)	辉绿岩
V 号岩墙群					
V-01	老窝岩墙	云南省保山市瓦马乡老窝村	岩墙, NNW 向, 长 4km, 宽 400m	二叠纪, 上石炭统丁家寨组(C_2d)	辉绿岩, 蚀变辉绿辉长岩
V-02	木瓜寨岩墙	云南省保山市瓦窑乡木瓜寨	岩墙, 岩枝, SN, NNW, 长 500 ~ 4500m, 宽 200 ~ 2500m	二叠纪, 上石炭统丁家寨组(C_2d)	辉绿岩, 辉绿玢岩
V-03	卧牛山岩墙	云南省保山市金鸡乡卧牛山	岩墙, 岩脉, NW, 近 SN	二叠纪, 上石炭统卧牛寺组(C_2w)	辉绿玢岩, 辉绿岩
V-04	芹马岭岩墙	云南省景东县哀牢山西坡大宝山至明子一带	岩墙, 走向两组: 北部 330° ~ 340°, 南部近 350°	二叠纪, 中二叠统(P_2)	辉长辉绿岩
V-05	大街岩墙	云南省景东县大街乡	岩墙, NNW	二叠纪, 二叠系岩层	辉长辉绿岩

续表 1

Continued Table 1

编号	岩墙名称	位置	产状、走向及规模	时代及侵入地层(最新)	岩性
V-06	尼西岩墙	云南迪庆州尼西乡金沙江西岸	岩墙, SN	二叠纪, 上二叠统(P_3)	辉绿岩
V-07	石鼓岩墙(脉)	云南省维西县石鼓一带	岩脉, 呈 NE 向零星出露	二叠纪, 中二叠统(P_2)	辉绿岩, 辉绿玢岩
V-08	剑川岩墙	云南省剑川县三营乡、牛街乡一带	岩墙, NE	二叠纪, 下泥盆统康廊组(D_1k)	辉绿岩
V-09	邓川岩墙	云南省洱源县邓川镇	岩墙, 总体走向 NNW	二叠纪, 二叠系峨眉山玄武岩($P_2\beta$)	辉绿岩, 辉绿辉长岩
V-10	上邑村岩墙	云南省洱源县凤羽镇上邑村	岩墙、岩枝、岩脉, NE、NW, 长 500 ~ 3500m, 宽 300 ~ 700m, 面积 3km^2	二叠纪, 二叠系峨眉山玄武岩($P_2\beta$)	辉绿辉长岩
V-11	挖色岩墙	云南省大理市挖色乡	岩墙、岩脉, 近 EW, NE	二叠纪, 二叠系峨眉山玄武岩($P_2\beta$)	辉绿岩
VI 号岩墙群					
VI-01	多牛场岩墙	四川省稻城县各卡乡多牛场一带	岩墙, 岩脉, 最宽约 100m, 长约数百米, 产状 $243^\circ \angle 64^\circ$	二叠纪, 上二叠统冈达概组(P_2g)	辉绿岩
VI-02	宁蒗岩墙	云南省宁蒗县翠玉乡金沙江东岸	岩墙, NE, NW	二叠纪, 下二叠统(P_1)	辉绿岩
VI-03	太和-龙虎箐-阿冷初岩墙	云南省丽江市太和村、香格里拉县龙虎箐、阿冷初一带	岩墙, NW, NNE, 宽 0.5 ~ 15m, 延长数十米至数百米	二叠纪, 下二叠统栖霞组、茅口组(P_1q-m)	辉绿岩
VI-04	巫木岩墙(脉)	四川省盐源县巫木乡河西岸	岩脉, NW	二叠纪, 二叠系峨眉山玄武岩($P_2\beta$)	辉绿岩

and Ernst, 2008)。然而, 到目前为止, 有关 ELIP 基性岩墙的研究工作基本上集中在不同地区基性岩墙的年代学和地球化学研究方面, 以探讨其与峨眉山溢流玄武岩的成因联系(如 Guo *et al.*, 2004; Shellnutt *et al.*, 2008), 还未见从几何学的角度来探讨整个大火成岩省的空间分布特征的公告。本文主要是在 1:20 万区域地质调查成果的基础上, 通过野外考察, 试图阐明其空间分布特征, 为 ELIP 是否和地幔柱有关提供重要信息。

2 ELIP 基性岩墙群的几何学特征

本文研究的基础地质资料主要来自于云南、贵州和四川的 1:20 万、1:5 万区域地质测量报告、地质图并结合了我们自己的野外观察, 共查阅 1:20 万区域地质测量报告(地质部分)41 份, 1:5 万区域地质调查报告 5 份, 1:20 万区域地质图 47 张(具体见附录)。区域资料以及最近的同位素测年结果表明, 研究区内基性岩墙的时代主要为新元古代、古生代(二叠纪)以及新生代。其中新生代以煌斑岩为主(管

涛等, 2006), 所以本文在绘制岩墙分布图时, 对侵入于二叠纪以后的地层以及前寒武纪地层中的岩墙均不予考虑, 只是考虑侵入于古生代, 尤其是晚古生代地层中的辉绿岩岩墙。

ELIP 内出露的基性(辉绿岩)墙群呈带状分布, 共有 4 条带, 在此分别命名为 I、II、III 和 IV 号带(表 1、图 1)。I 号带位于四川南部, 从康定延伸至会理一带, 长 400km, 宽 30 ~ 80km, 由 13 个辉绿岩墙群组成(表 1)。岩墙走向以 SN、NNW、NE 向为主, 偶见近 EW 向, 总体呈 SN 向。岩墙群侵入地层以泥盆系为主, 还有奥陶系、志留系及二叠系峨眉山玄武岩($P_2\beta$); II 号带位于川滇交界处, 从雷波延伸至会东, 长 175km, 宽 10 ~ 15km, 由 4 个辉绿岩墙群组成(表 1)。岩墙走向为 NNE 向, 侵入于下二叠统栖霞组至茅口组(P_1q-m)和二叠系峨眉山玄武岩($P_2\beta$)中; III 号带位于黔西至滇东, 从毕节、安顺延伸至会东一带, 长 380km, 宽 30 ~ 135km, 由 12 个辉绿岩墙群组成(表 1)。岩墙走向以 NEE、NW 向为主, 总体走向近 EW。侵入地层以二叠系峨眉山玄武岩($P_2\beta$)和下二叠统茅口组(P_1m)为主。IV 号带分布于禄劝至宜良一带, 长 170km, 宽 15 ~ 25km, 由 3 个辉绿岩墙群组成。总体走向 NW 向, 侵入地层为下二叠统茅口组(P_1m)和上泥盆统(D_3)等。

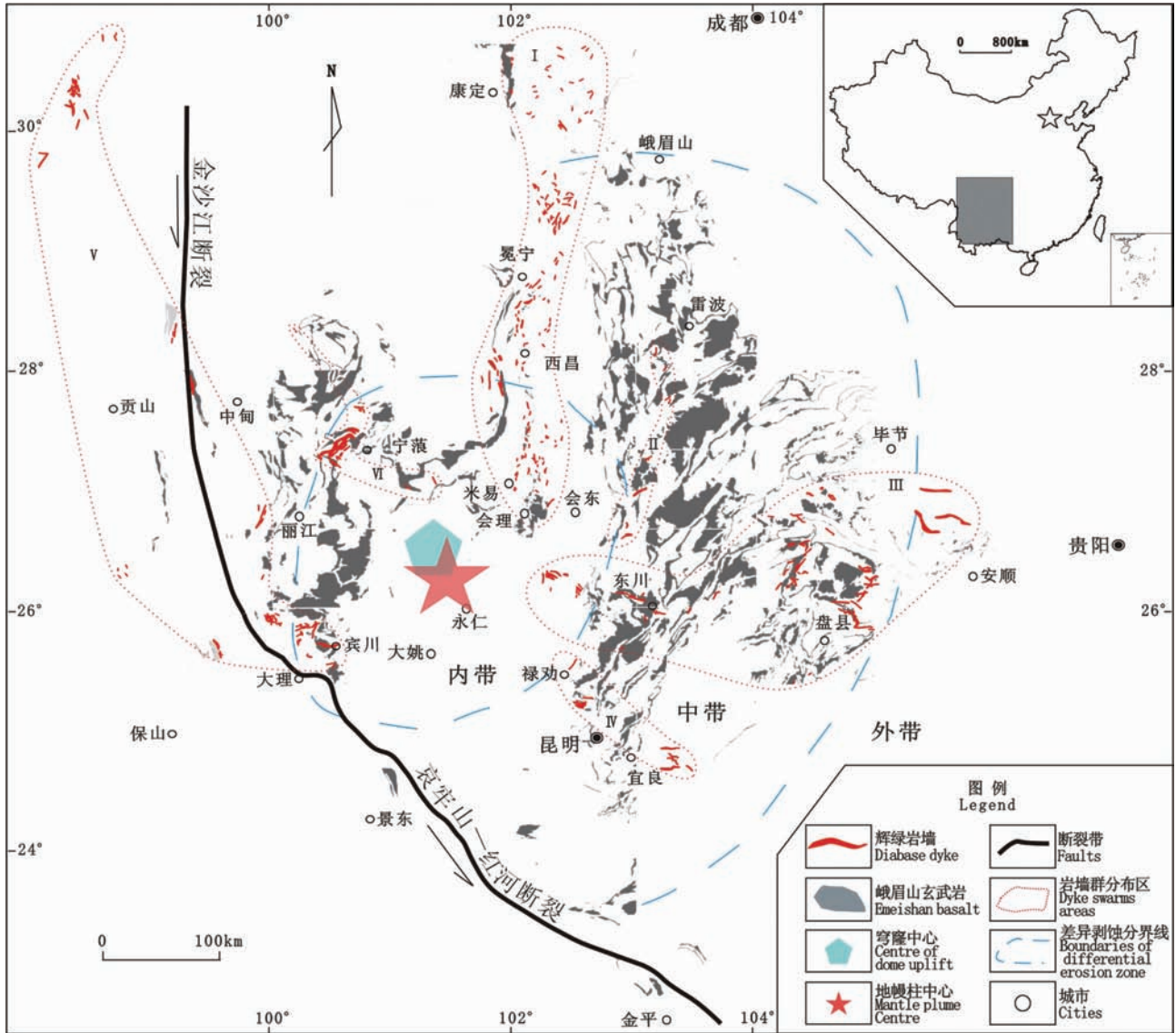


图2 ELIP 辉绿岩墙群分布复原图(据何斌等, 2006)

金沙江-哀牢山-红河断裂带左侧岩墙群沿断裂向 NW 移动 500km 后复原, 岩墙走向以断裂为参考保持不变; ELIP 差异剥蚀据何斌等(2006), 蓝色五边形区域为何斌等(2006)推测的穹状隆升中心; 红色五角星为岩墙群的收敛中心

Fig.2 Recovered distribution of the ELIP diabase dyke swarms (modified after He *et al.*, 2006)

Dyke swarms on the left side of Jinshajiang-Ailaoshan-Honghe fault were relocated 500km towards NW, where the dyke swarm strikes were not changed along the fault. The boundaries of differential erosion were from He *et al.* (2006), and blue pentagon was referred to the centre of dome uplift. The red star was inferred to the centre of dyke swarms convergence

其他岩墙群零散分布于金沙江-哀牢山-红河断裂带两侧。由于该断裂带为一条大型走滑断裂带, 古近纪以来最大走滑断距为 500km (Tapponnier *et al.*, 1990), 据此将断裂带左侧岩墙群位置复原。复原后, 岩墙群呈 2 个带状分布, 分别命名为 V 号和 VI 号带(表 1, 图 2)。V 号带自川西经贡山、中甸延伸至宾川一带, 长度 560km, 宽度 30 ~ 140km, 由 11 个辉绿岩墙群组成(表 1)。岩墙总体走向 NNW-NW 向, 侵入地层主要为二叠系峨眉山玄武岩($P_2\beta$)、中二叠统(P_2)和上石炭统(C_2)。VI 号带沿宁蒗-米易一线展布, 长

180km, 宽 5 ~ 35km, 由 3 个辉绿岩墙群组成(表 1)。总体走向 NW 向, 侵入地层主要为二叠系峨眉山玄武岩($P_2\beta$)和下二叠统栖霞组至茅口组(P_1q-m)。

虽然不同地区岩墙的规模大小不一, 单个岩墙的产出也有所不同, 如云南省大理市挖色乡(图 3a)、宣威市龙场镇李家冲、禄劝县母子山(图 3b)和保山市瓦窑乡木瓜寨辉绿岩墙(图 3c), 但是均具有典型的辉绿结构(图 3d)。由于受后期蚀变作用的影响, 大多数岩石中的辉石均已发生蚀变。尽管如此, 其辉绿结构依然清晰可辨。



图3 ELIP 辉绿岩墙及显微照片

(a)-大理市挖色乡辉绿岩墙(黄色线内),长8km,宽18m,产状 $260^{\circ} \angle 80^{\circ}$,侵入到下泥盆统康廊组(D_1k)白云质灰岩中,镜向西;(b)-保山市瓦窑乡木瓜寨辉绿岩墙(黄色线内),宽3m,产状 $160^{\circ} \angle 18^{\circ}$,侵入到上泥盆统(D_2)泥质条带灰岩中,镜向南;(c)-禄劝县母子山辉绿岩墙,长8km,宽250m,产状 $150^{\circ} \angle 78^{\circ}$,侵入到下寒武统沧浪铺组(\in_1c)粉砂岩中,镜向北;(d)-母子山辉绿岩为辉绿结构,主要矿物斜长石(Pl)和单斜辉石(Cpx),次要矿物橄榄石(Ol)和磁铁矿(Mt),正交偏光

Fig.3 Field photos and microphoto of ELIP diabase dykes

(a)-diabase dyke in Wase Town, Dali city with 8km long, 18m wide at the occurrence of $260^{\circ} \angle 80^{\circ}$, intruded dolomite limestone of lower Devonian Kanglang Formation (D_1k), viewing towards west; (b)-diabase dyke in the Muguazhai, Wayao Town, Baoshan city with 3m wide at the occurrence of $160^{\circ} \angle 18^{\circ}$, intruded argillaceous banding limestone of upper Devonian (D_2), viewing towards south; (c)-diabase dyke in the Muzishan, Luquan County, with 8km long and 250m wide at the occurrence of $150^{\circ} \angle 78^{\circ}$, intruded siltstone of lower Cambrian Canglangpu Formation (\in_1c), viewing towards north; (d)-Muzishan diabase displaying typical diabaseic texture (cross polarized light). Abbreviations: Pl-plagioclase; Cpx-clinopyroxene; Ol-olivine; Mt-magnetite

3 讨论

尽管本次工作没有对基性岩墙进行相关的同位素测年,但是根据其侵入的地层时代以及区域岩浆活动特征还是可以初步确定其时代为二叠纪,而且前人在川南盐源、新街和白马地区以及贵州罗甸地区获取的辉绿岩岩墙同位素测年结果分别为 $262 \pm 3\text{Ma}$, $260 \pm 3\text{Ma}$, $242 \pm 2\text{Ma}$ 和 $255 \pm 0.62\text{Ma}$ (Guo *et al.*, 2004; Zhou *et al.*, 2006; Shellnutt *et al.*, 2008;

韩伟等, 2009),说明其形成时代和峨眉山玄武岩的形成时代相近。另外,峨眉山玄武岩根据 TiO_2 的含量可分为低钛型和高钛型,且在空间分布上有一定规律性,即 ELIP 西区以低钛型为主而东区为高钛型 (Xiao *et al.*, 2004)。前人对岩墙的地球化学研究 (Guo *et al.*, 2004; 韩伟等, 2009) 以及作者未发表的数据表明,岩墙的地球化学性质和其空间共生的玄武岩是一致的,比如采集于 ELIP 东部宣威和禄劝地区的辉绿岩具有高钛玄武岩的性质,其 TiO_2 的含量为 $4.12\% \sim 4.45\%$,而采集于西部永平和大理地区的辉绿岩具有低钛玄武岩的性质,其 TiO_2 的含量为 $0.58\% \sim 1.77\%$,这恰恰和其

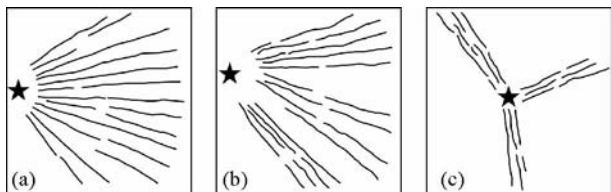


图4 巨型放射状岩墙群的几何学特征(据 Ernst and Buchan, 2001)

(a)-连续扇状;(b)-分开的扇状;(c)-中心发散状

Fig. 4 Characteristic geometries of giant radiating dyke swarms (modified after Ernst and Buchan, 2001)

(a)-continuous fanning pattern; (b)-fanning pattern subdivided into separate subswarms; (c)-subswarms of subparallel dykes that radiate from a common point

共生的玄武岩的性质一致,说明这些岩墙代表了岩浆上升的通道,和峨眉山玄武岩有着密切的成因联系,是 ELIP 的重要组成部分。因此,其分布的几何形态反映了 ELIP 的深部地球动力学过程。

Ernst and Buchan(2001)系统研究了巨型岩墙群的几何特征,对其在空间展布总结出三种模式(图4),并认为其形成均与地幔柱有关。地幔柱对岩石圈的顶托作用使之发生穹状隆升,在此过程中刚性岩石圈产生放射状裂隙,岩浆的灌入产生了 a 型和 b 型岩墙群。而 c 型岩墙群被认为是与地幔柱成因的三叉裂谷有关。ELIP 的 6 个岩墙群明显地呈放射状分布,由三条巨型岩墙群组成,其间有三条较为小型的岩墙群,辐射角度近 200° ,间隔幅度近 40° 。其中 I 号和 III 号岩墙群分别对应着攀西裂谷带和六盘水裂谷带,因此 ELIP 辉绿岩墙群应属于第三种模式,即中心发散状。当然由于 ELIP 不同地区剥蚀程度不同,导致了岩墙群分布密度的差异,表现为岩墙群分布密度呈现出中东部较多而西部较少的特点。这一特点可能也反映在峨眉山玄武岩的厚度上,表现为西厚(最厚达 5000m, Zhang *et al.*, 2006a)东薄(只有几十米,何斌等, 2006)。虽然剥蚀前岩墙群的实际分布形式可能会有所不同,但其总体呈放射状以及具有收敛中心的形态还是清楚的。总体上,其收敛位置位于云南永仁一带(图 2)。

何斌等(2006)对峨眉山玄武岩下伏的茅口组(P_1m)差异剥蚀进行分析后认为峨眉山地区存在明显的地层剥蚀,并划分出差异剥蚀区带,其中内带为峨眉山玄武岩喷发前抬升形成的穹状隆起的中心位置(图 2)。但也有学者基于广泛出露的铁镁质火山碎屑沉积岩和枕状熔岩的野外观察认为在 ELIP 岩浆事件早期爆发式喷发和非爆发式喷发并存,其分布范围并不能确定穹状隆升的分布区域(Peate and Bryan, 2008)。有意思的是,本次研究结果表明,岩墙群的收敛中心却与穹状隆起的位置惊人地吻合(图 2)。这种相似性可能暗示了云南永仁地区(岩墙的收敛中心)可能是峨眉山地幔柱的中心位置。Peate and Bryan(2008, 2009)认为大桥地区

的火山碎屑岩和宾川的枕状熔岩代表了海相喷发,从而否认该地区在喷发前发生过大规模的地壳隆升($>1\text{km}$)。然而,根据 Griffins and Campbell(1990)的地幔柱模型,开始隆起的时间是隆起幅度达到最大值前的 25Ma,距离玄武岩主喷发期 2~30Ma,而当隆起停止后紧接着是下沉,其原因是:1)由于地幔柱头部变薄发生侧向流动,那么就失去了浮力,导致地幔柱轴部下沉;2)地幔柱头部岩浆的运移导致其上覆的岩石圈下沉;3)热的散失。这就意味着在峨眉山玄武岩开始喷发时可能已经下沉。值得注意的是,尽管在宾川剖面的大营街乡上苍村和泸沽湖均可见枕状熔岩,但是在上苍村附近仍然可见峨眉山玄武岩以平行不整合的形式覆盖在茅口组灰岩之上,说明峨眉山玄武岩喷发前曾发生过地壳的抬升,尽管仅根据这一现象我们尚无法估算其隆升幅度,然而上述现象总体上与 Griffins and Campbell(1990)的地幔柱模型并不矛盾,是吻合的,即先抬升(导致峨眉山玄武岩不整合覆盖于灰岩之上)后下降(海相喷发)。

此外,地幔柱头部的中心位置通常也是岩浆产量最大的地方,而在远离地幔柱头部中心的位置,所产生的岩浆的体积和火山岩的厚度要小得多(Griffiths and Campbell, 1990),这一点也与 ELIP 的实际地质现象吻合,如位于地幔柱头部中心位置附近的宾川一带,火山岩的厚度达到近 5km,而在东部的贵州平定一带只有 100 余米,在贵州东部的熊家场甚至只有几十米。

通常认为,与地幔柱有关的岩墙群规模较大(Ernst and Buchan, 2001),而 ELIP 中的单个岩墙规模均较少,这可能主要与剥蚀程度相对较低有关(尚保留有较多的溢流玄武岩)。

4 结论

ELIP 基性岩(辉绿岩)墙群几何学特征表现为中心放射状,由 6 条巨型岩墙群组成,辐射角度近 200° 。其中心收敛于云南永仁一带,与前人从沉积角度得出的中心位置吻合。因此,该地区很可能为二叠纪峨眉山地幔柱头部的中心位置。岩墙群分布呈中东部较多而西部少的特点,可能与峨眉山玄武岩的厚度及剥蚀程度有关。

致谢 野外工作得到了云南省地质科学研究所张子雄高工和中国地质大学(北京)刘磊博士的大力帮助,两位审稿人提出的宝贵意见和建议,在此一并表示衷心感谢。

References

- Baragar WR, Ernst RE, Hulbert L and Peterson T. 1996. Longitudinal petrochemical variation in the Mackenzie dyke swarm, Northwestern Canadian Shield. *Journal of Petrology*, 37: 317–359
- Bryan SE and Ernst RE. 2008. Revised definition of large igneous provinces (LIPs). *Earth-Science Reviews*, 86: 175–202
- Campbell IH. 2001. Identification of ancient mantle plumes. In: Ernst

- RE and Buchan KL (eds.). *Mantle Plumes: Their Identification through Time*. Boulder, Colorado: Geological Society of America Special Paper, 352: 5–21
- Chung SL and Jahn BM. 1995. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary. *Geology*, 23: 889–892
- Ernst RE, Buchan KL, West TD and Palmer HC. 1995a. Giant dyke swarms: Characteristics, distribution and geotectonic applications. In: Baer G and Heimann A (eds.). *Physics and Chemistry of Dykes*. Rotterdam: Balkema, 3–21
- Ernst RE, Head JW, Parfitt E, Grosfils E and Wilson L. 1995b. Giant radiating dyke swarms on Earth and Venus. *Earth-Science Reviews*, 39: 1–58
- Ernst RE and Buchan KL. 1997. Giant radiating dyke swarms: Their use in identifying pre-Mesozoic large igneous provinces and mantle plumes. In: Mahoney JJ and Coffin MF (eds.). *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*. Washington, DC: American Geophysical Union, 297–333
- Ernst RE and Buchan KL. 2001. The use of mafic dike swarms in identifying and locating mantle plumes. In: Ernst RE and Buchan KL (eds.). *Mantle Plumes: Their Identification through Time*. Boulder, Colorado: Geological Society of America Special Paper, 352: 247–265
- Griffiths RW and Campbell IH. 1990. Stirring and structure in mantle plumes. *Earth and Planetary Science Letters*, 99: 66–78
- Guan T, Huang ZL, Xu C, Zhang ZL, Yan ZF and Chen M. 2006. ^{40}Ar - ^{39}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 WM and Wang YJ. 2004. When did the Emeishan plume activity start? Geochronological evidence from ultramafic-mafic dikes in Southwestern China. *International Geology Review*, 46: 226–234
- Han W, Luo JH, Fan JL, Cao YZ and Zhang JZ. 2009. Late Permian diabase in Luodian, southeastern Guizhou and its tectonic significances. *Geological Review*, 55(6): 795–803 (in Chinese with English abstract)
- He B, Xu YG, Xiao L, Chung SL, Xiao L and Wang YM. 2003. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer-scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 213(3–4): 391–405
- He B, Xu YG, Xiao L, Wang YM, Wang KM and Sha SL. 2006. Sedimentary responses to uplift of Emeishan mantle plume and its implications. *Geological Review*, 52(1): 30–37 (in Chinese with English abstract)
- Peate IU and Scott EB. 2008. Re-evaluating plume-induced uplift in the Emeishan large igneous province. *Nature Geoscience*, 1(9): 625–629
- Peate IU and Scott EB. 2009. Pre-eruptive uplift in the Emeishan? reply. *Nature Geoscience*, 2(8): 531–532
- Shellnutt JG, Zhou MF, Yan DP and Wang YB. 2008. Longevity of the Permian Emeishan mantle plume (SW China): 1Ma, 8Ma or 18Ma? *Geological Magazine*, 145(3): 373–388
- Song XY, Hou ZQ, Wang YL, Zhang CJ and Cao ZM. 2002. The mantle plume features of Emeishan basalts. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 22(4): 27–32 (in Chinese with English abstract)
- Tapponnier P, Lacassin R, Leloup PH, Schärer U, Zhong DL, Wu HW, Liu XH, Ji SC, Zhang LS and Zhong JY. 1990. The Ailao Shan / Red River metamorphic belt: Tertiary left-lateral shear between Indochina and south China. *Nature*, 343(2): 431–437
- Xiao L, Xu YG, Mei HJ, Zheng YF, He B and Pirajno F. 2004. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous provinces, SW China: Implications of plume-lithosphere interaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 228: 525–546
- Xu YG and Chung SL. 2001. The Emeishan large igneous province: Evidence for mantle plume activity and melting conditions. *Geochimica*, 30(1): 1–9 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG, He B, Chung SL, Menzies MA and Frey FA. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province. *Geology*, 32: 917–920
- Zhang ZC and Wang FS. 2002. Permian picrite has been found in Emeishan large igneous province. *Geological Review*, (4): 448 (in Chinese)
- Zhang ZC, Mahoney JJ, Mao JW and Wang FS. 2006a. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China. *Journal of Petrology*, 47: 1997–2019
- Zhang ZC, Mao JW, Wang FS and Pirajno F. 2006b. Native gold and native copper grains enclosed by olivine phenocrysts in a picrite lava of the Emeishan large igneous province. *American Mineralogist*, 91(7): 1178–1183
- Zhou MF, Zhao JH, Qi L, Su W and Hu RZ. 2006. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing area, SW China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151: 1–19

附中文参考文献

- 管涛, 黄智龙, 许成, 张振亮, 严再飞, 陈觅. 2006. 云南白马寨镍矿区煌斑岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 定年和地球化学特征. *岩石学报*, 22(4): 873–883
- 韩伟, 罗金海, 樊俊雷, 曹远志, 张静艺. 2009. 贵州罗甸晚二叠世辉绿岩及其区域构造意义. *地质论评*, 55(6): 795–803
- 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
- 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
- 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. *地球化学*, 30(1): 1–9
- 张招崇, 王福生. 2002. 峨眉山大火成岩省中发现二叠纪苦橄质熔岩. *地质论评*, (4): 448

附录: 区调资料目录

四川部分

- 胡炎基等. 1965. 1/20 万西昌幅 G-48-01 区域地质测量报告(地质部分)及地质图
- 梁信之等. 1984. 1/20 万康定幅 H-47-18 禾尼幅 H-47-17 新龙幅 H-47-11 区域地质测量报告(地质部分)及 1/20 康定幅地质图
- 四川省地质局第 1 区测队. 1967. 1/20 冕宁幅 H-48-31 区域地质测量报告(地质部分)及地质图
- 四川省地质局第 1 区测队. 1971. 1/20 万盐源幅 G-47-06 区域地质测量报告(地质部分)及地质图
- 四川省地质局第 1 区测队. 1972. 1/20 万雷波幅 H-48-32 区域地质测量图
- 四川省地质局第 1 区测队. 1972. 1/20 万盐边幅 G-47-12 区域地质测量报告(地质部分)及地质图
- 四川省地质局第 1 区测队. 1974. 1/20 万石棉幅 H-48-25 区域地质测量报告(地质部分)及地质图
- 四川省地质局第 1 区测队. 1975. 1/20 万泸宁幅 H-47-36 区域地质测量图
- 王康明. 1995. 1/5 万红莫幅 H-48-133-D 地质图说明书
- 王康明等. 1995. 1/5 万礼州幅 H-48-133-C 区域地质图说明书
- 王茂良. 1966. 1/20 万米易幅 G-48-07 区域地质测量报告(地质

部分)及地质图

吴世良等. 1976. 1/20 万宝兴幅 H-48-13 区域地质测量报告(地质部分)及地质图

严高峰. 1984. 1/5 万会东幅 G-48-50-A 区域地质测量报告(地质部分)及地质图

云南省地矿局. 1978. 1/20 万鲁甸幅 G-48-08 区域地质测量图(跨省界)

云南省地质局区调队. 1978. 1/20 万大关幅 G-48-02 区域地质测量图(跨省界)

张盛师. 1974. 1/20 万荣经幅 H-48-19 区域地质测量报告(地质部分)及地质图

郑裕民等. 1984. 1/20 万理塘幅 H-47-23 稻城幅 H-47-29 贡岭幅 H-47-35 区域地质调查报告(地质部分)及地质图

云南部分

陈天培等. 1982. 1/20 万腾冲幅 G-47-27 盈江幅 G-47-26 区域地质测量报告(地质部分)

段彦学等. 1977. 1/20 万丽江幅 G-47-11 区域地质调查报告(地质部分)及地质图

贵州省地质局 108 队. 1973. 1/20 万盘县幅 G-48-21 区域地质测量图(云南分幅)

林尧明等. 1983. 1/20 万思茅幅 F-47-11 区域地质测量报告(地质部分)

吕顺泰等. 1985. 1/5 万腾冲幅 G-47-101-D 朗蒲寨幅 G-47-113-B 区域地质测量报告(地质部分)

彭国海等. 1975. 1/20 万巍山幅 G-47-29 区域地质测量报告(地质部分)

彭兴阶等. 1977. 1/20 万景东幅 G-47-35 区域地质测量报告(地质部分)及地质图

秦德厚等. 1980. 1/20 万保山幅 G-47-28 区调地质测量报告(地质部分)及地质图

秦德厚等. 1981. 1/20 万庆凤幅 G-47-34 区域地质测量报告(地质部分)

史清琴等. 1976. 1/20 万镇雄幅 G-48-03 地质图说明书及地质图

覃胜荣等. 1978. 1/20 万曲靖幅 G-48-20 区域地质测量报告(地质部分)及地质图

吴树华. 1974. 1/20 万兰坪幅 G-47-16 区域地质测量报告(地质

部分)及地质图

吴树华等. 1979. 1/20 万永平幅 G-47-22 区域地质测量报告(地质部分)及地质图

熊家镛等. 1980. 1/20 万东川幅 G-48-14 区域地质测量报告(地质部分)及地质图

薛代福等. 1980. 1/20 万永宁幅 G-47-05 区域地质测量报告(地质部分)及地质图

薛代福等. 1984. 1/20 万维西幅 G-47-10 区域地质测量报告(地质部分)及地质图

云南省地矿局区调队. 1985. 1/20 万中甸幅 G-47-04 区域地质测量图

云南省地质局. 1973. 1/20 万大理幅 G-47-23 区域地质测量图

云南省地质局第 2 区调队. 1969. 1/20 万武定幅 G-48-19 地质图说明书及地质图

云南省地质局第 2 区调队. 1970. 1/20 万新平幅 G-47-36 区域地质测量报告(地质部分)及地质图

云南省地质局第 2 区调队. 1971. 1/20 万昆明幅 G-48-25 地质图说明书及地质图

云南省地质局第 2 区调队. 1973. 1/20 万宜良幅 G-48-26 区域地质测量报告(地质部分)及地质图

张远志. 1984. 1/20 万南伞幅 F-47-03 耿马幅 F-47-04 区域地质调查报告(地质部分)

朱佑夹等. 1977. 1/20 万罗平幅 G-48-27 区域地质测量报告(地质部分)

贵州部分

贵州省 108 地质队. 1973. 1/20 万水城幅 G-48-15 区域地质测量报告(地质部分)及地质图

贵州省 108 地质队. 1976. 1/20 万毕节幅 G-48-10 区域地质测量报告(地质部分)及地质图

贵州省 108 地质队. 1972. 1/20 万盘县幅 G-48-21 区域地质测量图(贵州分幅)

贵州省 108 地质队. 1972. 1/20 万威宁幅 G-48-09 区域地质测量图

郑启铃等. 1980. 1/20 万兴仁幅 G-48-22 安龙幅 G-48-28 区域地质测量报告(地质部分)