

# 峨眉山地幔柱轴部位置的讨论

李宏博<sup>1,2)</sup>, 张招崇<sup>1)</sup>, 李永生<sup>1)</sup>, 汪云峰<sup>1)</sup>

1) 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 中国地质大学(北京), 北京, 100083;

2) 中国地质博物馆, 北京, 100034

**内容提要:** 本文对峨眉山地幔柱的轴部位置进行了探讨, 认为其应在米易—永仁一带。利用经典地幔柱模型, 估算出峨眉山地幔柱到达上地幔时轴部直径大约为 65 ~ 105 km, 高温苦橄岩的分布和差异剥蚀程度显示中心区的范围约为 260 ~ 300 km。深大断裂带、古地貌等因素控制了溢流玄武岩的喷发和展布, 使得轴部岩浆的喷发偏于西部, 形成了大理—丽江一带的苦橄岩分布较多的现象。

**关键词:** 峨眉山大火成岩省; 地幔柱; 轴部位置; 苦橄岩; 深大断裂带; 古地貌

大火成岩省 (large igneous province, LIP) 以短时限内 (约 1 Ma) 的巨量喷发 (约  $10^6 \text{ km}^3$ ) 为特征。对于 LIP 的成因, 传统的板块理论和对地球深部过程的理解不能很好地给予解释, 而地幔柱 (mantle plume) 可较好地解释 LIP 的一些现象 (Coffin et al., 1994; Farnetani et al., 1994, 1997; Sheth, 1999; Olsen, 1999; Courtillot et al., 1999; DePaolo et al., 2003; Cordery et al., 1997)。峨眉山大火成岩省 (Emeishan large igneous province, ELIP) 是全球大火成岩省的重要组成, 也是我国唯一得到国际地学界认可的以溢流玄武岩为主体的大火成岩省。自 Chung Sunlin 等 (1995) 提出 ELIP 的地幔柱模型以来, 得到了许多学者的支持, 并提出了一些关键性证据 (徐义刚等, 2001; 张招崇等, 2002, 2004, 2006; 宋谢炎等, 2002; 何斌等, 2003, 2005, 2006; Xiao Long et al., 2004; Guo Feng et al., 2004; Fan Weiming et al., 2004; Zhang Zhaochong et al., 2006; Zhou Meifu et al., 2007; 李宏博等, 2010)。但是, ELIP 的地幔柱模型还存在一些不完善之处, 也遭到了一些质疑 (Peate et al., 2008)。

根据 Campbell 等 (1990) 提出的经典地幔柱模型, 地幔柱由巨大的头部和细长的尾部 (轴部) 构成的。轴部是地幔柱深部源区 (有可能是核幔边界) 物质上升的通道, 所产生的熔融物具有高温、高镁等特征 (Griffiths et al., 1991b)。接近原始岩浆成分的

苦橄岩被认为形成于高温条件下的地幔柱轴部, 因此常被作为地幔柱存在的岩石学证据 (张招崇等, 2006)。因此, 峨眉山地幔柱的轴部及其所携带的熔融物质包含着解读峨眉山大火成岩省成因的重要信息, 对于地球动力学机制的研究也具有重要意义。那么, 峨眉山地幔柱的轴部位置是否存在? 到底在何处? 这是关系到 ELIP 地幔柱模型是否成立的一个核心问题。本文通过对深大断裂带、古地貌以及峨眉山玄武岩溢流和分布情况的研究, 对以上问题展开了深入的探讨, 以期揭示峨眉山地幔柱轴部的真正位置所在。

## 1 深大断裂带、古地貌对峨眉山玄武岩喷发的影响

### 1.1 深大断裂带对峨眉山玄武岩喷发的影响

断裂带, 尤其是一些深大断裂带是峨眉山玄武岩熔浆的上升通道。在整个 ELIP 范围内, 金河—程海断裂、安宁河断裂、小江断裂等岩石圈深大断裂形成了一系列的喷发中心 (图 1a)。这些断裂带的产状、分布以及与地幔柱中心距离的远近, 对峨眉山玄武岩的喷发、分布以及地球化学特征都有显著的控制作用 (宋谢炎等, 2001)。

ELIP 中心地区的断裂带主要是安宁河断裂带、磨盘山—绿汁江断裂带、金河—程海断裂带和小金河—丽江断裂带。这些断裂带均为深大断裂带, 是

注: 本文为国家自然科学基金资助项目 (编号 40925006)、科技部 973 项目 (编号 2009CB421002)、教育部博士点基金 (编号 20090022110006)、教育部 111 计划 (编号 B07011)、地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题基金项目 (编号 GPMR2011) 的成果。

收稿日期: 2012-03-23; 改回日期: 2013-01-16; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 李宏博, 男, 1978 年生。博士, 副研究员。岩石学专业。Email: li\_h\_b@sina.com.cn。

峨眉山玄武岩喷发的主要通道(图 1a)。断裂带的走向、倾向等构造因素对峨眉山玄武岩的分布有着重要影响(表 1)。以金河—程海断裂带为例,断裂带以西的峨眉山玄武岩第一喷发旋回主要分布于上餐、大迪里、七棵梁子一带,这个带紧靠程海断裂带西侧,并与该断裂方向大体一致。值得注意的是,峨眉山玄武岩的厚度以断裂带为中心向西由近及远逐渐减薄(秦德先等,1999,图 1b)。这表明了断裂带对峨眉山玄武岩的分布有控制作用。小金河—丽江断裂不仅是峨眉山玄武岩喷发中心,喷发后形成的玄武岩组合——黑泥哨组中的角砾状玄武岩也沿断裂呈 NE 向展布,甚至有的呈带状直接分布于断裂带上(国家地震局地质研究所,1990)。这些事实说明,中心区玄武岩的分布受到断裂带产状的控制作用十分明显。

因此,ELIP 中心区的深大断裂带对峨眉山玄武岩喷发,尤其是早期的岩浆作用有重要影响。其中,位于偏西部的金河—程海断裂带和小金河—丽江断裂带构成了峨眉山玄武岩的喷发中心(图 1a),由于

其产状和展布的控制作用,使得玄武岩质岩浆和地幔柱轴部高温熔融产生的苦橄岩质岩浆向西部丽江—大理一带喷溢,产生了巨厚的熔岩层。同时,形成于早期的苦橄岩也大多数出现在这一区域(图 3a)。

### 1.2 古地貌对峨眉山玄武岩喷发的影响

Jay 等(2009)对印度德干大火成岩省(Deccan LIP)的研究表明,位于东印度的 Rajahmundry 暗色岩很可能是 Deccan LIP 的一个重要组成部分,它是 Proto-Reunion 地幔柱产生的玄武岩质岩浆经长距离溢流而形成的,其通道是位于 Deccan LIP 东南的一条 EW 向沉降带(depression)或冰川沟(moat)。这说明古地貌对于溢流玄武岩的形成及分布有重要影响。ELIP 也不例外,区域地质资料显示,茅口组顶部的剥蚀程度及地形起伏的形态对峨眉山玄武岩岩浆的流向有明显的控制作用,从而对峨眉山玄武岩的厚度产生影响。如四川峨眉山地区,区内玄武岩大体为东厚西薄的分布格局,这与茅口组顶部的古侵蚀地形有直接的关系<sup>①</sup>。图 1a 也较好地体现

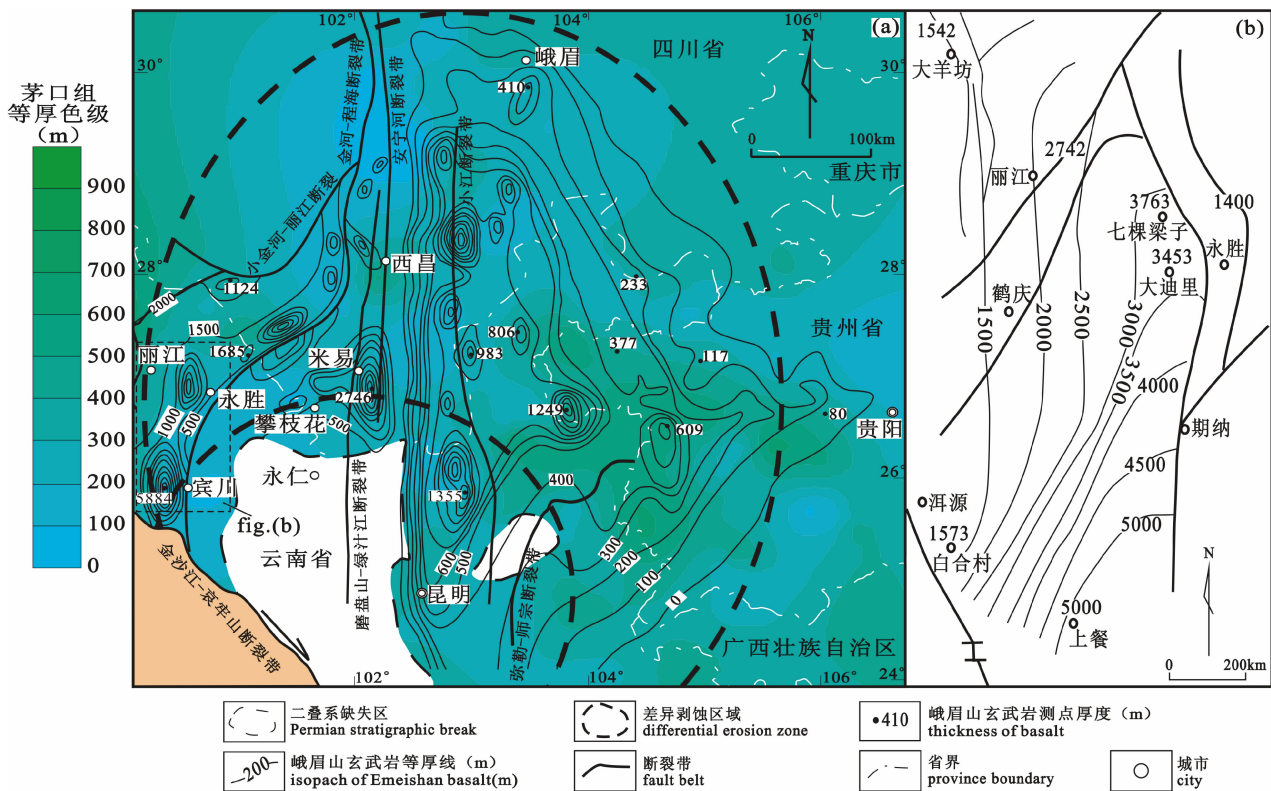


图 1 (a)峨眉山玄武岩及茅口组灰岩等厚图(据张云湘等,1988;李宏博等,2011); (b)程海断裂带玄武岩等值线图(据秦德先等,1999)

Fig. 1 (a) Isopach map of the Emeishan basalts and limestone of the Maokou Formation (after Zhang Yunxiang et al., 1988; Li Hongbo et al., 2011); (b) Isoleth of basalt along the Chenghai fault (after Qin Dexian et al., 1999)

表 1 ELIP 中心区主要深大断裂带及对峨眉山玄武岩的影响

Table 1 The relationship between deep-seated faults and Emeishan basalts in the central zone of ELIP

序号	断裂带	位置	产状	与 ELIP 的关系	资料来源
1	安宁河断裂带	安宁河断裂带位于康滇地轴的轴部	走向近 SN, 断裂以倾东为主, 局部倾西, 倾角 40° ~ 60°	峨眉山玄武岩喷发中心, 此外还有大量的基性—超基性侵入岩体发育	刘家铎等, 2007; 程建武等, 2010; 刘肇昌等, 1996
2	磨盘山—绿汁江断裂带	康滇地轴的主干断裂之一, 北起西昌磨盘山, 向南与云南绿汁江断裂带相接	走向近 SN, 倾向约 270°, 倾角 65° ~ 78°	沿断裂带有华力西期基性、超基性岩浆活动, 且规模巨大, 是攀枝花—西昌地区峨眉山玄武岩的主要喷发通道	四川地质矿产局, 1991; 宋谢炎等, 2002
3	金河—程海断裂带	位于康滇古陆西缘, 南端与红河断裂带, 北端与箐河—金河断裂带及鹤庆—小金河断裂带相交接	走向 SN—NNE, 倾向 NNW, 近直立	峨眉山玄武岩上升的主要通道, 并对峨眉山玄武岩的分布有明显的控制作用, 其中断裂带南段是岩浆活动最强的中心, 形成了厚达 5000 多米的玄武岩层	秦德先等, 1999; 国家地震局地质研究所, 1990
4	小金河—丽江断裂带	自小金河向西南经玉龙雪山东侧, 过丽江止于洱源、剑川一带, 形成于加里东期	走向 NE35° ~ 40°, 倾向 SE	古生代晚期, 断裂带呈拉张状态, 并沿断裂有广泛的玄武岩喷发	国家地震局地质研究所, 1990

了峨眉山玄武岩厚度分布与茅口组古地形之间的耦合关系, 玄武岩厚度较大的地区往往是古地貌相对凹陷的区域。

在 ELIP 地区, 峨眉山玄武岩喷发之前的古地理环境为浅水碳酸盐岩台地, 即滇黔桂碳酸盐岩台地。连续沉积了栖霞组 ( $P_2q$ ) 和茅口组 ( $P_2m$ ) 以生屑灰岩为主的地层。从宏观上看, 此时的古地貌呈现出自西向东 4 个厚度区相间排列的格局 (图 1a), 即木里—丽江—大理相对凹陷区、西昌—楚雄—文山相对隆起区、古蔺—昭通—盘县相对凹陷区和贵阳—百色相对隆起区。其中位于 ELIP 中央地带的西昌—楚雄—文山相对隆起区是 ELIP 中心区所在位置, 它基本继承了栖霞期的木里—永仁—丘北相对隆起区, 但隆起范围明显有所扩大, 扩展到西昌、文山一线 (冯增昭等, 1994)。这可能与峨眉山地幔柱引发的地表隆升有关 (李宏博等, 2011)。中心区西侧则为木里—丽江—大理相对凹陷区。

前文已述及, 深大断裂带的控制作用使得峨眉山玄武岩偏于西部喷发。大理—宾川—丽江—盐源一带的玄武岩厚度分布与古地貌特征十分吻合 (图 1a), 这说明中心区东部高西部低的古地貌特征使得玄武岩向西部溢流和集中, 这就不难解释, 在宾川一带形成了厚度达 5000 余米的玄武岩层。根据 Campbell 等 (1990) 经典地幔柱理论模型, 地幔柱引起的隆升达到峰值后紧接着下沉。一些经抬升遭受了强烈剥蚀作用的地层有可能重新没入海水中, 就造成了宾川一带海相喷发的情况, 从而形成了枕状

玄武岩的堆积。

## 2 峨眉山地幔柱轴部位置的约束

### 2.1 峨眉山地幔柱轴部及中心区的厘定

经典的地幔柱理论认为, 地幔柱起源于深部地幔, 甚至核幔边界 ( $D''$ ), 由蘑菇状的头部和较为细长的尾部组成。上升中的地幔柱其轴部为一个较为细长的通道, 来自深部的高温、低密度物质经此不断上涌, 而不与周边较冷的、密度大的物质发生混合。地幔柱轴部到达地幔顶部发生熔融, 其影响范围会扩大, 即地幔柱中心区 (图 2a)。高温苦橄岩代表了地幔柱轴部熔融的产物, 往往形成于地幔柱引发的岩浆作用的早期 (Griffiths et al., 1991b)。

Griffiths 等 (1991b) 推导出的地幔柱轴部直径的计算公式为:

$$d = (\rho c \pi a g \cos \Phi / 128 Q_H)^{-1/4} \nu^{1/4} \Delta t^{-1/2}$$

式中:  $d$  是地幔柱轴部直径,  $\rho$  是地幔柱密度,  $c$  是源区异常热能,  $a$  是地幔的热膨胀系数,  $g$  是重力加速度,  $\Phi$  是地幔柱倾斜角,  $Q_H$  是浮力通量,  $\nu$  是地幔柱的粘度,  $\Delta t$  是温度异常。

地幔柱的轴部直径  $d$  是倾斜角  $\Phi$ 、浮力通量  $Q_H$  和温度异常  $\Delta t$  的函数, 当倾斜角  $\Phi = 0$  时, 可采用图 2b 来进行估算。峨眉山地幔柱的浮力流量  $Q_H$  (buoyancy flux) 为  $3 \times 10^3 \sim 4 \times 10^4$  N/s, 热异常  $\Delta t$  (excess temperature) 为 350°C (张招崇等, 2007), 由此估算出幔柱到达上地幔时轴部的直径大约为 65 ~ 105 km (图 2b)。结合 ELIP 高温苦橄岩和差异剥

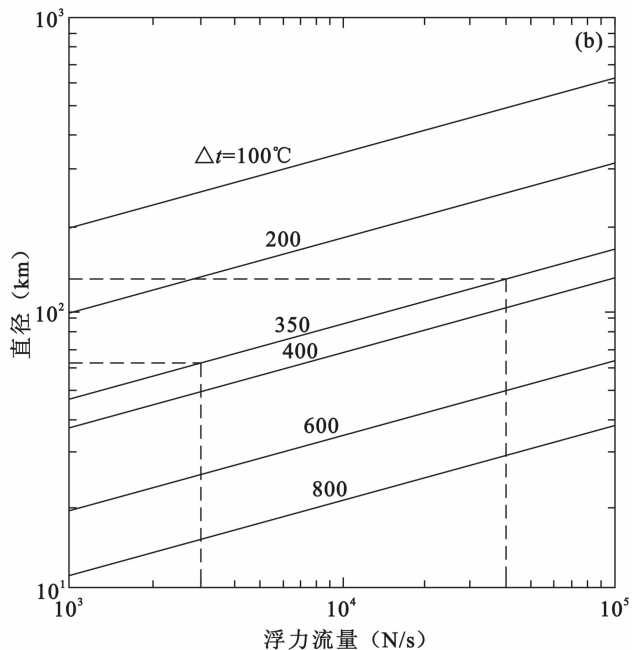
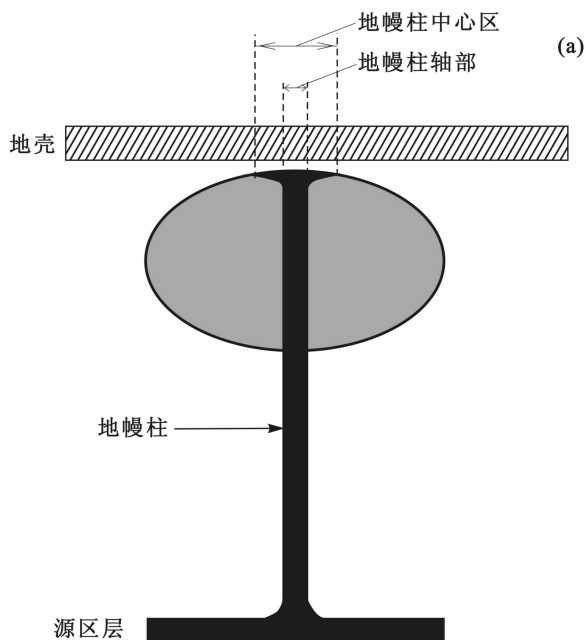


图 2 (a) 地幔柱中心区及轴部示意图; (b) 地幔柱尾部直径换算图(据 Griffiths et al., 1991b)

Fig. 2 (a) A schematic diagram of a mantle plume fed by a constant flux; (b) the diameter of conduits carrying a given buoyancy flux for selected local temperature differences(after Griffiths et al., 1991b)

蚀程度,推算出峨眉山地幔柱中心区的范围约为 260 ~ 300km(何斌等,2003;图 3a)。

## 2.2 前人对峨眉山地幔柱轴部位置的研究

对于峨眉山地幔柱轴部的位置,近年来的一些研究工作从不同角度对其进行了约束。高温苦橄岩被认为代表了早期地幔柱轴部熔融的产物,其出露地区往往可代表轴部的位置,如 Karoo LIP (Campbell,2005)。从目前的发现来看,苦橄岩出露位置主要集中在 ELIP 的西部地区(Hanski et al., 2010;图 3a)。宋谢炎等(2002)认为盐源—丽江地区玄武岩的喷发显示出极大的岩浆产率,并有苦橄岩和橄榄玄武岩出露,说明此处是地幔热柱的活动中心。侯增谦等(2005)认为以丽江—大理—攀枝花为中心的苦橄岩分布三角区代表了峨眉山地幔柱的轴部位置。张招崇等(2003,2004,2006)在丽江市城一带发现了可代表峨眉山地幔柱头部熔融产物的苦橄岩层,计算出的初始岩浆 MgO 含量为约 22%,开始熔融温度为 1630 ~ 1680°C。并由此推断地幔柱的轴部位置位于云南丽江县城一带。He Qi 等(2010)通过 PRIMELT2 计算出的峨眉山地幔柱头部熔融产生了原始地幔岩浆的 MgO 含量达 23%,  $t_p = 1627^\circ\text{C}$ ,并认为地幔柱的中心应靠近丽江地区。

经典地幔柱理论模型认为,在大规模岩浆作用

之前,地幔柱头部的上涌会使地表在几百万年之内发生千米级的隆升。如果地幔柱作用发生在一个浅海相的沉积盆地环境,上覆地层因抬升而遭受差异剥蚀。因此,对 LIP 沉积记录的研究可对地幔柱轴部位置进行约束(Campbell et al., 1990;Griffiths et al., 1991a;Farnetani et al., 1994)。何斌等(2003, 2006)对 ELIP 粗碎屑岩系和下伏的茅口组灰岩的研究不仅证实了地幔柱引起的地表隆升的存在,并根据差异剥蚀内带的分布范围推测出 ELIP 地幔柱作用的轴部在四川米易一带。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,其收敛中心可指示地幔柱的轴部位置(Ernst et al., 1995a, b, 1997, 2001; Bryan et al., 2008)。笔者对 ELIP 基性岩墙群几何学特征研究表明,岩墙群呈中心放射状,其中心收敛于云南永仁一带(李宏博等, 2010)。米易和永仁两地相距较近(100km),所代表的峨眉山地幔柱轴部位置基本吻合(图 3a)。

地球物理深部探测结果表明,自峨眉山地幔柱中心(He Bin et al., 2003 推测的中心区域)向边缘地区,地壳厚度、发震层/脆性层厚度(seisogenic/brittle layer)逐渐减薄,而无震层/韧性层厚度(aseismic/ductile layer)比率逐渐增大(图 3b)。这些观察表明峨眉山地幔柱对上覆的岩石圈有增厚效

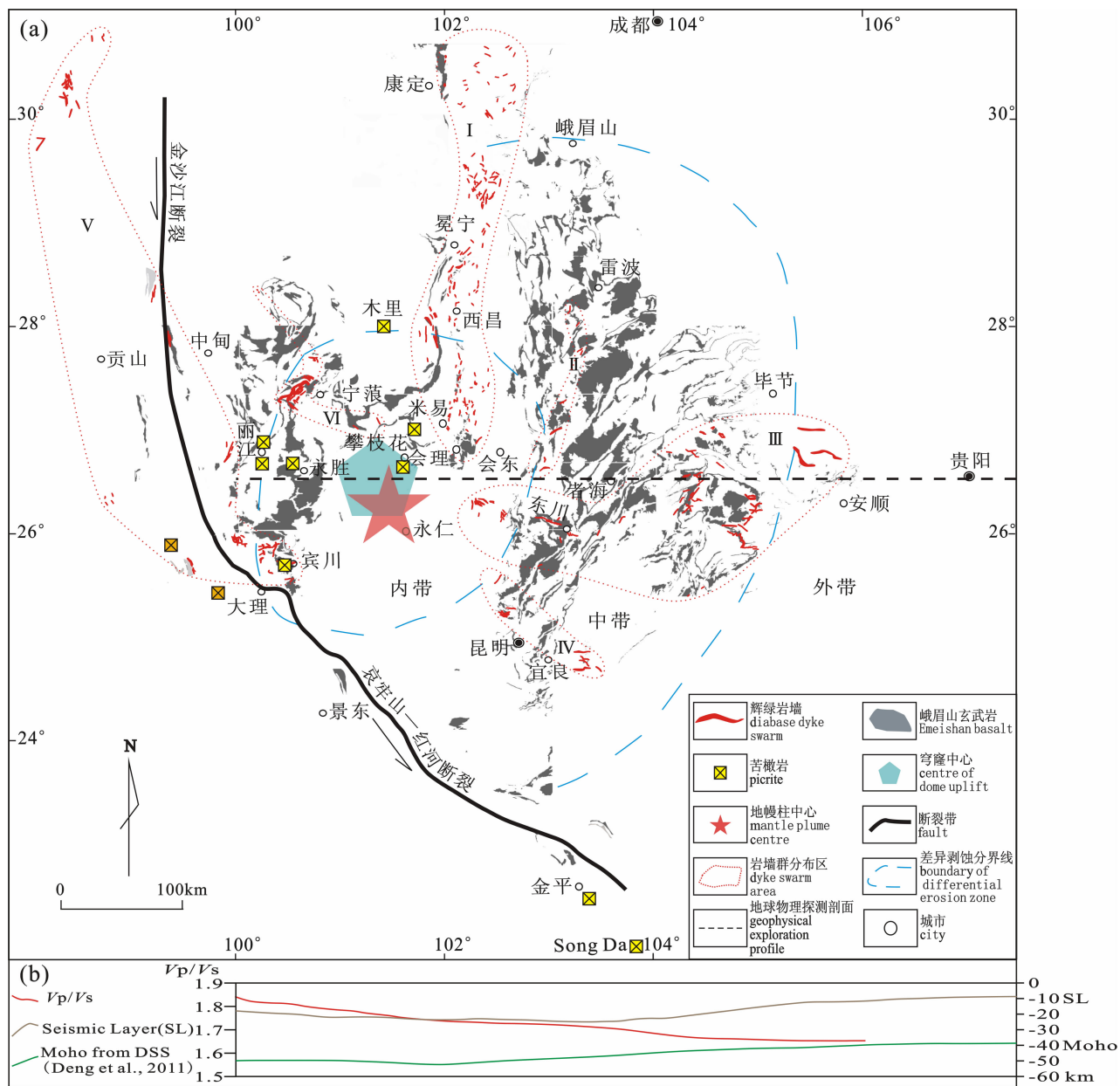


图 3 (a)ELIP 辉绿岩墙群分布复原图(据李宏博等, 2010),金沙江—哀牢山—红河断裂带左侧岩墙群沿断裂向 NW 移动 500km 后复原,岩墙走向以断裂为参考保持不变,橙色标识为复原后的金平和 Song Da 苦橄岩位置,ELIP 差异剥蚀据何斌等(2006),五边形区域为何斌等(2006)推测的穹状隆升中心;五角星为岩墙群的收敛中心;(b)ELIP 地球物理探测剖面(Wu Jing et al., 2011),红色线为  $V_p/V_s$  比,棕色线为地震波反射层,绿色线为 Moho 面深度,据邓阳凡等,2011

Fig. 3 (a) Recover of ELIP diabase dyke swarms (modified from Li Hongbo et al., 2010), dyke swarms on the left of the Jinsha River—Ailao Mts.—Honghe River fault were relocated 500 km towards NW. Referring to the fault, the trend of dyke swarms didn't change and the same way is used to Jinping and Song Da picrites. Boundary of differential erosion was referred to He Bin et al., (2006) and pentagon was the centre of dome uplift. Pentagon was the centre of dyke swarms concentration. (b) ELIP geophysical exploration profile, after Wu Jing et al., 2010. Red line is the  $V_p/V_s$  ratio, brown line is seismic layer (SL), green line is Moho from DSS (Deep seismic sounding; Deng Yangfan et al., 2011)

应(Wu Jing et al., 2011)。中心区的下地壳存在一个 P 波高速带 (high-velocity lower crust, HVLC) 以及呈透镜状的、高速上地幔带 ( $V_p = 8.1 \sim 8.6 \text{ km/s}$ ), 这个异常区 (E100.8° ~ E102.8°) 与 ELIP 的中心区是基本对应的(Liu Jianhua et al., 2001)。这些

发现均与峨眉山地幔柱头部上涌导致的壳幔相互作用有关,也印证了地幔柱轴部位置的存在。

### 2.3 对地幔柱轴部位置偏差的解释

如上所述,通过苦橄岩(以丽江为中心)和差异剥蚀、放射状岩墙群(以米易—永仁为中心)所限定

的峨眉山地幔柱轴部位置并不完全重合,但两个区域在地理上较为接近。如何解释这种偏差?峨眉山地幔柱的轴部位置究竟在何处?

是不是由于地幔柱的迁移造成的呢?现代观测表明,虽然热点(hot spot)存在迁移现象,但速度十分缓慢,一般 $< 1 \text{ cm/a}$ (Duncan et al., 1991)。ELIP的火山作用的主喷发时限为260~255Ma,即持续了约5Ma。由此计算的迁移距离应 $< 50 \text{ km}$ ,而丽江至米易—永仁的距离为170~190km,远远超出了热点迁移的范围。况且,苦橄岩多数形成于早期,喷发的时限更为短暂。因此,地幔柱迁移的说法不能很好地解释这一点。

一般说来,地表隆升引起的差异剥蚀和放射状基性岩墙群是地幔柱在宏观上造成的结果,两者对地幔柱轴部的约束更为可靠。因此,峨眉山地幔柱的轴部位置应在米易—永仁一带。米易二滩、攀枝花一带出露的苦橄岩就是峨眉山地幔柱轴部早期岩浆活动的残留,而永仁地区由于地幔柱导致的地表隆升而遭受了强烈的剥蚀,以致早期形成的苦橄岩未能得以保存。金河—程海、小金河—丽江等深大断裂带作为峨眉山地幔柱轴部位置岩浆喷发的主要通道,其产状控制了苦橄质和玄武质溢流岩浆的喷发,使其偏于西部。此外,地幔柱的上涌引起上覆岩石圈的隆升,以及地幔柱岩浆活动对岩石圈的加厚作用均会导致地幔柱的轴部位置(米易—永仁一带)的地形隆升(何斌等,2003,2006;李宏博等,2011;Wu Jing et al., 2011;图3b)。同时,轴部以西的大理—丽江一带处在扬子克拉通的西部边缘地带,岩石圈的厚度可能较腹地要薄一些。这就形成了地幔柱轴部位置的西昌—楚雄—文山相对隆起区和西部木里—丽江—大理相对凹陷带的古地貌特征(表1,图1a)。因此,深大断裂带的产状以及古地貌等因素使得轴部岩浆的喷发偏于西部,从而形成了大理—丽江一带的苦橄岩分布较多,以及巨厚玄武岩层的现象。

地幔柱头部继续上升至岩石圈底部时,地幔柱与岩石圈的相互作用导致地幔柱头部发生扁平化(Flattened),其直径扩大为原来的两倍(Campbell, 2007)。峨眉山地幔柱的影响范围将明显扩大,岩浆活动逐渐向东部及周边地区扩展。同时,随着地幔柱头部温度的有所降低,火山作用强度逐渐减弱,溢流玄武岩喷溢量不断减少,从而形成了中心地区厚周边地区薄、西部厚东部薄的分布格局。

### 3 结论

峨眉山地幔柱的轴部位置应在米易—永仁一带。峨眉山地幔柱到达上地幔时轴部直径大约为65~105km,其中心区的范围约为260~300km。深大断裂带、古地貌等因素控制了溢流玄武岩的喷发和展布,使得轴部岩浆的喷发偏于西部,形成了大理—丽江一带的苦橄岩分布较多的现象。

致谢:审稿人为本文提出了宝贵的意见和建议,谨致衷心感谢!

#### 注 释 / Note

① 四川省地质局第2区测队. 1971. 峨眉幅(H48-20)1/20万区域地质测量报告.

#### 参 考 文 献 / References

- 程建武,郭桂红,岳志军. 2010. 安宁河断裂带晚第四纪活动的基本特征及强震危险性分析. 地震研究,33(3):265~272.
- 邓阳凡,李守林,范蔚茗,刘佳. 2011. 深地震测深揭示的华南地区地壳结构及其动力学意义. 地球物理学报,54(10):2560~2574.
- 冯增昭,金振奎,杨玉卿,鲍志东,辛文杰,等. 1994. 滇黔桂地区二叠纪岩相古地理. 北京:地质出版社,4,38~46,附图1,6.
- 国家地震局地质研究所. 1990. 滇西北地区活动断裂. 北京:地震出版社,10,93.
- 何斌,徐义刚,王雅玫,罗震宇,王康明. 2005. 用沉积记录来估计峨眉山玄武岩喷发前的地壳抬升幅度. 大地构造与成矿学,29(3):316~320.
- 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,卢记仁,林盛中. 2005. 峨眉地幔柱轴部的榴辉岩—地幔岩源区:主元素、痕量元素及Sr、Nd、Pb同位素证据. 地质学报,79(2):200~219.
- 李宏博,张招崇,吕林素,汪云峰,寇彩化,李永生,廖宝丽. 2011. 栖霞组与茅口组等厚图:对峨眉山地幔柱成因模式的指示意义. 岩石学报,27(10):2963~2974.
- 李宏博,张招崇,吕林素. 2010. 峨眉山大火成岩省基性岩墙群几何学研究及对地幔柱中心的指示意义. 岩石学报,26(10):3143~3152.
- 刘家铎,张成江,等. 2007. 攀西地区金属成矿系统. 北京:地质出版社,39.
- 刘肇昌,李凡友,钟康惠,李伟,文绍先,等. 1996. 扬子地台西缘构造演化与成矿. 成都:电子科技大学出版社,12,167.
- 秦德先,燕永锋,林幼斌,田毓龙,刘伟. 1999. 程海断裂带玄武岩及其成矿. 有色金属矿产与勘查,8(6):373~377.
- 四川省地质矿产局. 1991. 四川省区域地质志. 北京:地质出版社,363.
- 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.
- 宋谢炎,侯增谦,曹志敏,卢记仁,汪云亮,张成江,李佑国. 2001. 峨

- 眉山大火成岩省的岩石地球化学特征及时限. 地质学报, 75 (4): 498 ~ 506.
- 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.
- 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜, 等. 1988. 攀西裂谷. 北京: 地质出版社, 141.
- 张招崇, Mahoney J 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: 地幔柱头部熔融的证据. 岩石学报, 22(6): 1538 ~ 1552.
- 张招崇, 董书云. 2007. 大火成岩省是地幔柱作用引起的吗?. 现代地质, 21(2): 247 ~ 254.
- 张招崇, 王福生, 郝艳丽, Mahoney J J. 2004. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束. 地质学报, 78(2): 171 ~ 180.
- 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, 48(4): 448.
- Bryan S E, Ernst R E. 2008. Revised definition of large igneous provinces (LIPs). *Earth Science Reviews*, 86(1): 175 ~ 202.
- Campbell I H. 2005. Large igneous provinces and the mantle plume. *Elements*, 1(5): 265 ~ 269.
- Campbell I H. 2007. Testing the plume theory. *Chemical Geology*, 241(3 ~ 4): 153 ~ 176.
- Campbell I H, Griffiths R W. 1990. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood Basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 99(1 ~ 2): 79 ~ 93.
- Chung Sunlin, Jahn B M. 1995. Plume—lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian—Triassic boundary. *Geology*, 23(10): 889 ~ 892.
- Coffin M F, Eldholm O. 1994. Large igneous provinces: Crustal structure, dimensions and external consequences. *Reviews of Geophysics*, 32(1): 1 ~ 36.
- Cordery M J, Davies G F, Campbell I H. 1997. Genesis of flood basalts from eclogite-bearing mantle plumes. *Journal of Geophysics Research*, 102(B9): 20179 ~ 20197.
- Courtillot V, Jaupart C, Manighetti I, Tapponnier P, Besse J. 1999. On causal links between flood basalts and continental breakup. *Earth and Planetary Science Letters*, 166(3 ~ 4): 177 ~ 195.
- DePaolo D J, Manga M. 2003. Deep origin of hotspots — The mantle plume model. *Science*, 300(5621): 920 ~ 921.
- Duncan R A, Richards M A. 1991. Hotspots, mantle plumes, flood basalts, and true polar wander. *Review of Geophysics*, 29(1): 31 ~ 50.
- Ernst R E, Buchan K L. 2001. The use of mafic dike swarms in identifying and locating mantle plumes. In: Ernst R E, Buchan K L. eds. *Mantle Plumes: Their Identification through Time*. USA: Geological Society of America, Inc., 247 ~ 265.
- Ernst R E, Buchan K L, Palmer H C. 1995a. Giant dyke swarms: Characteristics, distribution and geotectonic applications. In: Baer G, Heimann A. eds. *Physics and Chemistry of Dykes*. Netherlands: Balkema, 3 ~ 21.
- Ernst R E, Head J W, Parfitt E, Grosfils E, Wilson L. 1995b. Giant radiating dyke swarms on Earth and Venus. *Earth Science Review*, 39(1 ~ 2): 1 ~ 58.
- Ernst R E, Buchan K L. 1997. Giant radiating dyke swarms: Their use in identifying pre-Mesozoic large igneous provinces and mantle plumes. In: Mahoney J J, Coffin M F. eds. *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*. Washington DC: American Geophysical Union, 297 ~ 333.
- Fan Weiming, Wang Yuejun, Peng Touping, Miao Laicheng, Guo Feng. 2004. Ar-Ar and U-Pb geochronology of Late Paleozoic basalts in western Guangxi and its constraints on the eruption age of Emeishan basalt magmatism. *Chinese Science Bulletin*, 49(21): 2317 ~ 2328.
- Farnetani C G, Richards M A. 1994. Numerical investigations of the mantle plume initiation model for flood basalt events. *Journal of Geophysical Research*, 99(B7): 13813 ~ 13833.
- Farnetani C G. 1997. Excess temperature of mantle plumes: The role of chemical stratification across D". *Geophys Research Letters*, 24(13): 1583 ~ 1586.
- Griffiths R W, Campbell I H. 1991a. Interaction of mantle plume heads with the Earth's surface and onset small-scale convection. *Journal of Geophysical Research*, 96(B11): 18275 ~ 18310.
- Griffiths R W, Campbell I H. 1991b. On the dynamics of long-lived plume conduits in the convecting mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 103(1 ~ 4): 214 ~ 227.
- Guo Feng, Fan Weiming, Wang Yuejun, Li Chaowen. 2004. When did the Emeishan mantle plume activity start? Geochronological and geochemical evidence from ultramafic—mafic dikes in southwestern China. *International Geology Review*, 46(3): 226 ~ 234.
- He Qi, Xiao Long, Balta B, Gao Rui, Chen Jianye. 2010. Variety and complexity of the Late-Permian Emeishan basalts: Reappraisal of plume—lithosphere interaction processes. *Lithos*, 119(8): 91 ~ 107.
- He Bin, Xu Yigang, Chung Sunlin, Xiao Long, Wang Yamei. 2003. Sedimentary evidence for a rapid crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 213(3 ~ 4): 389 ~ 403.
- Jay A E, Widdowson M. 2008. Stratigraphy, structure and volcanology of the SE Deccan continental flood basalt province: Implications for eruptive extent and volumes. *Journal of the Geological Society*, 165(1): 177 ~ 188.
- Liu Jianhua, Liu Futian, He Jiankun, Chen Hui, You Qingyu. 2001. Study of seismic tomography in Panxi paleorift area of southwestern China — Structural features of crust and mantle and their evolution. *Science in China (ser. D)*, 44: 277 ~ 288.
- Olsen P E. 1999. Giant lava flows, mass extinctions, and mantle plumes. *Science*, 284(5414): 604 ~ 605.
- Peate I U, Bryan S E. 2008. Re-evaluating plume-induced uplift in the Emeishan large igneous province. *Nature Geoscience*, 1(9): 625 ~ 629.
- Wu Jing, Zhang Zhongjie. 2011. Spatial distribution of seismic layer, crustal thickness, and  $V_p/V_s$  ratio in the Permian Emeishan Mantle Plume region. *Gondwana Research*, 22(1): 127 ~ 139.
- Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, Zheng Yongfei, He Bin, Pirajno F. 2004. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: Implications for plume—lithosphere interaction. *Earth Planet Science Letters*, 288(3 ~ 4): 525 ~ 546.
- Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, Wang Fusheng, Pirajno F. 2006. 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 Meifu, Zhao Junhong, Qi Liang, Su Wenchao, Hu Ruizhong. 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): 1 ~ 19.

## The Location of the Tail of Emeishan Mantle Plume

LI Hongbo<sup>1,2)</sup>, ZHANG Zhaochong<sup>1)</sup>, Li Yongsheng<sup>1)</sup>, Wang Yunfeng<sup>1)</sup>

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

2) Geological Museum of China, Beijing, 100034

**Abstract:** This paper discusses the tail of Emeishan mantle plume and suggests that it locates in Miyi—Yongren area, southern Sichuan—northern Yunnan. On the basis of the classic mantle plume theory, the estimated diameter of Emeishan plume tail was 65 ~ 105km when it reached the upper mantle. Picrite distributions and sedimentary responses showed that the center zone of the Emeishan plume was ca. 260 ~ 300km wide. Eruption and outcropping of flood basalts were constrained by deep-seated faults and paleogeomorphology, which resulted in the concentration of picrite in the west of the Emeishan large igneous province.

**Key words:** Emeishan large igneous province; mantle plume; location of tail; picrite; deep-seated faults; paleogeomorphology

## 当前国际地质编图的一些动态

李廷栋

中国地质科学院,北京,100037

本届(第34届)国际地质大会展示的地质图件很少,远远少于过去历届国际地质大会。现仅从收集到的一些资料中略述一、二。

### 1 世界地质图委员会仍是全球和洲际性地质编图主要组织者

2008年以来,世界地质图委员会又组织编制了一系列洲际性地质图件,包括地质图、地震构造及地球动力学图、大地构造图、地球物理图、金属成矿图、变质地质图、海底地质及地球物理图、环境及自然灾害图、水资源图等。

1: 5000万及1: 2500万世界地质图,分别于2009年及2010年出版第三版,并附简要文字说明。

其中一些图鉴既有数字版,又出版纸质版,但仍有不少图件只出了纸质版。1: 5000万世界构造及动力学图出版了高精度数字图。

### 2 重现海洋及极地地质图件的编制、出版

世界地质图委员会于2012年编制出版了1: 2000万大西洋构造图(附说明书);1: 400万地中海地质、地貌图,1: 1000万南极大地构造图,1: 1500万北极磁力及重力异常图(2010)。俄罗斯、美国、加拿大等国编制了1: 500万北极地质图系,包括地质图、大地构造图等。

世界地质图委员会编制的世界地质图均单独附有北极和南极地质图。

### 3 地质大国仍十分重视地质图件的编制出版

除俄罗斯、中国、美国外,其他地质大国,如加拿大、澳大

利亚、印度、巴西等都十分重视综合地质图件的编制和出版。

澳大利亚编制出版了1: 1500万地质图系,包括地质图、磁力图、重力异常图等。这些图均是根据近年1: 25万及1: 100万地质调查和大量地球物理探测资料综合研究后编制的。澳大利亚还编制了1: 1000万比例尺的矿山分布图和矿山图集。

印度报道的大部分为2000年到2006年出版的地质图件,包括1: 200万印度地貌图及地质图,1: 500万印度地质图,1: 200万印度矿产图,印度矿产图集,以及一些地球物理及环境、工程地质图件和喜马拉雅等地地质图件。

俄罗斯、美国、加拿大以及欧洲一些国家(法国、意大利、德国等)以及一些国际组织编制的全球的、洲际的、国际的和海洋的地质图件、图系很多,过去已经报道。

### 4 注重地质图件服务于地学科普

许多国家编制了大量简化、通俗的地质图件及矿产分布图,地质景观及地质遗迹分布图,世界及国家地质公园分布图等。许多国家编制了小比例尺的桌面用图和明信片式的全国性或地区性的地质图件。

澳大利亚编制了《澳大利亚矿山图集》明信片:除服务于商业、土地管理、矿产勘探以外,为中、小学教师、学生提供有关矿产资源方面的资料信息,为小学知识竞赛提供矿产资源方面的资料。

(下转第216页)