

中国东部新生代火山岩研究回顾与展望

徐义刚¹, 樊祺诚²

1. 同位素地球化学国家重点实验室, 中国科学院 广州地球化学研究所, 广州 510640;
2. 活动构造与火山中国地震局重点实验室, 中国地震局 地质研究所, 北京 100029

摘要: 作为环太平洋火山带的重要组成部分, 中国东部新生代火山岩研究历来受到重视。本文简要回顾了新生代火山岩的研究历史, 总结了近年来在火山岩时空分布特征、玄武岩成因与西太平洋俯冲等方面的研究进展, 对未来工作进行了展望。

关键词: 新生代火山; 中国东部

中图分类号: P317 文章编号: 1007-2802(2015)04-0682-08 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2015.04.002

Cenozoic Volcanism in Eastern China: Review and Perspectives

XU Yi-gang¹, FAN Qi-cheng²

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guangzhou 510640, China;
2. Key Laboratory of Active Tectonics and Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract: As an important part of the circum-Pacific volcanic belt, Cenozoic volcanism in eastern China has received much attention. In this paper, we reviewed the research history on Cenozoic volcanic rocks, and summarized the recent progresses on the tempo-spatial distribution of Cenozoic rocks, their genesis and geodynamic link with the subduction of western Pacific plate. We also provide some research perspectives in the near future.

Key words: Cenozoic volcanism; eastern China

中国东部自北向南广泛分布新生代火山岩, 尽管规模不大, 但构成长度超过 5000 km、宽达数百千米的北东-南西向陆相中-新生代的连续火山岩带, 代表了环太平洋火山带的重要组成部分, 历来受到学术界的重视。近年来在新生代火山岩的时空分布、地幔源区的性质及其与西太平洋俯冲之间的关系、晚新生代火山灰的研究均取得了重要进展。本文简要回顾中国东部火山岩研究历史, 总结近期该领域的一些研究进展, 对未来的工作进行展望。

1 回顾

改革开放以前, 中国没有专门的火山研究队伍, 只有零星的新生代火山岩研究资料, 如列别斯基 (1958) 的“大同火山群”、梅厚均 (1966) 的“云南马关含橄榄岩捕虏体的玄武岩和煌斑岩”等。上

世纪 50 年代, 王恒生和前苏联学者西尼村报道了新疆昆仑阿什库勒火山的喷发, 并与中国同事填制了 1:100 万地质图, 后为赵铭钰 (1976) 所证实。最有代表性的工作当数赵宗溥 (1956) “我国东部新生代玄武岩类岩石化学之研究”一文, 这也是最早较系统地介绍中国新生代火山岩的文章。赵宗溥先生 1955 年在地质学报上提出由大洋至大陆, 玄武岩中的 K_2O 含量是递增的。

上世纪 80 年代, 国际上启动了国际岩石圈计划 (1980—) 和国际减灾十年计划 (1990~2000), 有力地促进了中国火山学和玄武岩研究的开展。具有里程碑意义的是 1982 年由矿物岩石地球化学学会岩浆岩专业委员会 (主任徐克勤) 主办, 在黑龙江五大连池召开了“中国东部新生代玄武岩及深源包体学术讨论会” (会议召集人刘若新), 中国老一辈著名地质学家徐克勤、尹赞勋、张文佑、马杏垣等

收稿日期: 2015-05-15 收到, 2015-06-22 改回

基金项目: 中国科学院国际合作局对外合作重点项目 (132744KYSB20130005)

第一作者简介: 徐义刚 (1966—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: yigangxu@gig.ac.cn.

亲临大会,140余名火山科学工作者与会,这是改革开放之后中国第一次有关火山研究的学术会议,召唤着中国新生代火山与地幔研究高潮的到来。会议呼吁黑龙江省及国家有关部门加强保护五大连池火山遗迹和合理开发五大连池矿泉水资源,建立五大连池火山公园。现在五大连池火山世界地质公园保留的火山地质景观也得益于这次会议。

这一阶段轰轰烈烈地开展了中国新生代火山岩及地幔岩石学、地球化学和年代学研究,参加人员之多,声势之大,可谓中国火山研究的鼎盛时期。这一时期纯朴的学术研究奠定了中国新生代火山及其地幔的组成与演化研究的基础,其中代表性的著作有:鄂莫岚和赵大升(1987)主编的《中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体》、池际尚(1988)主编的《中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩)》、刘若新(1992)主编的《中国新生代火山岩年代学与地球化学》、邓晋福等(1996)的《中国大陆根-柱构造:大陆动力学钥匙》、刘嘉麒(1999)著的《中国火山》。这些学术著作至今影响着后继者的研究。与此同时,中国新生代火山岩的研究成果在国际刊物也崭露头角(Zhou and Armstrong, 1982; Peng *et al.*, 1986; Song *et al.*, 1990; Zhi *et al.*, 1990; Fan and Hooper, 1989, 1991; Liu *et al.*, 1994)。人们初步认识到以华北克拉通为代表的中国东部岩石圈地幔具有明显的活动性,与强烈的火山作用和高地热、高地震的观测一致,而与古老稳定的克拉通构造背景截然相反(邓晋福等, 1985, 1988, 1990; 刘若新等, 1985; 周新华和刘若新, 1985; 路凤香等, 1991; Fan and Menzies, 1992)。为了进一步探索岩石圈地幔,中国矿物岩石地球化学学会于1989年成立了地幔矿物岩石地球化学专业委员会,并于1990年举行第一次学术会议,选编出版“中国上地幔特征与动力学论文集”。不过,当时“由于华北东部金伯利岩侵位时代尚未确认以及全球范围内对于大陆岩石圈地幔的总结性认识仍然不足,上述对中国东部新生代岩石圈地幔的认识还停留在较为局限的时空范围内,没有上升到全球对比以及整个显生宙岩石圈地幔演化的高度”(周新华, 2006)。90年代初,随着国际岩石圈计划(ILP)的不断深入,人们对不同构造背景下岩石圈地幔特征的认识取得了框架性的突破,划分出了“克拉通型”及“大洋型”两类截然不同的岩石圈地幔端元。另外,对复县、蒙阴等地金伯利岩及所含金刚石的研究不仅得到较为可信的金伯利岩侵位时代,而且论证了华北东部在古生代曾存在厚达200 km的稳定克拉

通岩石圈。以上成果为人们探讨华北克拉通东部显生宙岩石圈地幔的演化提供了学术积累。在此大好形势推动下,1992年在北京举办了“中国及邻区新生代玄武岩及包体国际学术讨论会”(组委会主席刘若新),世界著名的地球化学家与地质学家孙贤鉢,江博明, Menzies, Griffin, O'Reilly, Flower, Matsumoto等和中国(包括台湾)的专家学者近百人参加会议,向世界展示了中国新生代火山研究领域的进展和成果。这次会议催生了华北岩石圈减薄的观点的提出(范蔚茗和 Menzies, 1992; Griffin *et al.*, 1992; Menzies *et al.*, 1993),成为中国学者走向国际舞台的重要标志,中国东部显生宙岩石圈的演化这一科学问题成为了国际地球科学研究的热点。

由新生代玄武岩及其地幔包体所获得的华北克拉通的现今岩石圈厚度在80~100 km,且岩石圈地幔的性质与软流圈地幔相似,与古生代金伯利岩中的地幔包体提供的信息明显不同。上述显著差异说明该克拉通自古生代以来,有100 km左右的岩石圈根发生了丢失,岩石圈地幔的物理和化学性状发生了根本改变,因而提出了华北岩石圈根破坏的论断(范蔚茗和 Menzies, 1992; Griffin *et al.*, 1992; Menzies *et al.*, 1993)。后来国内外地质工作者也开始从不同的角度对岩石圈减薄的时间、范围和机制等问题进行探索并提出了相应的观点(路凤香等, 1991, 2000; 邓晋福等, 1996; Griffin *et al.*, 1998; 郑建平, 1999; Xu, 2001; Zhang *et al.*, 2002)。国家自然科学基金委员会从2007年起设立了重大研究计划《华北克拉通破坏》,主要围绕华北克拉通破坏的时空分布、克拉通破坏与浅表响应、克拉通破坏的机制和过程、以及克拉通破坏在全球地质和大陆演化中的意义等科学问题进行探讨。通过多学科综合研究;提升了对大陆形成与演化的认知水平(朱日祥等, 2012)。

与国际减灾十年(1990~2000)同步,资源、环境与人类社会可持续发展是摆在地球科学工作者面前的重要使命。20世纪90年代也是中国经济腾飞的年代,火山与灾害、环境、资源的关系成为这一时期火山研究的主旋律。刘若新等(1992, 1995, 1998)通过对长白山天池火山的实地考察和研究,提出天池火山是中国最具喷发危险性的一座活动火山。在他呼吁和努力下,启动了“我国若干近代活动火山的监测与研究”计划,拉开了中国活动火山研究的序幕,标志着中国火山工作进入一个新时期。相继在长白山、五大连池和腾冲等活动火山区建立了火山监测站,进行火山喷发危险性与灾害预

测研究。在刘若新倡议下,组织创建了中国灾害防御协会火山专业委员会和中国矿物岩石地球化学学会火山及地球内部化学专业委员会,至今已主办过7次全国火山学术研讨会,由刘若新主编的“长白山天池火山近代喷发”、“火山作用与人类环境”、“中国的活火山”和有关的全国火山学术研讨会论文专辑,极大地推进了中国活动火山监测与研究的进程。中国活动火山的研究推动了火山学科的发展,以现代火山学理论为指导的火山地质学研究为基础,把火山物理学、火山地球化学、气候学、灾害学、环境学、地球物理探测和火山活动性监测等联系在一起,研究中国大陆活动火山分布与规模、活动规律与喷发机制,探讨火山活动的大地构造和动力学背景、灾害防御和气候环境效应是火山成因机理研究的核心内容。

上世纪90年代末刘嘉麒(1999)“中国火山”一书的问世,累积了他在对新生代火山广泛深入的野外地质调查取得第一手资料的基础上和获得的室内研究成果,充分展示了新时期中国火山的研究成果。他还率先在中国开展玛珥湖的研究,把火山活动与气候、环境演变及全球变化等密切地联系在一起,增进了国外对中国火山及火山研究的了解(刘嘉麒等,2015)。

2 近期主要研究进展

中国东部新生代火山岩的研究内容广泛,樊祺诚等(2015)、郭正府等(2015)、刘嘉麒等(2015)、杨列坤和王非(2015)分别对火山学、气体地球化学、玛珥湖与古环境重建、年轻火山岩年代学等领域的研究进展和存在进行了全面的总结和评述,本文仅就中国中东部新生代火山岩的时空分布,玄武岩成因与西太平洋俯冲之间的关系、以及火山灰年代学等方面的进展进行总结。

2.1 中国东部新生代火山岩的时空分布

新生代火山岩主要沿中国东部大陆边缘一系列北东向、北北东向的裂谷和断陷盆地及其边缘分布(刘若新,1992)。古近纪的火山活动主要分布在松辽平原、华北平原之下,据钻孔揭示玄武岩的厚度可逾千米,以拉斑玄武岩浆喷发活动为主,古近纪火山岩在地表只有零星出露。新近纪(中新世是主喷发期)是中国东部新生代火山活动的高潮期,华北西部张家口、围场、赤峰、集宁一带广义汉诺坝玄武岩形成分布面积达20000 km²以上的熔岩台地,以碱性玄武岩与拉斑玄武岩复合产出;东部沿郯庐断裂带(鲁苏皖)及其北延的依兰-伊通断裂带

(吉黑)和东南沿海大陆边缘张裂带(浙闽粤)则为相对单一的碱性玄武岩分布为特点。

第四纪火山活动远不如第三纪,集中分布于中国东北部(包括东北三省和内蒙东部等)和雷琼地区,成为中国东部第四纪火山活动两头热的特点。由于时代新,第四纪火山留下了众多的火山口和熔岩流等火山地貌景观,成为今天参观、学习、研究和恢复火山历程的场所。中国东北部第四纪火山主要沿松辽盆地东西两侧分布,其东部主要沿郯庐断裂带及其东侧自北向南有镜泊湖火山群、长白山火山群、龙岗火山群、宽甸火山群(刘嘉麒,1987,1999;刘祥等,1989;刘祥和向天元,1997;刘若新等,1992,1998a,1998b;Fan *et al.*,1991,2006;樊祺诚等,1998,1999,2002,2006a,2007;张招崇等,2000a,2000b),其西部靠近大兴安岭-太行山重力梯度带及其西侧,从北往南有诺敏河火山群、哈拉哈河-绰尔河(阿尔山-柴河)火山群、阿巴嘎火山群、达里诺尔火山群、乌兰哈达火山群、大同火山群等(邱家骧,1991;樊祺诚等,1999,2011,2012;白志达等,2005,2008;赵勇伟等,2008;赵勇伟和樊祺诚,2010,2012;陈生生等,2013)。上述中国东北部第四纪火山活动跨越了兴蒙造山带和华北克拉通北缘,带来丰富的地球内部信息,是研究对比晚近时期重力梯度带、华北克拉通与兴蒙造山带岩石圈演化、活动火山的喷发机制和成因机理的重要场所。

雷琼及环北部湾地区分布着中国南方最大的一片第四纪火山岩,仅琼北火山区形体可辩的各种类型火山锥有100余座(黄镇国等,1993;樊祺诚等,2004),北部湾内还有一座中国大陆最大的火山岛-涠洲岛,是研究射汽岩浆喷发活动的理想场所(樊祺诚等,2006b,2008)。

2.2 新生代玄武岩的成因与西太平洋俯冲

中国东部新生代玄武岩一般被认为是上地幔部分熔融的产物,华北-东北新生代玄武岩是DM-EMI地幔组分混合的结果,而华南玄武岩则是DM-EMII地幔组分的混合(Zou *et al.*,2000;周新华,2006),地幔发生熔融的动力学背景是西太平洋俯冲作用导致的东亚大陆扩张。然而这些传统的认识并没有解释为什么中国东部新生代玄武岩具有与洋岛玄武岩(OIB)相似的地球化学特征;虽然太平洋板块俯冲作用很早就被认为是中国东部岩浆作用的动力学控制因素,但太平洋板块参与岩浆作用的物质证据一直没有找到。近年来对上述问题的研究有了新的进展。

2.2.1 中国新生代玄武岩源区普遍存在辉石岩组

分 传统观点认为,玄武岩的源区为地幔橄榄岩,同时,在正常地幔潜能温度下,碱性玄武岩的起源深度一般大于拉斑玄武岩,两者之间的过渡带为 40~60 km。该认识在研究岩石圈地幔的演化过程中被广泛应用。然而,最近的实验岩石学表明,辉石岩也可以是玄武岩的源区(Hirschmann *et al.*, 2003)。辉石岩除了高压堆晶成因外,也可以通过交代成因形成(张亚玲和徐义刚,2012)。交代成因辉石岩是由富 Si 熔体/流体交代橄榄岩形成的,是富 Ni 且富 Si 的玄武岩的源区组分之一。因为它们的原岩是橄榄岩,所以高 Ni 和 Mg[#],但这类辉石岩不含或很少含橄榄石,所以大部分 Ni 可进入熔体,形成高 Ni 和 Mg[#]且富 Si 和强不相容元素的玄武岩(Barth *et al.*, 2002)。橄榄岩直接熔融是不能产生富硅流体的,拆沉的下地壳,或再循环玄武质洋壳经部分熔融后可以产生富 Si 熔体(Liu *et al.*, 2005; Sobolev *et al.*, 2005),此熔体还富 H₂O, Na₂O, Al₂O₃(Rapp *et al.*, 1999)。

Rapp 等(1999)通过实验证实富 Si 熔体/流体交代橄榄岩与其反应,可将其中的橄榄石转化为斜方辉石(富硅流体+橄榄石=斜方辉石),从而将橄榄岩转变为固态的斜方辉岩。所以,在地幔环境中富 Si 的流体交代围岩橄榄岩可形成辉石岩。再循环洋壳和沉积物变质成硅饱和的榴辉岩,其固相线相对于围岩橄榄岩低很多,在较高压力下首先熔融,产生的富硅熔体交代围岩橄榄岩将其转化为不含橄榄石的斜方辉岩。Rapp 等(1999)的实验还证实,当熔体与橄榄岩比值远远大于 1 时,熔体消耗了橄榄岩中所有的橄榄石和斜方辉石,反应生成了镁铝榴石和高 Mg 和 SiO₂ 的熔体;当橄榄岩的量稍微多时,生成斜方辉石,镁铝榴石和富 H₂O 熔体;当熔体:橄榄岩比值约为 1 时,生成富碱角闪石和镁铝榴石;在埃达克质熔体与橄榄岩反应的过程中形成的石榴子石其 Mg 含量在增加。当橄榄岩不能全部反应,有残留橄榄石夹层。

由于辉石岩的熔点低于橄榄岩,因此在地幔上升过程中先于橄榄岩发生熔融,因此在幔源岩浆成因中具有重要的作用。对中国东部新生代玄武岩而言,其源区含有辉石岩的主要证据包括:

(1) 喷发至地表的玄武岩一般经历了不同程度的结晶分异作用,因此需要对结晶分异进行校正才能得到原始岩浆的成分。对中国东部新生代玄武岩进行结晶分异校正获得的成分不同于实验测定的橄榄岩部分熔融产物,而与辉石岩的部分熔融产物相似(Liu *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2009; Wang *et*

al., 2011; Xu *et al.*, 2012; Hong *et al.*, 2013; Xu, 2014);

(2) 大多数玄武岩中橄榄石斑晶具有具有高 Ni 和 Fe/Mn,低 Ca 和 Mn (Hong *et al.*, 2013; Qian *et al.*, 2015),与从辉石岩熔体中结晶橄榄石相似(Sobolev *et al.*, 2005; Herzberg, 2011)。橄榄石斑晶中的熔融包裹体的成分普遍落在辉石岩来源的熔体区域(Hong *et al.*, 2013; Qian *et al.*, 2015)。

2.2.2 辉石岩源区可能是再循环洋壳或其衍生物
中国东部新生代玄武岩普遍具有 OIB 型微量元素组成(Zhang *et al.*, 2009; Zeng *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2012a, 2012b),如强不相容元素 Rb、Ba、Th、U 相对 Nb-Ta 的明显亏损,全岩 Pb 负异常和 Nb-Ta 正异常,与 OIB 相似的 Nb/U 和 Ce/Pb 值,以及 K 负异常,暗示其源区含有再循环洋壳组分。支持这一观点的证据还有:①山东-苏北-皖东北一带的新生代玄武岩中的橄榄石、单斜辉石和斜长石斑晶的 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于地幔值,暗示其源区存在经过变质脱水 and 高温水岩反应的俯冲洋壳(Zhang *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2012)。②Yang 等(2012)对比了中国东部中生代玄武岩的 Mg 同位素组成,发现新生代玄武岩的 ^{26}Mg ($-0.46\text{‰} \pm 0.10\text{‰}$) 低于中生代玄武岩 ($-0.27\text{‰} \pm 0.05\text{‰}$),后者与地幔值一致。研究表明,碳酸盐可以导致 Mg 同位素的分馏,因此中国东部新生代玄武岩源区含有再循环碳酸盐(Yang *et al.*, 2012)。③双辽渐新世火山岩具有高达 13.4%~14.6% 的 Fe₂O₃ 含量,且其 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i ≤ 0.7036 ,是迄今为止已报道的东北地区新生代玄武岩中最亏损的 Sr 同位素比值(Xu *et al.*, 2012)。Sakuyama 等(2013)还发现中国东部新生代玄武岩中 Fe 含量和 Ba/Th 值大致呈负相关关系。由于 Ba/Th 值反映了沉积物脱水程度,因此将 Fe-Ba/Th 的负相关关系解释成是俯冲洋壳中基性组分+沉积物熔融产物的两端元混合。④玄武岩中包体研究也证明上地幔中含有再循环洋壳。碱性玄武岩中辉石岩包体通常被解释为幔源岩浆的高压堆晶体。但是,产于东北蛟河的石榴石辉石岩显示全岩以及石榴石和单斜辉石等单矿物中 Eu 和 Sr 正异常,石榴石中低 HREE,以及相对较低的氧同位素组成 ($\delta^{18}\text{O} = 4.7\text{‰} \sim 5\text{‰}$),因此是洋壳辉长岩通过变质作用形成的(Yu *et al.*, 2010)。

2.2.3 西太平洋俯冲与新生代玄武岩成因 虽然双辽玄武岩具有与 HIMU 型玄武岩一致的微量元素组成和高 Fe 含量,但并没有 HIMU 型玄武岩常有的

放射性 Pb 同位素组成。在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解上双辽样品点多横跨在北半球参考线 (NHRL) 上,是年轻的俯冲洋壳组分的特点 (Thirlwall, 1997)。中国东部新生代玄武岩具有印度洋 MORB 的 Pb 同位素组成,这恰与残存在太平洋西北部、目前绝大多数已俯冲至东亚大陆之下的 Izanagi-太平洋板块的印度洋 MORB 型同位素组成相对应 (Straub *et al.*, 2011)。结合地震层析显示的俯冲太平洋板片滞留在地幔过渡带的现象 (Huang and Zhao, 2006),认为中国东部新生代玄武岩源区中再循环洋壳组分来自于俯冲太平洋板块 (Zhang *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2012; Sakuyama *et al.*, 2013)。

3 展望

中国东部新生代玄武岩在地幔动力学和板块相互作用研究中发挥了重要作用。展望未来,一些重要的科学问题仍待解决。

3.1 新生代火山活动与西太平洋俯冲之间关系

虽然目前学术界的主流认识是新生代玄武岩源区含有再循环太平洋俯冲板片的组分,也提供了一些证据,但离最后确证尚有一定的距离。在未来的研究中可考虑一些新的同位素示踪体系的应用,地球化学手段与深部三维地震图像的结合也是寻求突破的重要途径;

3.2 沿重力梯度带分布的晚新生代火山岩的成因

已有的研究多集中在重力梯度带以东地区,而对重力梯度带附近的火山作用研究相对薄弱。近年来的研究在重力梯度带的北段发现了晚新生代的火山岩带,包括诺敏河火山群、哈拉哈河-绰尔河火山群、阿巴嘎火山群、达里诺尔火山群。考虑到重力梯度带的形成在中国东部地质演化中的重要性,阐明与重力梯度带重叠的这套晚新生代火山岩带的形成机制显得尤为重要。

3.3 火山灰年代学与年轻火山岩的定年

年轻火山的定年是同位素年代学的一个挑战 (杨列坤和王非, 2015)。近几年发展起来的火山灰年代学是解决年轻火山定年一个重要途径。火山灰年代学 (tephrochronology) 是指通过火山灰地层关联形成等价火山灰,并将其视作等时标志层 (等时面),从而对海洋、湖泊、冰心以及大陆等各类沉积层序进行链接、同步和定年 (Thorarinsson, 1944)。火山灰年代学涉及直接和间接的定年方式,直接定年主要包括 ^{14}C 、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、U-Th/He 以及年纹层等方法。然而,受限于合适定年物质的获取以及年龄适用范围的限制,没有一种直接定年方式能广泛地

适用于所有火山灰地层,特别是远源沉积层序 (如深海、湖泊、冰心和黄土等) 中的微细火山灰。与之存在诸多限制不同,间接定年方式利用火山玻璃进行火山灰层的关联,随后传递年龄最终达到定年目的。该方法整合了各种定年方式的优点,无特定矿物及定年范围的限制,能广泛地适用于近、远源火山灰,为各类沉积层序的对比、定年以及不同年代学结果间的交叉验证提供了可能,是一种不可多得的“等时”定年方法。特别是最近一、二十年来,火山灰年代学家在“隐形”火山灰 (cryptotephra) 的提取、化学成分分析等方面取得的革命性进展,极大地扩展了火山灰等时标志层在空间上的覆盖范围,使这类肉眼无法看到的微细火山灰在第四纪各学科,如地层学、年代学、火山学、古气候学和考古学的研究中发挥了至关重要的作用 (陈宣谕等, 2014)。

作为世界上最危险的火山之一,长白山天池火山的灾害预防显得至关重要,这无疑要求我们很好地了解其近来的喷发频率。虽然前人已对该地区的近源火山产物开展过诸多年代学研究 (Yin *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2014),但由于样品获取、超年轻火山岩定年技术以及近源沉积层保存不完整等问题的限制,使得其晚更新世以来的喷发时间序列仍不能较好地建立。长白山远源火山灰在中国东北四海龙湾玛珥湖 (郭正府等, 2005) 和日本海深海岩心 (Lim *et al.*, 2013) 中的发现为解决上述科学问题提供了新思路。通过对玛珥湖和深海钻孔中的远源火山灰进行提取、识别,随后与近源产物开展对比,可以确定钻孔中哪些火山灰来自于天池火山。利用玛珥湖已有的高分辨率年代学结果 (Schettler *et al.*, 2006) 和深海岩心的年龄-深度模型 (Oba *et al.*, 1991; Tada *et al.*, 1999; Yokoyama *et al.*, 2007),在岩心中发现的天池火山灰均可获得绝对年龄,结合其在钻孔中的地层学关系 (相对年龄),这些来自远源的年代学信息可用于建立天池火山在目标时间窗口内的喷发事件时间轴。远源时间轴与近源时间轴进行相互补充和交叉验证,有助于我们知晓天池火山 25 ka 以来的完整喷发历史。

3.4 用火山灰研究岩浆演化

对火山岩演化的研究,通常基于全岩的化学分析 (bulk analysis),但 Ukstins Peate 等 (2008) 利用束斑分析方法研究了印度洋钻孔中的 4 层远源火山灰,发现其中的带状玻屑在小于 1 mm 的尺度内保存了单层火山灰约 85% 的主量元素变化范围,证明与玻屑的全岩分析相比,“spot analysis”能给出更多

有用信息而不是所有组分的一个简单平均。此外,通过对深海火山灰中代表性的玻屑进行微区主、微量元素和同位素测定,作者发现它们记录了近源火山灰全岩分析无法发现的单次火山活动的极端地球化学不均一性(高达 32% 的 SiO_2 含量变化)。将这些远源火山灰与位于 3000 km 外的火山源区——阿拉伯大火山岩省的酸性火山碎屑岩相互关联,得到深海火山灰与陆上沉积单元的对应关系,并探讨了分离结晶和岩浆再充填等岩浆房演化信息。这一例子充分展示了火山灰在岩石成因和演化研究中的独特优势。

参考文献 (References):

- Barth M G, Rudnick R L, Horn I, McDonough W F, Spicuzza M J, Valley J W, Haggerty S E. 2002. Geochemistry of xenolithic eclogites from West Africa; Part II. Origins of the high MgO eclogites. *Geochim Cosmochim Acta*, 66: 4325-4345
- Fan Q C, Hooper P R. 1989. The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of eastern China-implications for upper mantle composition and the paleogeotherms. *Journal of Petrology*, 30(5): 1117-1158
- Fan Q C, Hooper P R. 1991. The Cenozoic basaltic rocks of eastern China-petrology and chemical-composition. *Journal of Petrology*, 32(4): 765-810
- Fan Q C, Sun Q, Li N, Wang T H. 2006. Holocene volcanic rocks in Jingbo Lake region-Diversity of magmatism. *Progress in Natural Science*, 16(1): 65-71
- Fan W M, Menzies M. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath Eastern China. *Geotectonica Metallogenia*, 16: 171-180
- Griffin W, Reilly S O, Ryan C. 1992. Composition and thermal structure of the lithosphere beneath south africa, siberia and China: Porton microprobe studies. Abstract of the international symposium on Cenozoic volcanic rocks and deep-seated xenoliths of China and its environments, Beijing, 65-66
- Griffin W, Zhang A, O'Reilly S Y, Ryan G. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower M, Chung S, Lo C, Lee T. *Mantle dynamics and plate interactions in east asia*. Washington D C: American Geology Union, 27: 107-126
- Herzberg C. 2011. Identification of source lithology in the Hawaiian and Canary Islands: Implications for origin. *Journal of Petrology*, 52: 113-146
- Hirschmann M M, Kogiso T, Baker M B. 2003. Alkalic magmas generated by partial melting of garnet pyroxenite. *Geology*, 31: 481-484
- Hong L B, Zhang Y H, Qian S P, Liu J Q, Ren Z Y, Xu Y G. 2013. Constraints from melt inclusions and their host olivines on the petrogenesis of Oligocene-Early Miocene Xindian basalts, Chifeng area, North China Craton. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165: 305-326
- Huang J, Zhao D. 2006. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 111(B9)
- Liu C Q, Masuda A, Xie G H. 1994. Major-element and trace-element compositions of Cenozoic basalts in eastern China-petrogenesis and mantle source. *Chemical Geology*, 114(1-2): 19-42
- Liu Y, Gao S, Lee C T, Hu S, Liu X, Yuan H. 2005. Melt-peridotite interactions: Links between garnet pyroxenite and high-Mg# signature of continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 234: 39-57
- Liu Y S, Gao S, Kelemen P B, Xu W L. 2008. Recycled lower continental crust controls contrasting source compositions of Mesozoic and Cenozoic basalts in Eastern China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 2349-2376
- Lim C, Toyoda K, Ikehara K, Peate D W. 2013. Late Quaternary tephrostratigraphy of Baegdusan and Ulleung volcanoes using marine sediments in the Japan Sea/East Sea. *Quaternary Research*, 80(1): 76-87
- Menzies M A, Fan W, Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobes and the loss of >120 km of Archaean lithosphere, Sino-Korean craton, China. Geological Society, London, Special Publications, 76(1): 71-81
- Oba T, Kato M, Kitazato H, Koizumi I, Omura A, Sakai T, Takayama T. 1991. Paleoenvironmental Changes in the Japan Sea During the Last 85,000 Years. *Paleoceanography*, 6(4): 499-518
- Peng Z C, Zartman R E, Futa K, Chen D G. 1986. Pb-isotopic, Sr-isotopic and Nd-isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China. *Chemical Geology*, 59(1): 3-33
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335-356
- Qian S P, Ren Z Y, Zhang L, Hong L B, Liu J Q. 2015. Chemical and Pb isotope composition of olivine-hosted melt inclusions from the Hannuoba basalts, North China Craton: Implications for petrogenesis and mantle source. *Chemical Geology*, 401: 111-125
- Sakuyama T, Tian W, Kimura J I. 2013. Melting of dehydrated oceanic crust from the stagnant slab and of the hydrated mantle transition zone: Constraints from Cenozoic alkaline basalts in eastern China. *Chemical Geology* 359, 32-48
- Schettler G, Liu Q, Mingram J, Stebich M, Dulski P. 2006. East-Asian monsoon variability between 15 000 and 2000 cal. yr BP recorded in varved sediments of Lake Sihailongwan (northeastern China, Long Gang volcanic field). *Holocene*, 16(8): 1043-1057
- Straub S, Goldstein S L, Class C, Schmidt A. 2011. Mid-ocean-ridge basalt of Indian type in the northwest Pacific Ocean basin. *Nature Geoscience*, 2: 286-289
- Sobolev A V, Hofmann A W, Sobolev S V, Nikogosian I K. 2005. An olivine-free mantle source of Hawaiian shield basalts. *Nature*, 434: 590-597
- Song Y, Frey F A, Zhi X. 1990. Isotopic characteristics of Hannuoba basalts, eastern China: Implications for their petrogenesis and the composition of subcontinental mantle. *Chemical Geology*, 88(1-2): 35-52
- Sun C, Plunkett G, Liu J, Zhao H, Sigl M, McConnell J R, Pilcher J R, Vinther B, Steffensen J P, Hall V. 2014. Ash from

- Changbaishan Millennium eruption recorded in Greenland ice: Implications for determining the eruption's timing and impact. *Geophysical Research Letters*, 2013GL058642
- Tada R, Irino T, Koizumi I. 1999. Land-ocean linkages over orbital and millennial timescales recorded in Late Quaternary sediments of the Japan Sea. *Paleoceanography*, 14(2):236-247
- Thirlwall M F. 1997. Pb isotopic and elemental evidence for OIB derivation from young HIMU mantle. *Chemical Geology*, 139: 51-74
- Thorarinsson S. 1994. Tefrokronologiska studier pa Island. *Geografiska Annaler*, 26: 1-217
- Ukstins Peate I, Kent A J R, Baker J A, Menzies M A. 2008. Extreme geochemical heterogeneity in Afro-Arabian Oligocene tephra: Preserving fractional crystallization and mafic recharge processes in silicic magma chambers. *Lithos*, 102(1-2): 260-278
- Wang Y, Zhao Z F, Zheng Y F. 2011. Geochemical constraints on the nature of mantle source for Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos*, 125: 940-955
- Xu J, Pan B, Liu T, Hajdas I, Zhao B, Yu H, Liu R, Zhao P. 2013. Climatic impact of the Millennium eruption of Changbaishan volcano in China: New insights from high-precision radiocarbon wiggle-match dating. *Geophysical Research Letters*, 40(1):54-59
- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath the sino-korean craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A*, 26(9-10): 747-757
- Xu Y G, Zhang H H, Qiu H N, Ge W C, Wu F Y. 2012. Oceanic crust components in continental basalts from Shuangliao, Northeast China: Derived from the mantle transition zone? *Chemical Geology*, 328(S1): 168-184
- Xu Y G. 2014. Recycled oceanic crust in the source of 90-40 Ma basalts in North China Craton: Evidence, provenance and significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143: 49-67
- Xu Z, Zhao Z F, Zheng Y F. 2012. Slab-mantle interaction for thinning of cratonic lithospheric mantle in North China: Geochemical evidence from Cenozoic continental basalts in central Shandong. *Lithos*, 146: 202-217
- Yin J, Jull A J T, Burr G S, Zheng Y. 2012. A wiggle-match age for the Millennium eruption of Tianchi Volcano at Changbaishan, Northeastern China. *Quaternary Science Reviews*, 47(0):150-159
- Yang L, Wang F, Feng H, Wu L, Shi W. 2014. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Holocene volcanic activity at Changbaishan Tianchi volcano, Northeast China. *Quaternary Geochronology*, 21: 106-114
- Yang W, Teng F Z, Zhang H F. 2012. Magnesium isotopic systematics of continental basalts from the North China craton: Implications for tracing subducted carbonate in the mantle. *Chemical Geology*, 328: 185-194
- Yokoyama Y, Kido Y, Tada R, Minami I, Finkel R C, Matsuzaki H. 2007. Japan Sea oxygen isotope stratigraphy and global sea-level changes for the last 50,000 years recorded in sediment cores from the Oki Ridge. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247(1-2): 5-17
- Yu S Y, Xu Y G, Ma J L, Zheng Y F, Kuang Y S, Hong L B, Ge W C, Tong L X. 2010. Remnants of oceanic lower crust in the subcontinental lithospheric mantle: Trace element and O isotope evidence from aluminous garnet pyroxenite xenoliths from Jiaohe, Northeast China. *Earth and Planetary Science Letters*, 297: 413-422
- Zeng G, Chen L H, Hofmann A W, Jiang S Y, Xu X S. 2011. Crust recycling in the source of two parallel volcanic chains in Shandong, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 302: 359-368
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, Fan W M, Zhai M G, Yin J F. 2002. Mesozoic lithospheric destruction beneath the North China Craton: evidence from major-, trace-element and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144: 241-253
- Zhang J J, Zheng Y F, Zhao Z F. 2009. Geochemical evidence for interaction between oceanic crust and lithospheric mantle in the origin of Cenozoic continental basalts in east-central China. *Lithos*, 110(1-4): 305-326
- Zhi X, Song Y, Frey F A, Feng J, Zhai M. 1990. Geochemistry of Hannuoba basalts, eastern China: Constraints on the origin of continental alkalic and tholeiitic basalt. *Chemical Geology*, 88(1-2): 1-33
- Zhou X, Armstrong R L. 1982. Cenozoic volcanic-rocks of eastern China: secular and geographic trends in chemistry and strontium isotopic composition. *Earth and Planetary Science Letters*, 58(3): 301-329
- Zou H, Zindler A, Xu X, Qi Q. 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: Mantle sources, regional variations and tectonic significance. *Chemical Geology*, 171: 33-47
- 白志达, 田明中, 武法东, 徐德兵, 李团结. 2005. 焰山-高山-内蒙古阿尔山火山群中的两座活火山. *中国地震*, 21(1): 113-117
- 白志达, 王剑民, 许桂玲, 刘磊, 徐德斌. 2008. 内蒙古察哈尔右翼后旗乌兰哈达第四纪火山群. *岩石学报*, 24(11): 2585-2594
- 陈生生, 樊祺诚, 赵勇伟, 史仁灯. 2013. 内蒙古贝力克玄武岩地球化学特征及地质意义. *岩石学报*, 29(8): 2695-2708
- 陈宣谕, 徐义刚, Martin Menzies. 2014. 火山灰年代学:原理与应用. *岩石学报*, 30(12): 3491-3500
- 池际尚. 1988. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究(附金伯利岩). 武汉: 中国地质大学出版社, 285
- 邓晋福, 鄂莫兰, 路凤香. 1985. 东北地区新生代玄武岩及其与大陆裂谷构造等关系. *国际交流地质学术论文集(3)*. 北京: 地质出版社, 13-22
- 邓晋福, 鄂莫岚, 路凤香. 1988. 汉诺坝玄武岩化学及其演化趋势. *岩石学报*, 4(1): 22-33
- 邓晋福, 赵海玲. 1990. 中国东部上地幔热结构: 由岩石学模型推导. *地质学报*, 79(4): 44-349
- 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学. 1996. 中国大陆根-柱构造: 大陆动力学钥匙. 北京: 地质出版社, 110-119
- 鄂莫岚, 赵大升. 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 北京: 科学出版社
- 樊祺诚, 刘若新, 隋建立. 1999. 五大连池裂谷型富钾火山岩带的岩石学与地球化学. *地质论评*, 45(S1): 358-368
- 樊祺诚, 刘若新, 张国辉, 隋建立. 1998. 长白山望天鹅火山双峰式火山岩的成因演化. *岩石学报*, 14(3): 305-317
- 樊祺诚, 隋建立, 刘若新, 魏海泉, 李大明, 孙谦, 李霓. 2002. 吉林龙岗第四纪火山活动分期. *岩石学报*, 18(4): 495-500

- 樊祺诚, 隋建立, 王团华, 李霓, 孙谦. 2007. 长白山火山活动历史、岩浆演化与喷发机制探讨. 高校地质学报, 13(2): 175-190
- 樊祺诚, 隋建立, 王团华, 李霓, 孙谦. 2006a. 长白山天池火山粗面玄武岩的喷发历史与演化. 岩石学报, 22(6): 1449-1457
- 樊祺诚, 孙谦, 李霓, 隋建立. 2004. 琼北火山活动分期与全新世岩浆演化. 岩石学报, 20(3): 533-544
- 樊祺诚, 孙谦, 隋建立, 李霓. 2008. 北部湾涠洲岛及斜阳岛火山岩微量元素和同位素地球化学及其构造意义. 岩石学报, 24(6): 1323-1332
- 樊祺诚, 孙谦, 王旭龙, 尹功明, 龙安明, 尹克坚. 2006b. 北部湾涠洲岛南湾火山砂岩捕虏体光释光(OSL)测年结果. 地震地质, 28(1): 139-141
- 樊祺诚, 赵勇伟, 李大明, 武颖, 隋建立, 郑德文. 2011. 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. 岩石学报, 27(10): 2827-2832
- 樊祺诚, 赵勇伟, 隋建立, 李大明, 武颖. 2012. 大兴安岭诺敏河第四纪火山岩分期: 年代学与火山地质特征. 岩石学报, 28(4): 1092-1098
- 樊祺诚, 赵勇伟, 陈生生, 李霓, 隋建立. 2015. 大兴安岭-太行山重力梯度带以西的第四纪火山活动. 矿物岩石地球化学通报, 34(4): 674-681
- 范蔚茗, Menzies M A. 1992. 中国东部古老岩石圈下部的破坏和软流圈地幔的增生. 大地构造与成矿学, 16: 171-180
- 郭正府, 张茂亮, 孙玉涛, 成智慧, 张丽红, 刘嘉麒. 2015. 火山温室气体释放通量与观测的研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 34(4): 690-700
- 郭正府, 刘嘉麒, 樊祺诚, 贺怀宇, 隋淑珍, 储国强, 刘强, Negendank J F W. 2005. 四海龙湾玛珥湖沉积物中碱流质火山灰的来源及其意义. 岩石学报, 21(1): 251-255
- 黄镇国, 蔡福祥, 韩中元, 陈俊鸿, 宗永强, 林晓东. 1993. 雷琼第四纪火山. 北京: 科学出版社
- 列别金斯基 B.и. 1958. 大同火山群. 北京: 科学出版社
- 刘嘉麒. 1987. 中国东北地区新生代火山岩的年代学研究. 岩石学报, 4: 21-31
- 刘嘉麒. 1999. 中国火山. 北京: 科学出版社
- 刘嘉麒. 2015. 长白山火山研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 34(4): 710-723
- 刘若新, 樊祺诚, 孙建中. 1985. 中国几个地方的石榴石二辉橄榄岩捕虏体研究. 岩石学报, 1(4): 24-34
- 刘若新. 1992. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社
- 刘若新, 卢振恒, 任锦章. 1995. 火山作用与人类环境. 北京: 地震出版社
- 刘若新, 樊祺诚, 郑祥身, 张明, 李霓. 1998a. 长白山天池火山的岩浆演化. 中国科学(D辑), 28(3): 226-231
- 刘若新, 魏海泉, 李继泰. 1998b. 长白山天池火山近代喷发. 北京: 科学出版社
- 刘祥, 向天元, 王锡奎. 1989. 长白山地区新生代火山活动分期. 吉林地质, 8(1): 30-39
- 刘祥, 向天元. 1997. 中国东北地区新生代火山和火山碎屑堆积物资源与灾害. 长春: 吉林大学出版社
- 路凤香, 韩柱国, 郑建平, 任迎新. 1991. 辽宁复县地区古生代岩石圈地幔特征. 地质科技情报, 10(S1): 1-20
- 路凤香, 郑建平, 李伍平, 陈美华, 成中梅. 2000. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式: “蘑菇云”模型. 地学前缘, 7(1): 97-107
- 梅厚均. 1966. 云南马关含橄榄岩捕虏体的玄武岩和煌斑岩. 地质科学, 9(1): 50-63
- 邱家骧. 1991. 五大连池-科洛-二克山富钾火山岩. 武汉: 中国地质大学出版社
- 杨列坤, 王菲. 2015. 年轻火山岩年代学研究进展、问题及展望. 矿物岩石地球化学通报, 34(4): 701-709
- 张招崇, 李兆鼎, 李树才, 辛影, 李兆木, 王先政. 2000a. 黑龙江镜泊湖地区全新世玄武岩的地球化学特征及其深部过程探讨. 岩石学报, 16(3): 327
- 张招崇, 李兆鼎, 李树才, 辛影, 李兆木, 王先政, 尹金辉. 2000b. 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. 地质学报, 74(3): 279
- 张亚玲, 徐义刚. 2012. 辉石岩: 高压结晶还是再循环洋壳? 高校地质学报, 18(1): 62-73
- 赵铭钰. 1976. 新疆昆仑山第四纪火山群及阿什库勒活火山介绍. 新疆地质, 1-2: 27-36
- 赵勇伟, 樊祺诚, 白志达, 孙谦, 李霓, 隋建立, 杜星星. 2008. 大兴安岭哈拉哈河-绰尔河地区第四纪火山活动初步研究. 岩石学报, 24(11): 2569-2575
- 赵勇伟, 樊祺诚. 2010. 大兴安岭焰山、高山火山: 一种新的火山喷发型式. 地震地质, 32(1): 28-37
- 赵勇伟, 樊祺诚. 2012. 大兴安岭哈拉哈河-绰尔河第四纪火山岩地幔源区与岩浆成因. 岩石学报, 28(4): 1119-1129
- 赵宗溥. 1956. 中国东部新生代玄武岩类岩石化学之研究. 地质学报, 35(3): 315-367
- 郑建平. 1999. 中国东部中生代地幔置换作用与岩石圈减薄. 武汉: 中国地质大学出版社
- 周新华, 刘若新. 1985. 华北新生代深部地球化学过程: 同位素和微量元素制约. 现代地壳运动研究. 北京: 地震出版社, 142-149
- 周新华. 2006. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题. 地学前缘, 13(2): 50-64
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 42: 1135-1159

(本文责任编辑: 龚超颖)