

【编者按】中国矿物岩石地球化学学会自 1978 年成立的 30 多年来,有一个很好的对学科发展“十年一回顾”的传统。进入 21 世纪的十年来,我国在矿物学、岩石学、地球化学、沉积学及其相关学科的研究都有了长足的进展,在一些领域还有某些重大的突破;及时系统地进行综合总结和展望,对促进学科发展无疑有着十分重要的意义。本届理事会拟继续这一工作,组织编纂《21 世纪前十年学科进展的回顾与展望》的文集,所有稿件将在《矿物岩石地球化学通报》上陆续刊出,待刊出后再编辑成册。本刊从这一期开始将陆续刊登该文集的系列文章,以飨读者。

21 世纪初 10 年火山与地球内部化学研究进展

樊祺诚¹, 张招崇²

1. 中国地震局 地质研究所, 北京 100029; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083

摘 要:进入 21 世纪,我国除了在长白山天池火山、五大连池火山和腾冲火山三个主要活动火山区进行监测与研究,还开展了中国其他第四纪火山区的活动火山调查工作,发现并确定了一些新的活动火山,如镜泊湖、大兴安岭、乌兰哈达等第四纪火山区中存在的全新世火山。自峨眉山大火成岩省被确定以来,我国近 10 年在大火成岩省研究方面取得了重要进展,并新确定了一些新的大火成岩省,如塔里木大火成岩省和措美大火成岩省,逐渐为国际地学界所接受。

关 键 词:活动火山;大火成岩省;研究进展

中图分类号: P317、P591⁺. 2 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2012)03-0195-10

Study Advances in Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior During the First Decade of the 21st Century

FAN Qi-cheng¹, ZHANG Zhao-chong²

1. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: Besides of monitoring and studying the volcanoes of Changbaishan Tianchi, Wudalianchi and Tengchong, surveys have been carried out at other Quaternary active volcano regions since the 21st century. Some new volcano regions were discovered, for example, Holocene volcanoes in Jingpohu, in Great Xing'an Range and Wulanhada. Remarkable advance has been obtained in the research field of the large igneous province (LIP) in the near ten years after the Emeishan LIP had been confirmed; several new LIPs have been identified and approved by international geology community, e. g., the Tarim LIP in the Xinjiang province and the Comei LIP in the Tibet province.

Key words: active volcano; large igneous province; advanced study

1 活动火山调查与研究

1.1 长白山天池火山岩浆混合作用与喷发机制

长白山天池火山是我国最大最具喷发危险的活
动火山,上世纪 90 年代初对天池火山的研究和火山

监测站的建设,开启了我国活动火山研究的新时代。
火山地质、岩浆演化和地球物理深部探测的结果显
示,天池火山之下存在地壳和地幔双层岩浆房^[1~3]。
由于地幔粗面玄武质岩浆持续向地壳岩浆房补给,
保持了天池火山逾百万年持续不断的喷发活动。天

收稿日期: 2011-12-05 收到, 2012-02-02 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40925006、40972047); 国家重点基础研究发展项目资助项目(2009CB421002)

第一作者简介: 樊祺诚(1948—), 男, 研究员, 从事火山与地球内部物质研究。 E-mail: fq@ies.ac.cn.

池火山千年大喷发的碱流质浮岩中发现了铁橄榄石与石英非平衡共生和大量熔蚀状矿物等岩相学特征,以及对碱流质浮岩中包裹的玄武质粗安岩-粗安岩角砾和条带状浆屑的岩相学、矿物学和岩石化学研究,提出了地幔的粗面玄武质岩浆向地壳岩浆房的注入,发生粗面玄武质岩浆与碱流质岩浆强烈混合作用,并触发千年大喷发,探讨了天池火山千年大喷发的岩浆混合作用与喷发机制。由于地幔粗面玄武质岩浆注入地壳岩浆房,高温(1100~1200℃)玄武质岩浆进入相对低温(850~900℃)的碱流质岩浆而淬火和混合作用,淬火形成各种大小不一的角砾。随着玄武质岩浆的大量注入,地壳岩浆房的温度升高,局部出现玄武质岩浆与碱流质岩浆呈条带状混合。天池火山地壳岩浆房的熔体具有分层结构特点,由于地幔粗面玄武质岩浆注入导致不同层位岩浆的扰动和混合作用,成为触发天池火山的喷发机制^[2,4,5]。

根据天池火山野外地质和火山岩年代学研究^[5],地壳岩浆房粗面岩岩浆造锥阶段(1~0.04 Ma),来自地幔的钾质粗面玄武岩浆的喷发活动也没有停止过(0.87~0.06 Ma),在天池火山锥体内外形形成诸多小火山渣锥。所以,天池火山之下地壳和地幔双层岩浆房具有互动式喷发特点,西太平洋板块俯冲-东北亚大陆弧后引张,可能是长白山天池火山喷发的动力学机制。

1.2 镜泊湖全新世火山

镜泊湖全新世火山群位于黑龙江省宁安县小北湖林场内,在距今 5200~5500 年的 300 年间相继喷发形成十余座火山锥,火山岩面积近 500 km²^[6,7]。镜泊湖全新世火山岩属于一套钾质系列火山岩,包括钾质粗面玄武岩、碧玄岩和响岩质碱玄岩三种不同的火山岩类型^[8]。岩浆来自不同程度富钾地幔源区熔融产物,彼此不存在分离结晶演化关系。镜泊湖全新世火山西区粗面玄武岩和碧玄岩来自钾质交代程度较低的地幔源区,较高级度的部分熔融产生粗面玄武岩浆,较低程度的部分熔融产生碧玄岩浆。东区火山岩含白榴石、金云母、角闪石巨晶及地幔橄榄岩捕虏体,其岩浆源区为强烈钾质交代的地幔。根据火山岩中普通辉石巨晶形成压力(1.57~1.63 GPa),估计响岩质碱玄岩岩浆在约 52~54 km 发生高压分离结晶作用,岩浆在上升过程中捕获了岩石圈地幔橄榄岩。

镜泊湖地处太平洋板块俯冲的东亚大陆弧后扩张区,来自地幔楔或消减的深俯冲板片脱水形成的富钾流体对岩浆源区地幔的不同程度交代作用和部

分熔融,导致镜泊湖火山区内相距不到 15 km 的东西两区地幔化学非均一性和岩浆的多样性。

1.3 大兴安岭第四纪火山

中国东北大兴安岭中部第四纪哈拉哈河-绰尔河火山,熔岩流呈北东向带状沿河谷分布,第四纪火山 35 座,熔岩流分布面积约 400 km²;北部诺敏河-奎勒河火山区第四纪火山 24 座,熔岩流分布面积约 600 km²。白志达等^[9]首先报道了哈拉哈河-绰尔河火山存在全新世火山。根据火山地质特征、地层覆盖关系、岩石风化程度和火山岩 K-Ar 年代学研究,哈拉哈河-绰尔河第四纪火山活动初步划分为早更新世、中更新世、晚更新世和全新世四期^[10,11],其中哈拉哈河-绰尔河的高山火山、焰山火山、十号沟盆地火山、小东沟火山四座火山和诺敏河-奎勒河的马鞍山火山为全新世火山。根据火山地质和喷发特征研究^[10,12],大兴安岭第四纪火山分属四种喷发类型:斯通博利型、高山-焰山型、夏威夷型和射汽岩浆型,高山-焰山型为新提出的发生于中国大陆内部的一种新的喷发型式。哈拉哈河-绰尔河玄武岩为钠质系列碱性玄武岩,主要类型为碱性橄榄玄武岩;诺敏河-奎勒河玄武岩属于钾质系列碱性玄武岩,主要类型为碱玄岩和碧玄岩。

大兴安岭中部哈拉哈河-绰尔河和北部诺敏河-奎勒河火山岩中均含有丰富的尖晶石橄榄岩和石榴石橄榄岩捕虏体。根据绰尔河新鲜的石榴石二辉橄榄岩 *p-t* 平衡条件估计(1164 °C, 2.36 GPa),其形成深度约 76 km。这与中国东部其它地方四相共存的石榴石二辉橄榄岩类似,区别于五相共存的尖晶石/石榴石二辉橄榄岩形成条件(<70 km),证实它们是来自尖晶石二辉橄榄岩与石榴石二辉橄榄岩相转变带之下深度(>70 km)的石榴石橄榄岩稳定区^[13]。

1.4 乌兰哈达全新世火山

内蒙乌兰哈达全新世火山位于大兴安岭一大同新生代火山活动带南段,火山群坐落在太古宙乌拉山岩群和新近纪汉诺坝玄武岩之上,火山群面积约 280 km²,分布着不同类型、不同规模的火山约 30 余座。乌兰哈达火山群中火山锥保存尚好,结构完整,但明显可分为两期。早期火山锥规模小,已遭受一定剥蚀,但火口形态仍清晰可辨。晚期火山结构完整,火山锥、火山口、喷火口均完好,甚至火山喷发晚期形成的火口锥(火口内小的侵出穹丘)也完好无损,未遭受剥蚀。熔岩流单元的结构、流淌范围清晰可辨,熔岩流表面构造、胀裂谷、塌陷谷及熔岩塚均保存完好,这是判断新近火山喷发的直接证据。根

据火山岩与沉积地层的叠置关系、火山结构组成、地貌特征以及火山产物的风化程度等,结合第四纪地貌学和热释光年龄(30.56 ± 2.59 ka BP; 21.05 ± 1.79 ka BP),乌兰哈达第四纪火山群主要由 3 万年以来的火山喷发形成,可划分为晚更新世和全新世两期^[14]。全新世火山包括炼丹炉火山(南、北炼丹炉火山活动相对较早,中炼丹炉较晚)和尖山西火山(最晚喷发)。全新世火山活动强度大,熔岩流形成规模宏大的“石河、石湖”,并堰塞水系形成火山堰塞湖。乌兰哈达全新世火山是研究蒙古高原南缘现代岩石圈深部结构及其活动性的天然“窗口”。

1.5 雷琼全新世火山

雷琼地区火山是中国南方分布面积最大的一片跨越海域的第四纪火山岩,包括上百座火山锥和约 7000 km² 的火山岩,火山活动从始新世持续到全新世,具有多期喷发活动的特点。海口市西南的石山—永兴一带就集中分布着多座保存完好的全新世火山锥。根据火山地质与地貌特征,结合火山岩中石英砂岩捕虏体的热释光年龄($10.27 \sim 9.91$ ka),确定雷虎岭火山和马鞍岭火山为全新世喷发火山,马鞍岭火山为最新喷发的火山^[15]。雷虎岭橄榄拉斑玄武岩代表相对原始的玄武质岩浆,而马鞍岭石英拉斑玄武岩是相对演化的岩浆。根据实验岩石学结果^[16],橄榄拉斑玄武岩岩浆在低压下($0 \sim 0.5$ GPa),即相当于小于 15 km 深度,在较高温度下结晶以橄榄石为主,稍低温度下(<1200 °C)出现单斜辉石和斜长石,残余液相为石英拉斑玄武岩成分。据此,由 MgO、Ni 含量变化估计,橄榄拉斑玄武岩浆经约 10% 橄榄石的结晶分异可以形成石英拉斑玄武岩浆。

根据樊祺诚等^[17,18]研究,北部湾内位于北海市正南约 20 海里的涠洲岛,面积约 25 km²,其东南方向 9 海里还有一座面积仅约 2 km² 的斜阳岛,它们都是早更新世火山喷发形成的火山岛,晚更新世又发生猛烈的射气岩浆喷发,塑造了涠洲岛和斜阳岛现代火山地貌。根据从晚更新世射气岩浆喷发的火山碎屑岩中捕获烘烤的灰白色粗砂岩和砖红色细砂岩两个样品的光释光(OSL)测年结果相当一致,分别为 33.7 ± 1.8 ka 和 33.7 ± 0.4 ka。另外,在斜阳岛射气岩浆喷发的基浪堆积层中采到由火山喷发带来的贝壳碎片,经北京大学加速器质谱(AMS)¹⁴C 测试,贝壳¹⁴C 年龄为 36.135 ka, BP,这一结果与砂岩捕虏体光释光(OSL)测年结果基本一致。因此,初步认定涠洲岛和斜阳岛最新火山喷发距今约 3 万年左右的晚更新世末期($36 \sim 33$ ka)。

1.6 腾冲火山

腾冲火山区位于印度板块与欧亚板块碰撞带的北东侧,在腾(冲)—梁(河)断陷的北部,数十座火山以腾冲盆地为中心展布,火山岩面积约 9000 km²,主要是第四纪火山活动的产物。马鞍山、打鹰山、黑空山三座火山在腾冲火山群中火山锥和火山口保存最完整,熔岩流无风化层,保持了最新喷发火山之地貌特征,已发表的年代学结果也表明是最新喷发活动^[19],其岩浆来源及演化趋势也相似^[20,21]。最近对马鞍山、打鹰山、黑空山火山岩主微量和 Sr、Nd、Pd 同位素地球化学研究认为^[12],腾冲火山岩浆源区具有 MORB 与富集地幔混合之特征,推测为新特提斯俯冲洋壳重新熔融,导致腾冲地区的高钾钙碱性岩浆的火山活动,解释了腾冲在新生代大陆板内构造环境背景下出现岛弧或活动大陆边缘火山岩地球化学特征的现象。马鞍山、打鹰山和黑空山火山高钾钙碱性岩浆经历了岩浆房阶段辉石、钛铁矿的结晶分离作用和岩浆上升过程中斜长石的结晶分离作用,导致岩浆成分从中基性向中酸性演化,火山岩从玄武质粗安岩→粗安岩→粗面质英安岩演化。

1.7 年轻火山岩 U-Th 非平衡研究

近年来樊祺诚与邹海波利用离子探针合作开展全新世火山岩及其年轻锆石的 U-Th 非平衡研究,发现中国东部年轻火山岩(五大连池、天池、镜泊湖、龙岗、大兴安岭、海南岛)都显示显著的²³⁰Th 过剩,表明岩浆来源于含石榴子石的深部地幔,并且部分熔融速率低。其中五大连池主要来自深部(≥ 75 km)的岩石圈地幔、天池、镜泊湖、龙岗和大兴安岭岩浆主要来自软流圈地幔,而海南岛火山岩则显示下地幔特征。中国东部年轻火山岩中 U-Th 非平衡并没有显示俯冲的太平洋板块对年轻火山岩的物质贡献^[22~26]。

在天池火山千年喷发的碱流质浮岩、腾冲全新世钙碱性火山岩、大兴安岭等地全新世碱性玄武岩中都分别选出锆石,已取得阶段性研究成果,测试研究仍在进行中。首次精确测定了天池火山千年喷发碱流岩中锆石的结晶年龄(~ 0.9 万年),提出全球最年轻的高质量锆石等时线年龄,因火山喷发年龄是 0.1 万年前,由此确定了千年大喷发的岩浆的滞留时间约 0.8 万年^[24],这是目前世界上用离子探针测出的最年轻的高质量锆石等时线年龄(文献中多为全岩-单颗锆石两点模式年龄,而非等时线年龄)。该时间远远小于世界上其他地方报道的大喷发的 5~14 万年的滞留时间^[27],说明长白山碱流质岩浆可以很快地演化成巨大的火山爆发。同时,根据锆石

中钛含量的地热温度计和碱性长石-岩浆地热温度计计算结果,锆石和碱性长石的形成温度都较低(740℃左右),且基本一致,表明锆石和碱性长石斑晶基本同时结晶,也就是天池火山千年喷发的碱流质岩浆温度应在 740℃左右,较低的岩浆温度表明岩浆中富含水。然而,长白山火山岩显示²³⁰Th 过剩^[23,24],微量元素也没有出现 Nb、Ta 负异常^[28],同样没有显示太平洋板块俯冲的物质和流体的贡献。天池火山的碱流质岩浆中富含的水来自何方?有待进一步揭秘。

长白山天池火山岩千年喷发的碱流岩中的锆石 U-Th 等时线年龄是 0.7~1.0 万年。腾冲马鞍山的锆石表面 U-Th 等时线年龄是 5.5 万年而锆石内部年龄是 9 万年^[25]。锆石年龄可能表明,相对于腾冲马鞍山的小喷发,大喷发的长白山天池火山岩浆滞留年龄短,是否与其位于更浅的地壳岩浆房和强烈的结晶分异作用导致岩浆中更富含水和挥发份有关,很短的滞留时间也支持岩浆混合触发机制^[4],表明天池火山的危险性,其喷发机制有待进一步探索。

2 大火成岩省

大火成岩省(LIP)一直是国际地学界研究的热点,自峨眉山大火成岩省被确定以来,我国近 10 年在大火成岩省研究方面取得了重要进展,不仅对峨眉山大火成岩省的研究取得了许多重要成果,还确定了一些新的大火成岩省,并逐渐为国际地学界所接受,如塔里木和西藏措美等。

2.1 峨眉山大火成岩省

峨眉山大火成岩省的研究程度最高,目前基本查明其岩石组合特征、岩浆性质、火山喷发的时空分布特征等,并对溢流玄武岩及其相关的侵入岩的形成机制、大火成岩省与地幔柱的关系以及其与生物绝灭的关系进行了深入探讨,取得了许多重要成果,在国际上产生了广泛影响(如在国际知名的岩石学刊物上出版专辑, *Lithos*, 2010, vol. 119, No. 1-2)。当然,也存在一些重要的科学问题有待解决。

2.1.1 喷发时间 近年来对峨眉山大火成岩省的各类岩石进行了大量的同位素测年工作,结果表明,其变化范围很宽:251~263 Ma。其中对火山岩的测定结果为 251~263 Ma,层状镁铁-超镁铁质岩体的年龄大致在 254~263 Ma,岩墙的年龄为 262~242 Ma。一些碱性岩体则相对较为年轻,大多为早三叠世^[29]。范蔚茗等^[30]认为该火成岩省的大规模快速喷发发生在 253~256 Ma,251~253 Ma 的中酸性岩石代表了该火成岩事件的晚期产物。Shell-

nutt 等^[31]认为,260 Ma 左右代表了地幔柱活动时间,而 252 Ma 可能是镁铁质岩浆底侵作用时期,而晚期的 242 Ma 则是华南和华北板块碰撞后松弛阶段的产物。由此可见,峨眉山大火成岩省岩浆活动的结束时间有待进一步厘定,与其时代接近的西伯利亚大火成岩省相比,其变化范围较宽的年龄到底是火山作用本身造成的,还是同位素年龄测定误差造成的,目前尚不清楚。西伯利亚大火成岩省已有很精确的年龄结果,其同位素数据主要是 Ar/Ar 方法测定的,但是该方法似乎不太适合于峨眉山大火成岩省,因为受中生代热事件的扰动较大^[32]。

2.1.2 空间分布 有关峨眉山大火成岩省的分布范围,目前基本达成一致认识:西界为哀牢山—红河断裂,西北界则为龙门山—小菁河断裂,但是对于分布面积的具体数据尚无定论,一般认为在 $(2.5 \sim 3.0) \times 10^5 \text{ km}^2$ 之间。但是钻孔发现其东南部和东北部也有隐伏的玄武岩,说明峨眉山玄武岩省的初始覆盖面积可能远大于现在的残留面积。近年来有学者认为越南西北部的 Song Da 地区的二叠纪玄武岩(Rb-Sr 等时线年龄为 $257 \pm 24 \text{ Ma}$ ^[33])就是印支板块沿哀牢山—红河断裂带的大规模侧向挤出的结果^[34~36]。但是张招崇^[29]基于该地区的一些地球化学数据认为,该地区的二叠纪玄武岩和峨眉山玄武岩并不存在成因联系。由此看来,峨眉山大火成岩省真正的分布范围也有待于进一步厘定。

2.1.3 高钛和低钛玄武岩的成因 峨眉山玄武岩和其它大火成岩省一样,其 TiO_2 变化范围很宽,质量分数基本上为 1%~5%,但是否可以将其划分为高钛玄武岩和低钛玄武岩两种类型及其不同的成因仍然是值得进一步探讨的问题^[37]。由于 TiO_2 含量的变化是连续的,按某一含量作为界线明显带有主观因素。尽管如此,不同学者仍然根据 TiO_2 或 Ti/Y 比值将其划分为两种类型。由于 TiO_2 和 P_2O_5 具有明显的正相关,所以 Zhang & Wang^[38]将其分为高 Ti 高 P 型和低 Ti 低 P 型;李杰等^[39]以 Ti/Y 比值 520 为界限将木里苦橄岩划分为高钛型和低钛型;而 Xu 等^[40]根据 Ti/Y 比值 500 以及 TiO_2 含量高于 2.5%为界限将峨眉山玄武岩划分为高钛和低钛玄武岩,但该标准似乎不太适合于峨眉山大火成岩省的其它剖面,如丽江地区的大具剖面,所有玄武岩的 Ti/Y 比值均大于 500,而它们绝大多数的 TiO_2 含量低于 2.5%^[41]。

另一方面,有关高钛和低钛玄武岩的成因也存在诸多不同认识。Xu 等^[40]认为低钛玄武岩是地幔柱在浅部(<60 km)高程度部分熔融(16%)形成

的,而高钛玄武岩则是地幔柱在相对深部低部分熔融形成的;Xu等^[42]通过 Re-Os 同位素研究得出,低钛玄武岩主要来自地幔柱,而高钛玄武岩则主要来自大陆岩石圈地幔或者是地幔柱熔体被大量岩石圈地幔所混染。李杰等^[39]通过对木里地区苦橄岩的 Re-Os 同位素研究则得出了完全相反的结论:高 Ti/Y 型苦橄岩直接来源于一个地幔柱源区;低 Ti/Y 型苦橄岩则可能主要来自于大陆岩石圈地幔。郝艳丽等^[43]根据岩相学和主要元素变化特征认为,高钛和低钛玄武岩是分离结晶作用的结果。张招崇^[29]的研究发现,高钛玄武岩均存在大量的磁铁矿,有的甚至可达 5%~10%,而低钛玄武岩的磁铁矿含量往往较低,认为铁钛氧化物的分离结晶作用或堆积作用对 Ti/Y 比值产生明显影响,该比值并不能完全反映源区的特征。由此可见有关低钛和高钛玄武岩的划分以及其成因尚有待进一步探索。

2.1.4 层状岩体与溢流玄武岩以及成矿作用的关系 峨眉山大火成岩省内存在近南北走向的一系列层状镁铁-超镁铁质岩体,它们在时空上与峨眉山玄武岩有密切联系。按照岩石组合和成矿特征,大致可以分为两种类型:一是与辉长质岩石有关的岩体,此类岩体规模一般较大,含钕钛磁铁矿矿床;另一类是以超镁铁质岩石为主,其规模一般较小,含铜镍硫化物(铂族元素)矿床。多数学者认为,前一类岩体与区域上的高钛玄武岩有关,而后一类岩体则与低钛玄武岩有关^[44]。但是 Tao^[45]根据含铜镍硫化物矿床的力马河岩体的 $Ti/Y > 500$,认为与高钛玄武岩有关。Zhang^[46]从相平衡的角度提出含钕钛磁铁矿的岩体不可能由高钛玄武岩演化而成,而含铜镍硫化物的岩体可以通过 SiO_2 不饱和的苦橄质岩浆演化而成。

另一方面,峨眉山大火成岩省在成矿特征上明显不同于与其时代相近的西伯利亚大火成岩省,前者产出世界级的钕钛磁铁矿床,而后者则产出世界级的铜镍硫化物-铂族元素矿床。由此也就产生了这样一个问题,即峨眉山大火成岩省是否有可能发现类似 Noril'sk 型的超大型铜镍硫化物-铂族元素矿床?还是由于地质背景不同(如峨眉山大火成岩省不存在 Noril'sk 地区的膏盐层,而膏盐层则被认为是使岩浆中硫饱和的关键因素)本身就不可能形成此类大型矿床?

2.1.5 与生物大规模绝灭的关系 很多学者基于大火成岩省与生物大规模绝灭在时间上吻合的特点认为,大火成岩省导致了生物的大规模绝灭^[47~49]。在我国华南地区的二叠纪-三叠纪边界,普遍存在

中酸性的火山灰,这些火山灰普遍被认为来自于峨眉山大火成岩省^[34,50,51]。然而,近年来对峨眉山大火成岩省的喷发时间的准确厘定无疑指示了其形成于中-晚二叠世边界,因而在时间上和中二叠世的 *Guadalupian* 生物灭绝时间末期吻合,最近对贵州东部峨眉山玄武岩系中沉积夹层的碳同位素研究也进一步支持了这个结论^[52],所以目前大家基本上都认为两者存在成因联系^[34,47,48,50,53]。但是对于导致生物绝灭的具体原因尚不清楚,是重金属或者火山喷发释放出的有毒气体导致生物中毒还是爆发形成的火山灰或者释放出的气体导致环境的突然变化(气温升高或降低)造成的。Wignall^[47]认为,由于火山喷发,导致了海平面的上升,导致生物的大规模绝灭。然而,在峨眉山大火成岩省西部,如丽江一带,在峨眉山玄武岩喷发结束后的三叠纪依然出现海相的碳酸盐岩,表明火山喷发并没有导致海平面的上升成为陆地。另外,现代火山观察表明,大量的火山灰可以停留在平流层阻挡太阳光而导致温度的突然降低,但是对于峨眉山大火成岩省的研究表明,并没有存在厚的火山灰,只是在宾川剖面底部以及盐源百林山地区玄武岩夹层中观察到厚约 0.5 m 的火山灰,并没有出现西伯利亚大火成岩省那样存在 15~25 m 厚的粗粒中酸性火山灰层^[54]。所以此种机制的可能性似乎不大。因此峨眉山玄武岩的喷发与 *Guadalupian* 生物灭绝之间的内在联系尚有待进一步探索。

2.1.6 与地幔柱的关系 大火成岩省与地幔柱的关系一直存在着争论。峨眉山大火成岩省是不是地幔柱作用的结果也一直存在着争论,但是近年来多数学者支持地幔柱的观点,重要的证据有很多,如大规模火山作用前的地壳抬升、高温、地球物理和化学成分特征等,但是最重要的证据为喷发前地壳的公里级隆升和高温苦橄岩的发现。根据理论模型,地幔柱上升对刚性的岩石圈发生撞击,导致地表的隆升幅度在 500 m 以上。Xu 等^[55]和 He 等^[56]根据对峨眉山玄武岩下伏的茅口组灰岩的厚度进行了研究,暗示峨眉山玄武岩喷发前地壳的隆升幅度在 1000 m 以上,从而为地幔柱的存在提供了一个重要证据。但是最近 Peate & Bryan^[57]对 He^[56]和 Xu^[55]认为隆起幅度最大的大桥剖面的火山碎屑岩和宾川剖面的枕状熔岩研究后认为,并不存在公里级的隆起。另一方面,由于地幔柱来自于深部(上下地幔边界或核幔边界),具有极高的温度(至少大于正常软流圈地幔温度 300℃),理论上应该存在代表高温条件下产物的高镁火山岩——苦橄岩或科马提

岩。然而由于这种高镁的火山岩密度大很难上升到地表,所以在自然界中非常稀少,目前并没有在所有的 LIP 中发现这种高镁火山岩。而且,自然界并不是所有的苦橄岩或科马提岩都是高温条件下的产物,有些可能是堆晶作用形成的^[58]。Zhang 等^[41]利用橄榄石-熔体平衡原理恢复了原始岩浆成分,证明了部分苦橄岩代表了原始岩浆的成分,在此基础上,利用不同的方法估算了其形成温度在 1600 °C,这样就从另一方面为峨眉山地幔柱的存在提供了一个关键证据。李宏博等^[59]通过基于过去的 1:20 万区域地质资料,恢复了二叠纪基性岩墙的分布特点,发现其具有放射状的分布特点,收敛位置和 He 等^[56]的位置基本一致,从而为地幔柱的存在提供了又一个重要证据。

然而,最近苦橄岩的 Os 同位素数据却为峨眉山地幔柱的存在带来了挑战,近年发表的地幔柱融融产物的苦橄岩并没有显示¹⁸⁷Os 富集迹象[其 γ Os(t) 为 $-0.4 \sim -2.4$]^[60,61],史仁灯等^[62]据此认为,岩浆来自于亏损的岩石圈地幔,玄武岩中 Os 同位素的富集是地壳混染的结果,并且认为峨眉山大火成岩省并没有象其它大火成岩省那样具有短时间内的巨量喷发现象也说明其与地幔柱无关。但是值得注意的是,如果地幔柱不是起源于核-幔边界,而是起源于上-下地幔边界,那么就有可能没有¹⁸⁷Os 富集的地球化学信号^[61]。

另外,即使都承认峨眉山大火成岩省和地幔柱有关,有关其模型也还存在着一些矛盾之处,比如按照地幔柱的模型,苦橄岩应产于地幔柱的中心位置,因为苦橄岩的数量随温度由地幔柱中心向两侧降低^[63]。同时地幔柱的中心应该是地表隆升幅度最大,但是峨眉山大火成岩省苦橄岩的产出位置并不与地表隆升幅度最大的位置吻合,而明显偏西,其原因有待进一步探索(如是否在地幔柱的中心区域高温的苦橄岩没有上升到地表?)。

除上述问题外,还有一些问题也未得到很好的答案,如火山喷发迁移的轨迹如何?它与塔里木二叠纪玄武岩的关系如何?

2.2 塔里木大火成岩省

塔里木大火成岩省最早由浙江大学陈汉林等^[64]的研究团队提出,认为在塔里木盆地内部存在一条二叠纪基性岩带,该基性岩带包含有玄武岩、辉绿岩和其他基性侵入岩,它们的同位素年代为 260 ~ 292 Ma,这些岩石的地球化学性质具有板内岩浆的特点。随后,有许多学者提出塔里木是一个二叠纪大火成岩省^[65~67]。最近几年来,塔里木大火成岩

省取得了许多重要成果,基本查明了其时空分布特征,岩石组合以及岩浆性质等,并对岩石成因及其深部动力学背景进行了深入探讨。

Yang^[68]估算了塔里木盆地内的玄武岩面积超过 25 万 km²,最厚达 3 km;最近刘晓等^[69]利用塔里木油田的大量勘探资料,通过野外露头、钻井、测井、2D 地震资料的综合研究,确定了塔里木盆地内二叠系火山岩的地震反射特征,建立了火山岩测井-地震综合识别模式,在此基础上计算得出:盆地内二叠系残余玄武岩覆盖面积约为 2.46×10^5 km²,盆地内二叠系残余流纹岩覆盖面积约为 4.04×10^4 km²。认为由于盆地内北部和东部二叠系大范围缺失,二叠系火山岩原始喷发面积和喷出量可能远大于残余量。估计结果基本和 Yang 的一致,同时也说明其规模和峨眉山大火成岩省接近,但酸性岩浆的数量远较峨眉山大火成岩省大。

目前对于塔里木二叠纪各类岩浆岩的年龄进行了大量测定,取得许多高精度的年龄数据^[70~77],基本限制了各类岩石的形成时代。陈咪咪等^[78]对此进行了系统总结,认为整个塔里木大火成岩省岩浆作用的持续时间约为 20 Ma,其中主体玄武岩喷发的时代为 291~287 Ma,283~272 Ma 是各类侵入岩的主要形成时期,但规模较小。这一点也说明塔里木大火成岩省在形成时间上基本与其他大火成岩省一致,即短时间内的巨量喷发(<5 Ma),但持续时间长。

已有的研究表明,该区的岩石组合相比其他大火成岩省复杂,有玄武岩、火山碎屑岩、层状镁铁-超镁铁质岩体、辉绿岩、火成碳酸岩、角砾状似金伯利岩岩筒、碱性侵入岩(霓霞正长岩)以及其他的中酸性脉岩等。与峨眉山大火成岩省相似的是在镁铁-超镁铁质岩体中赋存有钒钛磁铁矿,但迄今为止没有发现如西伯利亚和峨眉山大火成岩省中发现的铜镍硫化物铂族元素矿床。尽管有学者将东天山和阿尔泰地区同时代(~280 Ma)的铜镍硫化物一起归为塔里木-天山大火成岩省^[73],但并没有被普遍认可。值得注意的是,目前对该地区玄武岩的地球化学研究表明,玄武岩均为碱性玄武岩,而不是拉斑玄武岩^[76,79],这与其他大火成岩省存在很大区别。因为只有粘度低的拉斑玄武岩才能形成大面积的熔岩流,而粘度高的碱性玄武岩的不利于流动。因此,有必要对岩浆的性质做进一步研究,特别是加强矿物学特征的研究对于厘定岩浆系列具有重要意义(目前主要从化学成分的角度)。

有关岩浆成因及其深部动力学背景问题,绝大

多数学者鉴于其岩浆规模大,认为其与大火成岩省一样,是地幔柱作用的产物,各类岩石的形成均为地幔柱和岩石圈相互作用的产物^[79]。但是目前尚没有找到地幔柱方面的重要证据(如高温苦橄岩、喷发前的地壳大规模隆升以及放射状岩墙等)。所谓的证据主要是从地球化学的角度(与 OIB 的地球化学特征的相似性),而地球化学因其多解性故不是一个可靠的证据。

综上所述,塔里木大火成岩省虽然取得了大量进展,但尚有一些重要的科学问题有待进一步解决:(1)在年龄测定方面,尽管进行了大量的测试,基本查明了不同岩石类型的时间跨度,但是在空间上有没有类似于夏威夷岛链那样的迁移轨迹尚不清楚。(2)大面积的玄武岩到底是以拉斑玄武岩系列为主还是以碱性玄武岩为主?(3)含钕钛磁铁矿的镁铁超镁铁质岩体与区域上的玄武岩的关系以及成矿潜力如何?该区有没有可能存在铜镍硫化物矿床?(4)岩浆的形成是与地幔柱作用有关还是软流圈的上涌减压熔融有关?

2.3 措美大火成岩省

最近的研究表明,藏南存在 132 Ma 的大火成岩省,主要分布在特提斯喜马拉雅东部,由浪卡子-拉康村-错那-隆子-琼结等围限的椭圆形区域,覆盖面积约 40000 km²。由于该地区受新生代印度-欧亚板块的碰撞作用导致地壳的缩短,其形成时的实际面积很可能超过 100 000 km²^[80~82]。Zhu 等^[80]认为澳大利亚南西部的 Bunbury 玄武岩为同时代作用的产物,所以将两者联系在一起命名为 Comei-Bunbury 大火成岩省,是 Kerguelen 地幔柱早期活动的产物,是该地幔柱的活动导致了大陆的裂解,从而使其发生裂开,成为深位侵蚀的 Comei-Bunbury 大火成岩省的残余。然而,应当指出的是,该地区的研究程度总体较低,有许多的基础地质问题尚待进一步解决,包括其是否属于大火成岩省等。

总之,近年来,我国大火成岩省的研究取得了飞速进展,特别是峨眉山大火成岩省的研究成果令世界所瞩目,尽管如此,其地幔柱模型尚有待进一步完善。塔里木地区目前急需解决的是要确定其是否为大火成岩省,进而寻找地幔柱的关键证据;而对于剥蚀程度高、研究程度极低的措美地区需要进行基础地质工作(如岩石组合及其时空分布特征等)。

参考文献 (References):

- [1] Liu R X, Fan Q C, Zheng X S, Zhang M, Li N. The magma evolution of Tianchi volcano, Changbaishan[J]. Science in China, 1998, 382—389.
- [2] 樊祺诚, 隋建立, 王团华, 李霓, 孙谦. 长白山天池火山粗面玄武岩的喷发历史与演化[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1449—1457.
Fan Qicheng, Sui Jianli, Wang Tuanhua, Li Ni, Sun Qian. Eruption history and magma evolution of the trachybasalt in the Tianchi Volcano, Changbaishan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(6): 1449—1457. (in Chinese with English abstract)
- [3] 汤吉, 赵国泽, 王继军, 詹艳, 邓前辉, 陈小斌. 基于地下电性结构探讨中国东北活动火山形成机制[J]. 岩石学报, 2006, 22(6): 1503—1510.
Tang Ji, Zhao Guoze, Wang Jijun, Zhan Yan, Deng Qianhui, Chen Xiaobin. A study of the formation mechanism for volcanism in Northeast China based on deep electric structure[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(6): 1503—1510. (in Chinese with English abstract)
- [4] 樊祺诚, 隋建立, 孙谦, 李霓, 王团华. 天池火山千年大喷发的岩浆混合作用与喷发机制初步探讨[J]. 岩石学报, 2005, 21(6): 1703—1708.
Fan Qicheng, Sui Jianli, Sun Qian, Li Ni. Preliminary research of magma mixing and explosive mechanism of the Millennium eruption of Tianchi volcano[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(6): 1703—1708. (in Chinese with English abstract)
- [5] 樊祺诚, 隋建立, 李霓, 孙谦, 徐义刚. 长白山天池火山双岩浆房岩浆作用与互动式喷发[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(4): 315—318.
Fan Qicheng, Sui Jianli, Li Ni, Sun Qian, Xu Yigang. Magma reaction and interacted eruptions of the two magma chambers in Tianchi Volcano, Changbaishan[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2007, 26(4): 315—318. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张招崇, 李兆鼎, 李树才. 黑龙江镜泊湖地区全新世火山岩的¹⁴C 测年及其源区特点探讨[J]. 地质学报, 2000, 74(3): 279—286.
Zhang Zhaochong, Li Zhaonai, Li Shucai. ¹⁴C dating of Holocene volcanic rocks in Jingpo Lake region, Helongjiang province and investigation of its source character[J]. Geologica Sinica, 2000, 74(3): 279—286. (in Chinese with English abstract)
- [7] 樊祺诚, 孙谦, 李霓, 尹金辉, 陈洪洲, 高峰, 张锡杰. 镜泊湖全新世火山空降碎屑剖面 and 喷发历史[J]. 地震地质, 2003, 25(增刊): 3—11.
Fan Qicheng, Sun Qian, Li Ni, Yin Jinhui, Chen Hongzhou, Gao Feng, Zhang Xijie. The section of airfall clastic rock and ¹⁴C Dating of Holocene Volcano in Jingpohu Regions and discussion on its eruptive history[J]. Seismology and Geology, 2003, 25(suppl.): 3—11. (in Chinese with English abstract)
- [8] Fan Q C, Sun Q, Li N, Wang T H. Holocene volcanic rocks in Jingpo Lake region-Diversity of magmatism[J]. Progress in Natural Science, 2006, 16(1): 65—71.
- [9] 白志达, 田明中, 武法东, 徐德兵, 李团结. 焰山、高山—内蒙古阿尔山火山群中的两座活火山[J]. 中国地震, 2005, 21

- (1): 113—117.
Bai Zhida, Tian Mingzhong, Wu Fadong, Xu Debin, Li Tuanjie. Yanshan and Gaoshan—Two Active Volcanoes of the Volcanic Cluster of Arshan, Inner Mongolian[J]. Earthquake Research in China, 2005, 21:113—117. (in Chinese with English abstract)
- [10] 赵勇伟, 樊祺诚, 白志达, 孙谦, 李霓, 隋建立, 杜星星. 大兴安岭哈拉哈河—绰尔河地区第四纪火山活动初步研究[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2569—2575.
Zhao Yongwei, Fan Qicheng, Bai Zhida, Sun Qian, Li Ni, Sui Jianli, Du Xingxing. Preliminary study on Quaternary volcanoes in the Halaha River and Chaoer River area in Daxing'an Mountain range[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(11): 2569—2575. (in Chinese with English abstract)
- [11] 樊祺诚, 赵勇伟, 李大明, 武颖, 隋建立, 郑德文. 大兴安岭哈拉哈河—绰尔河第四纪火山分期: K-Ar 年代学与火山地质特征[J]. 岩石学报, 2011, 27(10): 2827—2832.
Fan Qicheng, Zhao Yongwei, Li Daming, Wu ying, Sui Jianli, Zheng Dewen. Studies on Quaternary volcanism stages of Halaha River and Chaoer River area in the Great Xing'an Range: Evidence from K-Ar dating and volcanic geology features[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(10): 2827—2832. (in Chinese with English abstract)
- [12] 赵勇伟, 樊祺诚. 大兴安岭焰山、高山火山——一种新的火山喷发型式[J]. 地震地质, 2010, 32(1): 28—37.
Zhao Yongwei, Fan Qicheng. Yanshan and Gaoshan volcanoes in the Daxing'an Mountain Range—A new eruption style [J]. 2010, 32(1): 28—37. (in Chinese with English abstract)
- [13] 樊祺诚, 隋建立, 赵勇伟, 孙谦, 李霓, 杜星星. 大兴安岭中部第四纪火山岩中石榴石橄榄岩捕虏体的初步研究[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2563—2568.
Fan Qicheng, Sui Jianli, Zhao Yongwei, Sun Qian, Li Ni, Du Xingxing. Preliminary study on garnet peridotite xenolith of Quaternary volcanic rocks in middle Daxing'an Mountain Range[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(11): 2563—2568. (in Chinese with English abstract)
- [14] 白志达, 王剑民, 许桂玲, 刘磊, 徐德斌. 内蒙古察哈尔右翼后旗乌兰哈达第四纪火山群[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2585—2594.
Bai Zhida, Wang Jianmin, Xu Guiling, Liu Lei. Quaternary volcano cluster of Wulanada, Right-back-banner, Chahaer, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica. 2008, 24(11): 2585—2594. (in Chinese with English abstract)
- [15] 樊祺诚, 孙谦, 李霓, 隋建立. 琼北火山活动分期与全新世岩浆演化[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 533—544.
Fan Qicheng, Sun Qian, Li Ni, Sui Jianli. Periods of volcanic activity and magma evolution of Holocene in North Hainan Island[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 533—544. (in Chinese with English abstract)
- [16] Green D H, Ringwood A E. The genesis of basaltic magmas [J]. Contrib. Miner. Petrol., 1967, 15(2):103—190.
- [17] 樊祺诚, 孙谦, 王旭龙, 尹功明, 龙安明, 尹克坚. 北部湾涠洲岛南湾火山砂岩捕虏体光释光(OSL)测年结果[J]. 地震地质, 2006, 28(1):139—141.
Fan Qicheng, Sun Qian, Wang Xulong, Yin Gongming, Long Anming, Yin Kejian. OSL dating of a sandstone xenolith in the volcanic rocks of the Nanwan Volcano, Weizhou Island (Northern Gulf)[J]. Seismology and Geology, 2006, 28(1):139—141. (in Chinese with English abstract)
- [18] 樊祺诚, 孙谦, 龙安明, 尹克坚, 隋建立, 李霓, 王团华. 北部湾涠洲岛及斜阳岛火山地质与喷发历史研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(6):1529—1537.
Fan Qiheng, Sun Qian, Long Anming, Yin Kejian, Sui Jianli, Li Ni, Wang Tuanhua. Geology and eruption history of volcanoes in Weizhou Island and Xieyang Island, Northern Bay[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(6):1529—1537. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王非, 陈文寄, 彭子成, 张仲禄, 胡玉台. 腾冲、长白山年轻火山岩铀系不平衡 TIMS 法年代学研究. 1999. 地质论评, 45(suppl.): 914—925.
Wang Fei, Chen Wenji, Peng Zicheng, Zhang Zhonglu, Hu Yutai. Chronology of young volcanic rocks of Changbaishan Tianchi and Tengchong, China, by Using the Uranium-series TIMS method[J]. Geological Review, 1999, 45: 914—925. (in Chinese with English abstract)
- [20] 樊祺诚, 刘若新, 魏海泉. 腾冲活火山的岩浆演化[J]. 地质论评, 1999, 45: 895—904.
Fan Qicheng, Liu Ruoxin, Wei Haiquan. The magmatic evolution of the active volcano in the Tengchong Area[J]. Geological Review, 1999, 45: 895—904. (in Chinese with English abstract)
- [21] 赵勇伟, 樊祺诚. 腾冲马鞍山、打鹰山、黑空山火山岩浆来源与演化[J]. 岩石学报, 2009, 26(4): 1133—1140.
Zhao Yongwei, Fan Qicheng. Magma origin and evolution of Maanshan volcano, Dayingshan volcano and Heikongshan volcano in Tengchong area [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 26(4):1133—1140. (in Chinese with English abstract)
- [22] Zou H B, Reid M R, Liu Y S, Yao Y P, Xu X S, Fan Q C. Constraints on the origin of historic potassic basalts from northeast China by U-Th disequilibrium data [J]. Chem. Geol., 2003, 200: 189—201.
- [23] Zou H B, Fan Q C, Yao Y P. U-Th systematics of dispersed young volcanoes in NE China: Asthenosphere upwelling caused by piling up and upward thickening of stagnant Pacific slab[J]. Chem. Geol., 2008, 255: 134—142.
- [24] Zou H B, Fan Q C, Zhang H F. Rapid development of the great Millennium eruption of Changbaishan (Tianchi) Volcano, China/North Korea: Evidence from U-Th zircon dating [J]. Lithos, 2010, 119: 289—296.
- [25] Zou H B, Fan Q C, Schmitt A K, Sui J L. U-Th dating of zircons from Holocene potassi andesites (Maanshan volcano, Tengchong, SE Tibetan Plateau) by depth profiling: Time scales and nature of magma storage[J]. Lithos, 2010, 118: 202—210.
- [26] Zou H B, Fan Q C. U-Th isotopes in Hainan basalts: Im-

- cations for sub-asthenospheric origin of EM2 mantle endmember and the dynamics of melting beneath Hainan Island[J]. *Lithos*, 2010, 116: 145–152.
- [27] Simon J I, Renne P R, Mundil R. Implications of pre-eruptive magmatic histories of zircons for U-Pb geochronology of silicic extrusions[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008, 266: 182–194.
- [28] Chen Y, Zhang Y X, Graham D, Su S G, Deng J F. Geochemistry of Cenozoic basalts and mantle xenoliths in North-east China[J]. *Lithos*, 2007, 96:108–126.
- [29] 张招崇. 关于峨眉山大火成岩省一些重要问题的讨论[J]. *中国地质*, 2009, 36(3): 634–646.
Zhang Zhaochong. A discussion on some important problems concerning the Emeishan large igneous province[J]. *Geology in China*, 2009, 36(3): 634–646. (in Chinese with English abstract)
- [30] 范蔚茗, 王岳军, 彭头平. 桂西晚古生代玄武岩 Ar-Ar 和 U-Pb 年代学及其对峨眉山玄武岩省喷发时代的约束[J]. *科学通报*, 2004, 49: 1892–1900.
Fan Weiming, Wang Yuejun, Peng Touping. Ar-Ar and U-Pb geochronology of Late Paleozoic basalts in western Guangxi and its constraints on the eruption age of Emeishan basalt magmatism[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49: 1892–1900. (in Chinese with English abstract)
- [31] Shellnutt J G, Zhou M F, Yan D P. Longevity of the Permian Emeishan mantle plume (SW China): 1Ma, 8Ma or 18Ma ?[J]. *Geological Magazine*, 2008, 145: 373–388.
- [32] Ali J R, Thompson G M, Zhou M, Song Y. Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Lithos*, 2005, 79: 475–489.
- [33] Polyakov G V, Balykin P A, Tran T H. Evolution of the Mesozoic-Cenozoic magmatism in the Song Da rift and its contouring structures(northwestern Vietnam)[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 1998, 39: 695–706. (in Russian)
- [34] Chung S L, Jahn B M, Wu G Y. The emeishan flood basalt in SW China: A mantle plume initiation model and its connection with continental breakup and mass extinction at the Permian-Triassic boundary/Flower M F J, Chung S L, Lo CH, et al (eds.). *Mantle Dynamics and Plate Tectonics in East Asia*[M]. AGU Geodynamics Series, 1998, 27: 47–58.
- [35] Hanski E, Walker R J, Huhma H. Origin of permian-triassic komatiites, northwestern Vietnam[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004, 147: 453–469.
- [36] 徐义刚, 何斌, 黄小龙, 罗震宇, 朱丹, 马金龙, 邵辉. 地幔柱大辩论及如何验证地幔柱假说[J]. *地学前缘*, 2007, 14: 1–9.
Xu Yiyang, He Bin, Huang Xiaolong, Luo Zhenyu, Zhu Dan, Ma Jinlong, Shao Hui. The debate over mantle plumes and how to test the plume hypothesis[J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14:1–9. (in Chinese with English abstract)
- [37] He Q, Xiao L, Balta B. Variety and complexity of the Late-Permian Emeishan basalts: Reappraisal of plume-lithosphere interaction processes[J]. *Lithos*, 2010, 119: 91–107.
- [38] Zhang Z C, Wang F S. Geochemistry of the two types of basalts of the Emeishan Basaltic Province: Evidences for mantle plume-lithosphere interaction [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(2): 138–147.
- [39] 李杰, 许继峰, 何斌. 青藏高原东南木里地区二叠纪苦橄岩的 Os-Sr-Nd 同位素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 337–347.
Li Jie, Xu Jifeng, He Bin. Sr-Nd-Os isotope geochemistry of Permian picrites from Muli area, southeast Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(2): 337–347. (in Chinese with English abstract)
- [40] Xu Y, Chung S, Jahn B. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southern China[J]. *Lithos*, 2001, 58: 145–168.
- [41] Zhang Z C, Mahoney J J, Mao J W. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province[J]. *China Journal of Petrology*, 2006, 47: 1997–2019.
- [42] Xu J F, Suzuki K, Xu Y G. Os, Pb, and Nd isotope geochemistry of the Permian Emeishan continental flood basalts: Insights into the source of a large igneous province [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71: 2104–2119.
- [43] 郝艳丽, 张招崇, 王福生. 峨眉山大火成岩省高钛和低钛玄武岩成因探讨[J]. *地质论评*, 2004, 50: 587–592.
Hao Yanli, Zhang Zhaochong, Wang Fusheng. Petrogenesis of High-Ti and Low-Ti Basalts from the Emeishan Large Igneous Province[J]. *Geological Review*, 2004, 50: 587–592. (in Chinese with English abstract)
- [44] Zhou M F, Arndt N T, Malpas J, Wang C Y, Kennedy A. Two magma series and associated ore deposit types in the Permian Emeishan large igneous province, SW China[J]. *Lithos*, 2008, 103: 352–368.
- [45] Tao Y, Li C, Song X, et al. Mineralogical, petrological and geochemical studies of the Limahe mafic-ultramafic intrusion and the associated Ni-Cu sulfide ores, SW China[J]. *Mineralium Deposita*, 2008, 43: 849–872.
- [46] Zhang Z C, Hao Y L, Ai Y. Phase equilibria constraints on relations of ore-bearing intrusions with flood basalts in the Pan-Xi Region, SW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83: 295–309.
- [47] Wignall P B. Large igneous provinces and mass extinctions [J]. *Earth Science Reviews*, 2001, 53: 1–33.
- [48] Wignall P B. The link between large igneous province eruptions and mass extinctions[J]. *Elements*, 2005, 1: 293–297.
- [49] Ali J R, Thompson G M, Song X Y. Emeishan basalts (SW China) and the ‘end-Guadalupian’ crisis[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 2002, 159: 21–29.
- [50] Yin H F, Huang S, Zhang K. The effects of volcanism on the Permo-Triassic mass extinction in South China//Sweet W C (ed.). *Permo-Triassic Events in the Eastern Tethys*[M]. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1992: 146–157.

- [51] Chung S L, Jahn B. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary[J]. *Geology*, 1995, 23: 889—893.
- [52] Wignall P B, Sun Y D, David P G. Volcanism, mass extinction, and carbon isotope fluctuations in the Middle Permian of China[J]. *Science*, 2009, 342(29): 1179—1182.
- [53] Zhou M F, Malpas J, Song X Y. A temporal link between the Emeishan Large Igneous Province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, 196: 113—122.
- [54] Kozur H W. Some aspects of the Permian-Triassic boundary PTB and of the possible causes for the biotic crisis around this boundary[J]. *Palaeogeogr.*, *Palaeoclimatol.*, *Palaeoecol.*, 1998, 143: 227—272.
- [55] Xu Y, He B, Chung S L. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province[J]. *Geology*, 2004, 32: 917—920.
- [56] He B, Xu Y, Xiao L. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer-scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 213: 391—405.
- [57] Peate I U, Bryan S E. Re-evaluating plume-induced uplift in the Emeishan large igneous province[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(9): 625—629.
- [58] Anderson D L. Large igneous provinces, delamination and fertile mantles[J]. *Elements*, 2005, 1: 271—275.
- [59] 李宏博, 张招崇, 吕林素. 峨眉山大火成岩省基性岩墙群几何学研究及其对地幔柱中心的指示意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(10): 3142—3152.
- Li Hongbo, Zhang Zhaochong, Lv Linsu. Geometry of the mafic dyke swarms in Emeishan large igneous province: Implications for mantle plume[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(10): 3142—3152. (in Chinese with English abstract)
- [60] 陈雷, 支霞臣, 张招崇. 云南丽江苦橄岩 Re-Os 同位素地球化学初步研究[J]. *高校地质学报*, 2007, 13: 337—343.
- Chen Lei, Zhi Xiacheng, Zhang Zhaochong. Preliminary study on Re-Os isotope geochemistry of picrites from Lijiang Area, Yunnan Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13: 337—343. (in Chinese with English abstract)
- [61] Zhang Z C, Zhi X C, Chen L. Re-Os isotopic compositions of picrites from the Emeishan flood basalt province, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 276: 30—39.
- [62] 史仁灯, 郝艳丽, 黄启帅. 峨眉山大火成岩省壳幔相互作用的 Re-Os 同位素证据及成因构造背景探讨[J]. *岩石学报*, 2008, 24(11): 2515—2523.
- Shi Rendeng, Hao Yanli, Huang Qishuai. Comment on Re-Os isotopes constrain the formation of the Emeishan Large Igneous Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(11): 2515—2523. (in Chinese with English abstract)
- [63] Campbell I H. Large igneous provinces and the mantle plume hypothesis[J]. *Elements*, 2005, 1: 265—269.
- [64] 陈汉林, 杨树峰, 董传万. 塔里木盆地二叠纪基性岩带的确定及其大地构造意义[J]. *地球化学*, 1997, 26(6): 77—87.
- Chen Hanlin, Yang Shufeng, Dong Chuanwan. Confirmation of permian basite zone in tarim basin and its tectonic significance[J]. *Geochimica*, 1997, 26(6): 77—87. (in Chinese with English abstract)
- [65] 余星, 陈汉林, 杨树峰. 塔里木盆地二叠纪玄武岩的地球化学特征及其与峨眉山大火成岩省的对比[J]. *岩石学报*, 2009, 25(6): 1492—1498.
- Yu Xing, Chen Hanlin, Yang Shufeng. Geochemical features of Permian basalts in Tarim Basin and compared with Emeishan LIP[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(6): 1492—1498. (in Chinese with English abstract)
- [66] 陈汉林, 杨树峰, 厉子龙. 塔里木盆地二叠纪大火成岩省发育的时空特点[J]. *新疆石油地质*, 2009, 30(2): 179—182.
- Chen Hanlin, Yang Shufeng, Li Zilong. Spatial and temporal characteristics of Permian Large Igneous Province in Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2009, 30(2): 179—182. (in Chinese with English abstract)
- [67] 张传林, 周刚, 王洪燕. 塔里木和中亚造山带西段二叠纪大火成岩省的两类地幔源区[J]. *地质通报*, 2010, 29(6): 779—794.
- Zhang Chuanlin, Zhou Gang, Wang Hongyan. A review on two types of mantle domains of the Permian large igneous province in Tarim and the western section of Central Asian orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 9(6): 779—794. (in Chinese with English abstract)
- [68] Yang S F, Li Z L, Chen H L. Permian bimodal dyke of Tarim Basin, NW China: Geochemical characteristics and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 2007, 12: 113—120.
- [69] 刘晓, 关平, 潘文庆. 塔里木盆地二叠系火山岩空间展布的精细刻画及其地质意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(2): 315—320.
- Liu Xiao, Guan Ping, Pan Wenqing. Meticulous characterization of Permian Volcanic rocks' Spatial Distribution and its geological significance in the Tarim Basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(2): 315—320. (in Chinese with English abstract)
- [70] 杨树峰, 陈汉林, 董传万. 塔里木盆地二叠纪正长岩的发现及其地球动力学意义[J]. *地球化学*, 1996, 25(2): 121—128.
- Yang Shufeng, Chen Hanlin, Dong Chuanwan. The discovery of Permian syenite inside Tarim basin and its geodynamic significance[J]. *Geochimica*, 1996, 25(2): 121—128. (in Chinese with English abstract)
- [71] 杨树峰, 厉子龙, 陈汉林. 塔里木二叠纪石英正长斑岩岩墙的发现及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1405—1412.
- Yang Shufeng, Li Zilong, Chen Hanlin. Discovery of a Permian quartz syenitic porphyritic dyke from the Tarim basin and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1405—1412. (in Chinese with English abstract)

- gins: Boulder, Colorado[J]. Geological Society of America Special Paper, 2002, 362: 99—120.
- [23] Zhou X M, Sun T, Shen W, Shu L, Niu Y. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in south China: A response to tectonic evolution[J]. Episodes, 2006, 29: 26—33.
- [24] Mo X X, Niu Y L, Dong G C, Zhao Z D, Hou Z Q, Zhou S, Ke S. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzi-zong volcanic Succession in southern Tibet[J]. Chemical Geology, 2008, 250: 49—67.
- [25] Hsü K J, Li J L, Chen H H, Pen H P, Sengor A M C. Tectonics of south China; Key to understanding west Pacific geology[J]. Tectonophysics, 1990, 183: 9—39.
- [26] 谢赛克, 马荣生, 张禹慎. 华南大陆地壳生长过程与地幔柱构造[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- Xie Douke, Ma Rongsheng, Zhang Yushen. Crust growth and mantle plume tectonics of South China continent[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. (in Chinese)
- [27] Zhou X M, Li W X. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. Tectonophysics, 2000, 326(3-4): 269—287.
- [28] Li X H, Li W X, Li Z X. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling Range, South China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(14): 1873—1885.
- [29] Wang Y J, Fan W M, Cawood P A, Ji S C, Peng T P, Chen X Y. Indosinian high-strain deformation for the Yunkaidashan tectonic belt, south China: Kinematics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints[J]. Tectonics, 2007, 26(6): TC6008.
-
- (上接第 204 页)
- [72] Zhang C L, Li X H, Li Z X. A Permian layered intrusive complex in the Western Tarim block, Northwestern China: product of a Ca. 275Ma mantle plume[J]. The Journal of Geology, 2008, 116: 269—287.
- [73] Zhang C L, Li Z X, Li X H. A Permian large igneous province in Tarim and Central Asian orogenic belt, NW China: Results of a ca. 275Ma mantle plume? [J]. Geol. Soc. America Bull., 2010, 122: 2020—2040.
- [74] Yang S F, Li Z L, Chen H L. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating of basalts from Tarim Basin, NW China and its implication to a Permian thermal tectonic event[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2006, 7(suppl. II): 320—324.
- [75] 李勇, 苏文, 孔屏. 塔里木盆地塔中-巴楚地区早二叠世岩浆岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 1097—1107.
- Li Yong, Su Wen, Kong Ping. Zircon U-Pb ages of the Early Permian magmatic rocks in the Tazhong-Bachu region, Tarim basin by LA-ICP-MS[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(5): 1097—1107. (in Chinese with English abstract)
- [76] Tian W, Campbell I H, Allen C M. The Tarim picrite-basalt-rhyolite suite, a Permian flood basalt from northwest China with contrasting rhyolites produced by fractional crystallization and anatexis [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2010, 160: 407—425.
- [77] 上官时迈, 田伟, 李献华. 塔北哈拉哈塘流纹岩的离子探针锆石 U-Pb 年代学: 对塔里木溢流玄武岩主期喷发时代的约束[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(3): 561—564.
- Shangguan Shimai, Tian Wei, Li Xianhua. SIMS zircon U-Pb age of a Rhyolite layer from the Halahatang Area, Northern Tarim, NW China: Constraint on the eruption age of Major Pulse of Tarim Flood Basalt[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(3): 561—564. (in Chinese with English abstract)
- [78] 陈咪咪, 田伟, 张自力. 塔里木二叠纪基性-中性-酸性岩浆岩的年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26: 559—572.
- Chen Mimi, Tian Wei, Zhang Zili. Geochronology of the Permian basic-intermediate-acidic magma suite from Tarim, Northwest China and its geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26: 559—572. (in Chinese with English abstract)
- [79] Zhou M F, Zhao J H, Jiang C Y. OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim Basin, NW China: Implications for a possible Permian large igneous province[J]. Lithos, 2009, 113: 583—594.
- [80] Zhu D C, Chung S L, Mo X X. The 132Ma Comei-Bunbury large igneous province: Remnants identified in present day southeastern Tibet and southwestern Australia[J]. Geology, 2009, 7: 583—586.
- [81] 朱弟成, 莫宣学, 赵志丹. 西藏南部二叠纪和早白垩世构造岩浆作用与特提斯演化: 新观点[J]. 地质前缘, 2009, 16(2): 1—20.
- Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan. Permian and Early Cretaceous tectonomagmatism in southern Tibet and Tethyan evolution: New perspective [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(2): 1—20. (in Chinese with English abstract)
- [82] 裴碧波, 朱弟成, 赵志丹. 藏南措美残余大火成岩省的西延及意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(7): 2207—2216.
- Qiu Bibo, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan. The westward extension of Comei fragmented large igneous province in southern Tibet and its implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(7): 2207—2216. (in Chinese with English abstract)