

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

磷灰石在火山喷发触发机制和喷发方式转换中的应用： 以东昆仑造山带勒宁湊古火山为例

黄贵治¹, 马昌前^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

月磷灰石属于岩浆系统中最常见的副矿物, 其封闭性较好, 受到风化蚀变的程度较低, 已经作为记录岩浆过程潜力最大的矿物之一。它可以弥补现代火山监测技术无法应用于古火山研究中的不足, 并为岩浆通道系统和火山喷发机制的研究提供新见解。我们报告了东昆仑勒宁湊古火山的残留火山机构、岩相学、年代学观察和测试结果, 并对磷灰石进行了微区分析测试, 旨在还原古火山喷发前可能的岩浆储存状态。勒宁湊古火山由中性-酸性熔岩和火山碎屑岩组成, 熔岩主要出露在古火山口中心以及火山口北部的柱状节理区域, 主要由大量安山岩和少量流纹岩组成; 火山碎屑岩则广泛分布在火山口周围区域, 主要由英安质、流纹质凝灰岩和角砾岩组成。锆石 U-Pb 定年的结果显示该火山在中三叠世 242 Ma 活动, 大量的喷发物质由相似的壳-幔混合源区产生。我们发现, 熔岩中的磷灰石相对自形、小而干净,

碎屑岩中的磷灰石大而不规则, 并且含有大量包裹体。同时, 熔岩中的磷灰石大多发育振荡环带, 而碎屑岩中的磷灰石则具有明显的核-边结构。我们运用磷灰石湿度计计算得到该火山口产物的熔体水含量在约 3.3~3.7 wt% 之间, 熔岩熔体中的含水量略高, 并且磷灰石的变价元素显示出的岩浆氧逸度也略高。我们认为在地壳浅部岩浆储库中发生了高水含量和高温的基性岩浆补充事件, 导致岩浆浅部储库中发生岩浆混合和晶粥活化作用。该事件不仅直接导致酸性岩浆爆炸性喷发, 喷发后更加开放的储库也使得大量混合成因的安山质岩浆随后以溢流式喷发的形式流出火山口, 形成大量成分均匀的柱状节理安山岩。

关键词: 磷灰石; 火山喷发机制; 火山喷发方式转换; 岩浆通道系统

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42130309)

第一作者简介: 黄贵治(2000-), 博士生在读, 研究方向: 花岗岩和古火山学。email: gzhuang@cug.edu.cn

*通信作者简介: 马昌前(1958-), 教授, 研究方向: 岩浆岩岩石学。email: cqma@cug.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

吉林省辉南县大椅山火山碎屑物特征及其形成机制

薛晨莉¹, 刘永顺^{1*}, 聂保锋¹, 王亚楠¹, 周淑媛¹, 孙玉菁¹, 冯玮霞¹, 江姗¹

1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048

吉林省辉南县大椅山火山是龙岗火山群西缘第四纪火山的典型代表。大地构造上处于中朝克拉通东北缘, 受宽甸-龙岗-敦化深断裂控制。其火山锥为向西北开口的椅状形态, 锥体主要由多阶段岩浆喷发的空落火山碎屑层、弱的岩浆-蒸汽喷发的火山碎屑层的韵律构成。前人对该火山做了大量火山地质、岩石学和地球化学方面的研究, 但对其火山喷发动力过程研究薄弱, 缺乏系统的定量约束。基于大椅山四期火山喷发物的显微岩相学、粒度-粒形分析和分形理论, 本文对大椅山火山碎屑物特征及其形成机制开展了研究, 并反演了大椅山火山喷发的复杂机制。研究结果对认识火山爆炸喷发动力机制、火山碎屑物的破碎-输运-沉积全过程以及火山灾害预警与风险评估体系的完善有参考价值。大椅山火山碎屑物主要为渣状的火山碎屑夹杂大小不同、数量不等的火山弹、熔岩饼, 幔源包体(如尖晶石二辉橄榄岩、尖晶石方辉橄榄岩等), 壳源玄武岩、花岗岩、片麻岩等岩块和岩屑以及多种来源的晶屑。渣状的火山碎屑与火山弹或熔岩饼的表壳相为玻基斑状的粗面玄武质浮岩, 火山弹或熔岩饼内部相以及岩屑为斑状结构的较致密的粗面玄武岩。岩石的斑晶为橄榄石和斜长石, 基质由斜长石、橄榄石、单斜辉石、钛铁矿微晶±火山玻璃构成, 此外岩石还含有壳源捕虏晶(石英、斜长石和碱性长石)、幔源捕虏晶(橄榄石、斜方辉石、单

斜辉石和尖晶石)、多种类型的壳源和幔源捕虏体和少量的歪长石、单斜辉石巨晶。火山碎屑物特征分析表明: ①在粒度方面, 碎屑物的 Φ 值主要分布在 $-4\Phi\sim-5\Phi$ (分选系数 σ_ϕ 为 0.766~1.193; 偏度 Sk 为 1.343~1.695), 粒度中值 Md_ϕ 为 $-3.457\Phi\sim-2.456\Phi$ (粗粒优势)。碎屑物粒度分布频率曲线呈典型单峰形态, 粒度相对集中, 主峰主要在粗粒一端, 晚期堆积层的粒度主峰显著向较细粒端迁移(晚期堆积层 D_{50} 值较早期堆积层降低约 $\pm 20\%$), 同时, 大椅山火山第三期喷发物粒度分布峰值显著小于其他几期。不同粒径分布和分选性, 反映了碎屑物在形成过程中受到了不同岩浆爆炸能量、破碎强度、风力分选等的综合作用。②在粒形方面, 大椅山火山碎屑物的颗粒宽长比 (b/l) 和凸度 ($Conv$) 分布差异较小, 类球度 ($SPHT$) 略有差异, 第三期火山碎屑物 $SPHT$ 值略高于其他几期, 表明第三期喷发物显著地向规则形态趋近。③基于多段式幂律函数拟合方法, 火山碎屑物粒度分布存在四个显著分形区间(即对应四个分形维数: $D_1=0.069\sim 1.208$; $D_2=1.900\sim 2.256$; $D_3=1.337\sim 1.900$; $D_4=2.495\sim 2.737$), 各分形域对应不同的碎裂机制控制区, 表明大椅山火山在喷发过程中受到多重机制的控制。

关键词: 大椅山火山; 火山碎屑物; 粒度-粒形分析; 分形理论

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372343, 40872062)

第一作者简介: 薛晨莉(2000-), 硕士研究生, 研究方向: 岩石学和火山学。email: 19834428827@163.com

*通信作者简介: 刘永顺(1966-), 副教授, 研究方向: 岩石学、火山学、地质流体力学和地质系统复杂性。email: cnu901@126.com

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

火成岩潜山油气藏成山成储动力学过程： 以珠江口含油气盆地为例

熊富浩^{1*}, 侯明才², 曹海洋²

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院地质学系, 成都 610059;

2. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 成都 610059

海域火成岩潜山油气藏是近年来油气勘探的热点,其成山成储特征与动力学过程是油气勘探的重要研究内容。珠江口盆地是中国南海北部大陆边缘最大的新生代沉积盆地,也是我国非常重要的一个海上含油气盆地。受古太平洋和古南海扩张-消减影响,珠江口盆地发育晚中生代-早新生代中基性火山岩和花岗岩类,且具有规模油气成藏特征,为研究火成岩潜山油气藏的成山成储动力学过程提供了理想窗口。本文系统总结了珠一坳陷火成岩潜山的时空分布、岩石学和地球化学特征,揭示了珠一坳陷发育晚侏罗世(169~144 Ma)、早白垩世早期(140~133 Ma)、早白垩世晚期(120~106 Ma)和早古新世(66~40 Ma)四期火成岩,且发育显著的碎裂化和溶蚀孔隙。基于系统的岩石成因与大地构造分析,本研究重建了珠一坳陷火成岩潜山的成因动力学过程:1)晚三叠世-中侏罗世,古太平洋板片NW向低角度俯冲,珠一坳陷罕见岩浆活动,但发育NE-NNE向断裂构造;2)晚侏罗世-早白垩世早期,俯冲板片断

离与俯冲角度变陡,东南演化发育I型花岗岩类,珠一坳陷处于俯冲汇聚陆缘弧环境,发育NE向展布的挤压构造;3)早白垩世晚期(120~100 Ma),古太平洋板片发生回卷,诱发陆缘弧SE向伸展作用,导致珠一坳陷发育高Nb玄武岩和赞岐岩质安山岩,并形成NE向伸展构造线;4)晚白垩世(100~65 Ma):古太平洋板片俯冲方向转变,产生左旋压扭应力场,形成NW向逆冲断裂;5)古近纪时期,区域发生构造体制转换,古南海的扩张作用加强,珠一坳陷等南海北部陆缘进入被动陆缘演化阶段,发育多期伸展构造。本项研究表明,多幕式岩浆-构造作用控制着珠一坳陷火山岩潜山基岩的时空分布和成山动力学过程,而多旋回“岩浆—构造—流体”耦合作用则是珠一坳陷火山岩油气藏的主要成储机制。

关键词: 火成岩油气藏; 潜山; 成山成储; 动力学过程; 珠江口

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

望天鹅火山长白期造盾熔岩的特征及其冷却结晶机理

刘永顺^{1*}, 黄志聪¹, 聂保锋¹, 乔学斌², 李赫¹, 郭磊³, 殷旭阳¹,
李耀¹, 侯鹏¹, 杨智明¹, 冯晶晶¹

1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048;

2. 常熟理工学院 电子信息工程学院, 江苏 常熟 215500;

3. 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 266100

在中国东北长白山脉与朝鲜盖马高原之间, 分布着三座规模巨大、喷发历史复杂、鼎足而立的复式火山——吉林天池火山、望天鹅火山和朝鲜境内胞胎山火山。其中, 望天鹅火山位于吉林省长白县与抚松县的交界处, 其喷发经历了造盾、造锥两个阶段。熔岩流就位方式和熔岩岩相结构复杂多样的控制因素与形成机理问题, 是物理火山学待解决的基本问题之一。对此本文选择望天鹅火山长白期造盾熔岩为研究对象, 在野外地质考察基础上, 通过偏光显微镜、X 射线荧光光谱、地球化学分析、TG/DSC 同步热分析、熔融-冷却结晶模拟实验, 对其岩石学特征及其冷却结晶规律进行了研究, 取得了以下几点新认识。这些认识对火山建造形成、熔岩形成机理、岩相结构成因以及岩浆流体动力学研究具有参考价值。1. 长白期造盾熔岩主要有三种类型, 每种类型对应一个亚期。第一亚期为富含粗斑斜长石的基底玄武岩或玄武安山岩, 斑晶为斜长石+斜方辉石或斜长石+橄榄石或斜长石+橄榄石+单斜辉石+斜方辉石, 基质为斜长石、单斜辉石、橄榄石和钛磁铁矿微晶±火山玻璃。第二亚期为隐晶质粗面玄武岩(斑晶为斜长石或橄榄石)、玄武粗安岩(斑晶为橄榄石或单斜辉石+斜方辉石), 基质组成与第一期相同。这两期熔岩流分布范围广, 其间有明显分界。第三亚期是隐晶质的粗面岩, 斑晶为零星分布的透长石、橄榄石和单斜辉石, 基质含大量定向排列的透长石微晶, 代表长白期晚期岩浆

演化的最终产物。从矿物端元组分来看, 长石主要为拉长石和培长石, 橄榄石主要为透铁橄榄石和贵橄橄榄石, 单斜辉石为透辉石、普通辉石和斜顽辉石。2. 长白期造盾熔岩属于钠质型的拉斑系列, 岩浆从早期到晚期具有向钾质型转变的趋势。Sr-Nd-Pb 同位素分析显示长白期造盾熔岩大部分在 BSE 型地幔和 OIB 范围内, 有向 EM I 变化的趋势。这表明它们是经过橄榄石、单斜辉石、钛铁氧化物和磷灰石结晶分异的同源演化岩浆。元素比值协变关系图和同化混染作用判别图显示岩浆可能存在下地壳的混染。3. 熔融模拟实验显示: 实验产物由斜长石、单斜辉石、钛磁铁矿和火山玻璃组成。晶体的尺寸、形态和结晶程度与冷却速率存在密切关系。随着冷却速率逐渐变慢, 新生单斜辉石的晶体形态逐渐变化, 从毛发状晶须集合体、细针状雏晶, 到细条状、炉条状骸晶, 最后演变为短板状、长条状、四边形颗粒状微晶。同时, 岩浆的结晶程度也逐渐增强, 单斜辉石、斜长石、钛磁铁矿等晶体的尺寸逐渐增大, 自形程度逐渐增高, 火山玻璃逐渐减少。这些变化与野外观察到的熔岩流剖面从顶底至内部的结晶特征和岩相结构变化很相似, 代表了岩浆从远离平衡态向平衡态演变的逐渐变化过程。

关键词: 望天鹅火山; 长白期; 造盾熔岩; 远离平衡; 冷却结晶

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

流纹质岩浆的大喷发及其效应

马昌前^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

在强烈的酸性火山活动时期,流纹质岩浆往往会多次发生爆炸式喷发,喷出的岩浆体积可超过 100 km^3 ,甚至达到 10^4 km^3 。这一过程在全球多个地区均有发生,特别是在活动大陆边缘环境中,如中安第斯山普纳高原等地。这种喷发通常与俯冲板块角度变化及地壳伸展作用相关,可能是大规模岩浆底侵和地壳熔融的产物。

本研究以东昆仑中三叠世岩浆活动为例,探讨流纹质岩浆大喷发的成因、过程及其环境效应。东昆仑地区广泛发育二叠纪—三叠纪火山-侵入杂岩,包括熔结凝灰岩、流纹岩、英安岩及深部花岗质侵入岩。研究表明,该地区中三叠世岩浆活动高峰期与古特提斯洋构造演化密切相关,岩浆的高分异特征揭示了地壳熔融与深部储库分异过程。此外,不同区域流纹质凝灰岩的熔结程度存在显著差异,反映了喷发过程的复杂性。

流纹质岩浆的大喷发对地球系统产生深远影响。首先,它是重要的地壳演化和成矿作用驱动因素。火山喷发释放的金属元素和挥发分可能富集于地表或近地表,而斑岩铜矿等大型热液矿床往往出现在无大规模喷发的岩浆系统中。其次,火山喷发通过气溶胶效应和温室气体排放,引发全球气候变冷或变暖。例

如,萨马拉斯(1257年)和坦博拉(1815年)火山喷发均导致全球变冷,影响农业生产和社会稳定。历史上多次火山喷发事件甚至改变了人类历史进程。

此外,火山喷发还会对生态系统造成剧烈冲击,并影响生物演化。地质历史上的五次生物大灭绝可能均与大规模火山活动有关,但目前尚未重视流纹质岩浆大喷发的影响。火山喷发后的生态系统恢复通常经历从初级生产者(藻类、细菌)到高级消费者(鱼类、无脊椎动物)的渐进过程。淡水生态系统的恢复可能需要数十年甚至更长时间。

尽管近年来对流纹质岩浆的大喷发的研究取得了重要进展,仍存在诸多科学问题,如岩浆通道系统的结构与巨量岩浆积累机制、喷发触发机制及其动力学过程、火山喷发对圈层作用和环境效应的影响,以及如何从古老火山岩记录中提取火山学信息。未来研究应结合野外观测、地球化学分析和数值模拟,进一步揭示流纹质岩浆的大喷发的深层机制及其在地球系统中的作用。

关键词: 爆炸式喷发; 流纹质火山活动; 环境效应; 气候变化; 生物灭绝

c

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42130309)

作者简介: 马昌前(1958-), 男, 博士, 教授。研究方向: 岩浆动力学、古火山学。email: cqma@cug.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

辉绿岩结晶程度的量化表征及其储层意义- 以临南洼陷沙三段辉绿岩为例

纪罗俊杰¹, 边伟华^{1*}

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130015

济阳坳陷沙河街组三段辉绿岩储层在近年实际勘验开发过程中展现出重要油气储集潜力。本次研究以该坳陷下属单元中临南洼陷商字号井段沙河街组三段辉绿岩为研究对象, 通过岩相学分析和岩心观察相结合的方法, 对辉绿岩结晶程度进行了量化表征; 同时, 本次研究运用铸体薄片、扫描电镜观察、毛管压力曲线分析和高压压汞测试等手段, 从宏观与微观等多尺度对辉绿岩的储层空间进行刻画, 实现了储集空间类型的系统识别。本次研究采用 ImageJ 数字图像处理技术对辉绿岩中斜长石晶体进行粒度统计, 结合辉绿岩结晶程度与纵向展布规律, 首次建立以

200 μm 和 400 μm 为分界值的细-中-粗粒级三级分类标准。通过构建粒度箱型图、物性参数交会图及孔隙分布直方图多元统计模型, 定量证实研究区辉绿岩储层物性(孔隙度、渗透率)与晶粒尺寸呈显著正相关: 粗粒级辉绿岩(>400 μm)相较于中细粒级, 具有更优的孔隙结构和储渗性能。该研究成果为辉绿岩储层评价提供了新的定量表征方法, 对济阳坳陷致密油气勘探开发具有重要指导意义。

关键词: 临南洼陷; 沙三段; 火成岩; 粒度; 储层

第一作者简介: 纪罗俊杰(2001-), 硕士研究生, 研究方向: 火山岩储层。email: 1215969825@qq.com

*通信作者简介: 边伟华(1976-), 副教授, 研究方向: 盆地火山岩及油气地质。email: Weihubian@jlu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

基于氮气吸附法和高压压汞法联合分析玄武岩储层 孔隙特征及控制因素-以准噶尔盆地红车 断裂带石炭系为例

李欢¹, 边伟华^{1*}

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130000

准噶尔盆地红车断裂带石炭系火山岩作为主力开发层系, 其微观孔隙结构特征是储层潜力评价的关键控制因素。针对该区优势岩性玄武岩微观孔隙研究薄弱的问题, 本研究通过岩心观察、薄片鉴定及扫描电镜 (SEM)、低温氮气吸附 (LTNA)、高压压汞 (HPMI) 等多尺度实验技术, 系统揭示玄武岩微观孔隙结构特征, 提出多方法联合表征技术体系, 阐明孔隙-孔喉分布规律及其主控机制。研究表明, (1) 多方法联合表征揭示玄武岩微观储层发育三级孔隙系统: 微孔 (<10 nm) 为粘土矿物层间孔及孤立脱玻化孔 (占比约 7%); 介孔 (10~100 nm) 以呈蜂窝状基质溶蚀孔为主, 孔径多集中于 20~40 nm (约 66%); 大孔及微米孔 (>100 nm) 包括孤立/斑晶溶蚀孔 (0.2~3 μm)、气孔内溶蚀孔 (1~8 μm) 及微裂缝 (>10 μm) (约 27%); (2) 孔隙形态统一性, 三类玄武岩均呈现“墨水瓶形孔+平行板状狭缝形”的复合孔隙结构, 其中气孔玄武岩的储集空间演化模式为溶蚀孔

-残余气孔-微裂缝; 致密玄武岩为脱玻化孔-微裂缝; 裂缝状玄武岩为基质溶蚀孔-构造裂缝。(3) 玄武岩储层孔隙结构受岩相与成岩作用协同控制。气孔玄武岩因溶蚀孔-残余气孔双模态系统渗流受限 (退汞效率 <25%); 致密玄武岩因隐晶质基质形成孤立纳米孔 (孔隙度 2.92%), 呈现超低渗特征; 裂缝状玄武岩以“纳米孔-裂缝”复合系统最优 (孔隙度 17.87%, 退汞效率 33.58%)。成岩作用中, 溶蚀作用增孔但未改善连通性, 蚀变产生的高比表面积 (9.13 m²/g) 纳米层间孔需裂缝激活储集潜力, 构造破裂使裂缝状玄武岩渗透率提升 1-2 量级。构造-热液协同形成的裂缝网络是释放纳米孔储渗能力的关键。研究成果为红车断裂带火山岩储层分级评价与油气勘探开发提供了微观孔隙结构依据。

关键词: 玄武岩; 微观孔隙; 氮气吸附; 高压压汞; 红车断裂带

第一作者简介: 李欢 (2000-), 男, 硕士研究生, 主要从事火山岩储层方面的研究。email: lihuan23@mails.jlu.edu.cn

*通信作者简介: 边伟华 (1976-), 男, 副教授, 主要从事盆地火山岩及油气地质研究。email: WeihuaBian@jlu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

松辽盆地埋藏火山通道系统的发现及其地质意义： 基于国际大陆科学钻探松科 2 井全取心资料

胡庆博¹，王璞珺^{1*}，张文静¹

1. 吉林大学地球科学学院，长春 100031

火山口构造是指破火山口及其相关地质要素的总和，包括下部岩浆房、中部断裂系统和上部火山机构。火山通道是岩浆向上运移输导系统的总和，它是深部岩浆、区域构造和断裂作用与浅部地壳破裂相互作用的产物。现今深埋于地下的古火山口构造通常由一系列相互交切的小型侵入体构成火山通道系统；它们是揭示过去构造火山事件的钥匙。松辽盆地是东北亚地区规模最大、油气资源丰富的沉积盆地，其成因一直是人们探索的重大课题。而该盆地中埋藏火山通道系统的发现无疑对研究盆地成因具有重要意义。该埋藏火山通道系统位于松辽盆地中部，在 1.4 亿年间（242~102 Ma）频繁活动，控制了盆地的沉积速率和沉降中心的位置。松辽盆地国际大陆科学钻探松科 2 井（底深 7108.88 m）获取了从沉积盖层到变质基底连续完整的岩心序列；揭示了基底滑脱断层（DF，basement detachment fault）、裂谷起始不整合（ROU，rift onset unconformity）、初始裂谷中心的三角形伸展域（TED，triangular extensional domain）、火山活动四个成盆要素之间的关系及其它们上覆盆地充填之间的关系。裂谷起始不整合位于 5960 米深处，对应于白垩系盖层与三叠系基底之间的不整合界面。基底滑脱断层顶面埋深 6490 米，底界埋深大于 7355 米。通过 DF 与 ROU 的交点、ROU 上的 5960 米和 DF 上的 6490 米三点识别出一个三角形伸展域，其处于盆地中心的基底地层中。穿过基底所有界面斜向上运移的蠕虫状反射结构代表了可能的岩浆通道或供给岩墙系统。它们之间有控制关系也有相互作用关系，

而高角度断裂与火山通道之间可能有共生组合关系。这些位于盆地中部的岩浆通道和埋藏古火山通道可能是探索松辽盆地成因的重要途径和对成盆具有重要意义。许多沉积盆地被认为是过去地幔流动体制的重要记录库。地幔流动引起的动态地形可能对沉积盆地的容纳空间有显著影响。然而，问题是深部地幔流动通过何种具体方式影响浅部盆地的沉降或隆起？幸运的是，松科 2 井为深部地幔流动与浅部盆地之间的响应关系提供了一个很好的例子。穿过松科 2 井的地震剖面揭示了存在深部地幔流动结构，它位于地表以下 60~70 公里处，被解释为早期俯冲残片遗迹。呈蠕虫状或蛇形的反射结构，向上移动并切割岩墙，很可能是岩浆向上迁移的遗迹，称为供给沿墙，因为它们与高角度正断层密切相关，并切割和捕获了岩墙岩块。推测松辽盆地下方的上地幔反射可能是由早期俯冲遗迹形成的，这些遗迹可能随后成为地幔源岩浆。另一方面，在地震剖面中，通过岩脉识别的岩浆向上流动结构在 7355~2972 米的埋深范围内频繁出现。岩脉与裂谷地堑的高角度正断层密切相关。岩脉与基底断层一起出现在裂谷起始不整合界面，塑造了早白垩世地堑的形态和构造格局。深源岩浆侵入引起的热效应可能是区域隆起的一个重要因素，对盆地的成烃成藏的探索也具有重大意义。

关键词：松辽盆地；国际大陆科学钻探；埋藏火山通道；基底滑脱断层；裂谷起始不整合

第一作者简介：胡庆博（2002-），硕士研究生，研究方向：地质学。Email: 13943314019@163.com

*通信作者简介：王璞珺（1959-），男，教授，博士生导师，主要从事盆地地质和火山岩储层、沉积学和火山学的研究与教学，长期担任松辽盆地国际大陆科学钻探总地质师（2005-2022 年）。E-mail: wangpj@jlu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

幔源岩浆的非传统演化

陈立辉^{1*}

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069

地壳物质的再循环, 不仅改变了地幔的物质组成, 影响了地幔的物理性质, 而且使幔源岩浆的初始化学组成表现出很大的变化。当地幔发生低程度部分熔融时, 初始熔体中再循环地壳物质贡献的比例高, 挥发分的含量高。这些岩浆在地幔中运移时, 会与周围的地幔橄榄岩发生显著的相互作用: 在改造周围地幔(地幔交代作用)的同时, 自身的化学成分也发生

了明显的变化。由于成分上(如挥发分含量、种型)和构造环境上的差异, 被地幔改造后的岩浆, 在地壳中还会发生各具特色的演化, 这些“非传统”演化增加了幔源火成岩的多样性。

关键词: 幔源岩浆; 地壳再循环; 低程度熔融; 岩浆演化

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130310)

作者简介: 陈立辉(1972-), 教授, 研究方向: 火成岩岩石学, 地幔地球化学. Email: chenlh@nwu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

东昆仑造山带东段花岗伟晶岩成因及其成矿潜力分析

熊淮¹, 马昌前¹, 钟玉芳^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

花岗伟晶岩具有高分异的特点, 并且是稀有金属、云母、高纯石英和宝石的重要赋存岩石, 尤其与稀有金属矿床关系密切。然而, 花岗伟晶岩的成因和成矿机制仍众说纷纭, 尤其对于 I 型花岗岩为主的区域, 伟晶岩的成矿潜力亟待开展研究。东昆仑东段分布有大规模三叠纪 I 型花岗岩, 并广泛伴生有花岗伟晶岩出露。我们拟通过分析其成因机制、分异程度及流体出溶作用等方面探讨其成矿潜力。东昆仑东段的大部分花岗伟晶岩呈囊状以及脉状出露于伴生的花岗岩体内, 规模十分有限。在英特尔沟和王家当地区, 伟晶岩与其伴生花岗岩之间有明显的过渡接触关系, 揭示了花岗伟晶岩从其伴生花岗岩中分异出来。然而, 上述地区的花岗伟晶岩中普遍缺少如锂辉石、锂云母、电气石、绿柱石等特征矿物, 仅在莫可日地区的花岗伟晶岩中发现石榴子石。全岩主微量成分分析

表明, 所采样品大部分为钙碱性、高钾准铝质-弱过铝 I 型花岗岩, 且双胞胎元素 $Zr/Hf > 26$, 均未达到成矿岩石条件。另一方面, 样品的石英微量元素测试结果表明, 其总体微量元素含量过高 ($> 50 \times 10^{-6}$), 且 Li 元素含量较低 ($< 30 \times 10^{-6}$), 指示其不能作为高纯石英的潜力原料区以及潜在锂矿化区。我们认为, 由 I 型花岗岩作为母岩形成的花岗伟晶岩所含成矿元素十分有限且总体分异程度并不高, 其稀土元素四分组效应不明显 (TE1, $3 < 1.1$)。同时, 样品缺乏单项凝织结构 (UST), 表明东昆仑地区花岗伟晶岩可能未经历流体出溶, 未能对成矿元素进行富集提纯, 导致东昆仑东段花岗伟晶岩普遍不具备成矿潜力。

关键词: 花岗伟晶岩; 结晶分异

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42130309)

第一作者简介: 熊淮 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 火成岩. Email: hxiong@cug.edu.cn

*通信作者简介: 马昌前 (1958-), 教授, 研究方向: 火成岩. Email: cqma@cug.edu.cn

· 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 ·

俯冲碳酸盐的地幔循环历史：来自大陆玄武岩 Mg-Sr-Nd-Pb 同位素的启示

李艳青^{1*}, 刘彬¹, 马昌前², 胡祥云³

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100;

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

3. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430074

地表碳酸盐通过俯冲带进入深部地幔, 直接影响着地球上碳储库的重新分配, 在地质时间尺度上间接操控了气候的变化。然而, 板片在俯冲过程中经历了强烈的脱碳作用, 被俯冲板片带至深部地幔的碳比例, 以及碳在深部地幔中的存储深度和赋存状态仍未被充分理解。与正常地幔相比, 俯冲碳酸盐通常具有较轻的镁同位素比值 ($\delta^{26}\text{Mg}$), 因此, 镁同位素常被作为追踪幔源岩石中再循环碳酸盐信号的有效工具。中国东部广泛发育新生代玄武岩, 具有与洋岛玄武岩(OIB)类似的微量元素特征, 其放射性 Sr-Nd-Pb 同位素与富集地幔来源的 OIB 相似, 且呈现出明显的南北差异。特别地, 这些玄武岩普遍具有低于正常地幔的 $\delta^{26}\text{Mg}$ 值, 暗示其源区有再循环碳酸盐的参与。通过将新获得的东南沿海新生代玄武岩镁同位素组成与其余地区的数据进行综合对比, 本研究发现中国

东部以下深部地幔存在两种类型的低 $\delta^{26}\text{Mg}$ 储库。东北地区新生代玄武岩源区的再循环碳酸盐主要以碳酸盐化橄榄岩的形式存在, 而东南沿海地区(闽、粤、琼)玄武岩源区的再循环碳酸盐主要以碳酸盐化榴辉岩的形式存在。进一步地, 存在于东南沿海玄武岩源区的榴辉岩经历了较强的脱水和脱碳作用, 所含的碳量远低于东北玄武岩源区。结合地球物理地震层析图像, 我们认为, 东北地区新生代玄武岩中的再循环碳酸盐主要来源于滞留在地幔过渡带的俯冲沉积物, 而东南沿海玄武岩中的再循环碳酸盐来自俯冲板片本身。这表明, 地幔过渡带可能是深部地幔中俯冲碳的主要储存位置, 而通过俯冲板片直接携带的碳会被携带至下地幔, 较少地被再带至地表。

关键词: 中国东部; 玄武岩; 镁同位素; 碳循环

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

汞含量和汞同位素所指示的古新世-始新世极热事件期间的火山活动

金思敏¹, David B. Kemp^{2*}, 尹润生³, 沈俊², David W. Jolley⁴,
Manuel Vieira⁵, 黄春菊²

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

3. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081;

4. 英国开放大学, 阿伯丁 000000;

5. GEOBIOTEC, 卡帕里卡 000000

沉积汞含量和汞同位素已被广泛用于识别地质历史时期的火山活动。已发表的研究表明, 古新世-始新世极热事件(PETM)可能至少部分是由与北大西洋火成岩省(NAIP)相关的岩浆活动所释放的CO₂驱动的。然而, 现有的PETM汞含量记录显示出很强的空间异质性。为深入探究PETM期间火山源汞的变化模式, 本研究以靠近北大西洋火成岩省的钻井沉积记录为研究对象, 发表了PETM期间首个汞同

位素数据序列。并对全球范围内19个PETM汞沉积记录进行了汇编和整合。研究表明, NAIP相关的岩浆活动释放的碳, 不仅是触发PETM事件的关键因素之一, 还可能在一定程度上对该事件的持续时间起到了维持作用。

关键词: PETM; 汞异常; 汞同位素; 北大西洋火成岩省

基金项目: 国家自然科学基金项目(41888101, 42230208, 42172039)

第一作者介绍: 金思敏(1996-), 博士后, 研究方向: 古气候学. Email: simin@cug.edu.cn

*通信作者简介: David B. Kemp, 教授, 研究方向: 古气候学. Email: davidkemp@cug.edu.cn

*通信作者简介: 黄春菊, 教授, 研究方向: 旋回地层学. Email: huangcj@cug.edu.cn

· 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 ·

东昆仑白石崖火山-侵入杂岩体中磷灰石的地球化学特征： 对岩石成因与成矿作用的制约

孙洋^{1*}, 马昌前², 刘彬¹

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100;

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

白石崖铁矿位于青海省都兰地区, 属于典型的矽卡岩型铁多金属矿床。矿区内发育的白石崖火山-侵入杂岩体主要由斑状花岗闪长岩、花岗闪长岩、英安玢岩和花岗闪长玢岩岩脉组成。通过前人的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究, 侵入岩和次火山岩显示出较为一致的结晶年龄, 范围为 229.5~224.1 Ma, 表明其形成于晚三叠世。尽管已有部分研究对其成因进行了探讨, 但关于该杂岩体的岩浆起源及演化过程仍存在较大争议, 有待进一步深入研究。磷灰石作为火成岩中常见的副矿物, 是研究成岩成矿过程理想“矿物探针”。本文以白石崖铁矿区的中酸性岩浆岩为研究对象, 重点开展磷灰石的矿物学和地球化学研究, 揭示磷灰石的成因特征及其对岩浆演化的指示意义, 进而探讨侵入岩与次火山岩的成因联系及其与成矿作用的关系。研究表明, 磷灰石强烈富集稀土元素, 轻重稀土元素分异显著, 并表现出明显的负 Eu 异常 ($Eu/Eu^* = 0.06 \sim 0.63$)。同时, 磷灰石富集 Th、U 等高场强元素, 而亏损 Nb、Ti、Zr、Hf 等高场强元素以及 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素。稀土元素和微量元素的组成特征表明, 其寄主岩石的成岩物质具有壳幔混源的特征。岩相学研究表明, 磷灰石主要呈自形至半自形颗粒, 粒径多为 50~150 微米。在背散射电子 (BSE) 图像中, 大多数磷灰石晶体显示出均匀的结构和典型的振荡环带结构, 而部分

磷灰石颗粒则因不规则的晶体形态、内部孔洞或增生边缘而与之区分。核一边/环带结构的磷灰石从核部到边部 MgO 含量呈现波动式变化, 揭示了镁铁质岩浆的幕式注入过程。值得注意的是, 在花岗闪长岩中发育有暗色微粒包体。上述特征表明, 白石崖火山-侵入杂岩体的形成过程中可能经历了多期岩浆混合作用, 并有幔源岩浆的显著贡献。这种岩浆混合作用触发了混合岩浆的上升侵位, 为流体出溶和热液成矿提供了有利条件。白石崖侵入岩和次火山岩在空间上密切共生, 形成时代基本一致, 表明它们是同一期岩浆作用的产物。同时, 侵入岩和次火山岩中的磷灰石样品表现出一致的稀土元素 (REE) 配分模式、Sr-Nd 同位素组成和二阶段 Nd 模式年龄 TDM2 (1.60~1.41 Ga), 表明它们具有相同的岩浆起源, 即源自东昆仑造山带中元古代镁铁质下地壳的再造作用。研究表明, 白石崖侵入岩和次火山岩存在成因耦合关系, 侵入岩代表了岩浆储库内富晶体的堆晶物质, 而次火山岩可能是岩浆房内晶体间熔体提取、聚集的产物。这一发现不仅揭示了白石崖矿区中酸性岩浆岩的成因联系, 还为深入理解区域岩浆演化过程及成矿作用提供了新的地球化学依据。

关键词: 磷灰石; 火山岩-侵入岩成因联系; 晶粥模型; 东昆仑造山带

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

地壳浅部大型硅质岩浆储库的形成时限

陈宣谕^{1*}, 徐义刚¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640

上地壳大型硅质岩浆储库的形成和演化对理解火成岩石学、火山学以及火山防灾减灾具有重要意义。然而, 与大规模硅质岩浆聚集和储存等过程相关的时间尺度问题目前仍存在争议。锆石定年和扩散计时给出的估算存在矛盾: 锆石定年显示上地壳岩浆滞留时间可达万年至百万年尺度, 而扩散年代学则指向千年甚至更短的岩浆聚集时间。上述两种方法均基于酸性侵入岩和火山岩中的矿物晶体, 然而晶体方法本身可能存在局限性(如继承锆石、扩散模型参数自然条件适用性等问题), 使得直接确定岩浆聚集时间存

在困难。本研究将地球化学和火山灰年代学方法有机结合, 揭示了导致灾难性破火山口形成喷发的岩浆累积过程。研究发现数百立方公里量级的硅质岩浆储库可在千年时间尺度内形成。此外, 研究还发现了指示破火山口坍塌后残余岩浆储库千年尺度再活化事件的火山灰记录。这些发现支持上地壳大型硅质岩浆储库具有较短寿命的认识。

关键词: 硅质岩浆储库; 破火山口形成喷发; 火山灰年代学; 地球化学

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

A Generalized View of Volcanic-Magmatic Pathways Incorporating Recent Drilling Results

John C Eichelberger^{1*}

1. University of Alaska Fairbanks Alaska Center for Energy and Power, USA, Fairbanks 111111

From the standpoint of geothermal energy, volcanic hazards, and even mineral resources, the most important systems are those that include establishment of a hypersolidus volume or volumes in the upper crust. Such regimes are only sustainable if open to repeated additions of heat and mass(magma)from the deep crust and upper mantle. Their primary form of heat loss to the surface is by hydrothermal convection and of heat and mass loss by eruption. This rather obvious concept has led to the term "trans-crustal" to describe such systems. The proportions of accumulated volumes of magma to erupted volumes is unknown but generally guessed to range from 2X to 10X. Common lifetimes of magma-hydrothermal systems range from 10^4 to 10^7 yr. The normal modeling practice of beginning with $t = 0$ obscures the likelihood that these systems may be near steady state for much of their lives, although not without frequent perturbation. Inputs heat and magma sometimes but not always trigger outputs(eruptions) from the systems. Outputs(eruptions)not only decrease the volume of accumulated superheated material, releasing thermal energy to the atmosphere and the

surface, but may also cool the hottest parts by allowing direct access of hydrothermal fluid to magma.

The major discontinuity in this trans-crustal heat-pipe is the abrupt upward transition from a regime of silicate fluid to aqueous fluid. Both are likely convecting, but magma convects as bulk flow whereas aqueous fluid convects in porous flow. The intervening solid rock zone (subsolidus but ductile) is characterized by conductive rather than convective heat transport. Therefore, for there to be continuity of vertical heat flux(as there would be in steady state), the interval between the magmatic and the hydrothermal system should be thin with a steep thermal gradient. Viewed this way, recent "accidental" drilling encounters with magma a short distance between hot hydrothermal systems is not an accident at all, but a normal consequence of the decrease in permeability as temperature approaches the solidus.

These considerations mean that high density geothermal energy is more accessible than expected.

关键词: Magma; Hydrothermal; Energy

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

坦桑尼亚伦盖活火山：一种特殊的钠质碳酸岩火山

王连训^{1*}, 陈济海¹, 任军平²

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

坦桑尼亚伦盖火山(全名: Oldoinyo Lengai)位于东非裂谷东支南部的格雷戈里裂谷内,是目前全球唯一一座正在喷发的钠质碳酸岩活火山。其喷发历史可追溯到至少 35 万年前。该火山锥呈陡峭圆锥状,由交替的熔岩、火山灰和爆炸碎屑层构成,主要熔岩类型为霞石岩和响岩及少量橄榄黄长岩和碳酸岩。山顶有两个火山口,其中北火山口至今仍在活动,目前喷出的主要为碳酸质岩浆,温度约为 510 °C,白天呈现黑色,粘度与水相近,富含碱金属(Na_2O 为 32.4 wt.%, K_2O 为 7.6 wt.%)和卤素挥发分(Cl 为 3.4 wt.%, F 为 2.5 wt.%),冷却后形成以菱钠钙石(nyerereite)、格碳钠石(gregoryite)、钾盐和萤石为主要组成的黑色碳酸岩(Zaitsev & Spratt, 2024),明显不同于全球已知的其他碳酸岩(均以白色方解石或白云石为主)。菱钠钙石、格碳钠石和钾盐在空气中并不稳定,暴露在地表会快速与大气中的水分反应并溶解,最终形成以方解石和萤石为主要矿物的白色碳酸岩。因此有一种观点认为,全球大多数钙质碳酸岩多为次生,由钠质碳酸岩发生交代作用形成,而产生的富碱流体则交代围岩形成了霓长岩。伦盖火山碳酸质岩浆的喷

发最早记录于 1960 年前后,这一发现不仅最终确认了岩浆成因碳酸岩的存在,还在为火成碳酸岩的研究带来了诸多方面的启示与争议,具体包括(1)碳酸岩的岩浆起源;(2)碳酸盐熔体与硅酸盐熔体之间的液态不混溶作用;(3)富碱碳酸岩与钙质碳酸岩的成因联系等。碳酸岩与多种战略性关键矿产之间存在密切的时空联系,包括稀土、铌、磷、铁和萤石等。例如,巴西阿拉夏的碳酸岩中赋存着全球最大的铌矿;我国内蒙古白云鄂博碳酸岩则含有全球最大的稀土矿;南非帕拉博瓦碳酸岩储存有数亿吨铁矿和数亿吨萤石矿。这些矿床通常并非单一矿种,而是 REE-Nb-Fe-P-F 等多种成矿元素同步富集。在坦桑尼亚的伦盖碱性-碳酸岩火山中,也发现了磷灰石、磁铁矿、烧绿石和萤石等关键矿产的主要赋存矿物,甚至出现显著的富集现象(局部样品萤石高达 20%)。因此,未来应加强对伦盖火山在碳酸岩成矿指示方面的研究,以揭示其潜在的科学价值。

关键词: 火山; 钠质碳酸岩; 东非裂谷; 坦桑尼亚; 伦盖

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

东昆仑都兰岩基就位过程及其地质意义

薛振华^{1*}, 马昌前¹, 刘彬², 黄贵治¹, 楼杭龙¹

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

2. 长江大学地球科学学院, 武汉 430074

岩浆在地壳中储存、就位和流动机制是地球深部过程与动力学的核心科学问题。近年来, 地球物理研究发现, 在活火山区并未发现大型岩浆房, 仅发育体积巨大的低熔体分数的低地震波速区域, 可能意味着岩浆房的体积很小。现今的矛盾在于, 深部小体积的“岩浆房”与巨型岩基和超级火山在物质总量上并不匹配。那么, 大岩基是如何生长的? 目前推测, 这些大型岩基是由巨大的岩浆通道系统(magmatic plumbing system)中上部的多个岩浆储库和反复的岩浆添加后固结而成的, 具有“千层饼”式结构。但先后加入到岩基中的每股岩浆有多大体积、按何种次序充填、充填时的晶体-熔体含量是多少? 这些仍是地球科学的未解之谜。东昆仑都兰岩基主要由三叠纪的香日德辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩等组成, 出露面积约 14000 km², 为研究岩基的组装、就位过程提供了理想的场所。通过对都兰花岗岩类岩体进行系统的

构造观察、磁组构和重力反演研究, 得出以下认识: 1) 重力反演依次从 70 km、60 km、50 km 至地表扣减, 揭示都兰岩基两个清晰的岩浆通道, 岩浆通道形态从深部向浅部迁移时, 直径逐渐变大, 并向四周扩散; 2) 磁组构研究表明, 在岩浆通道根部地区, 磁线理较陡, 为岩浆垂向运移的结果, 磁线理清晰揭示岩浆向 NW 和 SE 方向流动迁移, 构成现今长条状的岩体形态。对都兰岩基的研究表明, 大型岩基的就位, 仍然以重要的岩浆通道为主要的岩浆供给方式。岩浆从深部向浅部运移时, 向四周扩散运移, 形成超大规模的岩基。这也间接表明, 以岩基就位为代表的大陆生长方式, 更多是以“点状”形式进行, 岩浆通道下小小的岩浆房, 蕴含极大的地球物质生长能量。

关键词: 岩浆通道系统; 岩基生长过程; 东昆仑; 磁组构; 重力反演

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

黄金管热解过程中煤中硫的地球化学演化特征： 成熟度、烃类生成与芳香性响应

薛李苹¹, 唐跃刚^{1*}, 高硕²

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

煤中硫随煤化程度的加深在地质环境中的迁移转化对煤结构、烃类物质生成及生烃潜力具有重要影响。本研究利用黄金管热解实验模拟了 300~600 °C 下煤的生烃过程, 结合气相色谱-质谱联用(GC-MS)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)和 X 射线光电子能谱(XPS)技术, 探讨了热模拟前后烃类气体与 H₂S 的释放、游离含硫化合物的生成以及煤大分子与有机硫结构的演化特征。结果表明, 低有机硫煤在低温热解时产生更多的甲烷, 但同时产生较多的乙烷、丙烷等。因此, 在低成熟阶段(Easy%R_o=0.71), 高有机硫煤的干燥系数(C₁/ΣC₁₋₅)显著高于低有机硫煤; 在过成熟阶段(Easy%R_o≥3.64), 煤中有机硫含量显著促进甲烷的生成。黄铁矿硫与有机硫均能热解生成 H₂S。H₂S 产率受全硫含量影响, 随温度的升高而升高。而高有机硫煤热解时, H₂S 浓度先升高后降低, 最终达到平衡, 其中超高有机硫煤在 400 °C 时 H₂S 浓度最大, 为 17.31%。在成熟阶段(Easy%R_o=1.75), 煤中游离有机硫的小分子最为丰富。低有机硫煤主要生成二苯并噻吩和苯并萘并噻吩等芳香硫化物, 而高有机硫煤在此阶段则同时生成硫醇和苯硫酚等脂肪硫化合物。随着煤化程度加深至 Easy%R_o≥3.64,

低有机硫煤和高有机硫煤中均生成元素硫(S₈)和硫酸酯类化合物。S₈的形成表明高阶煤中可能存在元素硫。FTIR 的分析显示, 相同热模拟条件下, 高有机硫煤中含有更多的脂肪烃结构, 低有机硫煤的参数 I 始终高于高有机硫煤, 这一现象表明有机硫含量降低了煤的芳构化程度。高有机硫煤的 H_{al}/H 与“A”值高于低有机硫煤, 表明相同煤化程度下, 高有机硫煤具有更高的生烃潜力。且热模拟中参数 I、DOC、“A”在 Easy%R_o=4.67 时均与自然条件下的演化有所差别, 值得更深一步研究。XPS 分析表明, 煤样的有机硫中, 噻吩与亚砷在 Easy%R_o=1.75~3.64 之间相对含量最高。噻吩与亚砷在高有机硫煤中相对含量最多, SHOS 煤中最高可达 91.24%。而脂肪族硫、砷、磺酸盐以及硫酸盐在低有机硫煤中相对富集。有机硫的芳香性在 Easy%R_o<1.75 时迅速增加, 随后煤中的砷和亚砷可能阻碍了噻吩硫的生成, 导致其芳香性减弱。本研究为热解脱硫和清洁能源开发提供了理论支持。

关键词: 煤中硫; 黄金管; 甲烷; 生烃潜力; 芳香性

国家自然科学基金重点项目(42030807)

薛李苹, (1994-), 女, 河南滑县人, 博士研究生.E-mail: m18435187017@163.com

唐跃刚, (1958-), 男, 重庆人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 煤地球化学.E-mail: tyg@vip.163.com

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

扬子西北缘李家河条带状碳酸岩成因及铁矿成矿机制

马丹贞^{1,2}, 王连训^{1,2*}, Sebastian Tappe³, 马昌前^{1,2}

1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

2. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;

3. Technical University Bergakademie Freiberg Institute for Mineralogy, Freiberg, Germany 009599

火成碳酸岩作为全球铌-稀土等战略性关键金属的主要来源之一, 其铌-稀土成矿作用长期以来备受科学界和工业界的广泛关注。近年来的研究发现, 与火成碳酸岩密切共生的铁矿资源同样展现出巨大的潜力, 赋存规模可达数亿至数十亿吨。典型实例包括: 南非 Phalaborwa 矿床 (219 Mt @ 55.32% Fe)、我国内蒙古白云鄂博超大型矿床 (1500 Mt @ 35% Fe) 以及小秦岭铁岔沟矿床 (158 Mt @ 34.57% Fe) 等。然而, 目前对该类矿床的成矿物质来源、元素迁移及富集过程的研究相对有限, 严重制约了对其成矿机理的理解。值得注意的是, 碳酸岩型铁矿床多赋存于层状碳酸岩侵入体内, 其显著特征是发育火成堆晶层理构造, 尤以韵律式方解石层和磁铁矿层交替出现为典型特征。本研究选取扬子地块西北缘米仓山地区的李家河碳酸岩型铁矿床 (220 Mt @ 30% Fe) 为研究对象, 通过详细的岩石学、年代学、全岩及单矿物元素和同位素地球化学分析, 深入探究碳酸岩型铁矿的成因和成矿机制。

李家河碳酸岩以小规模岩株和岩脉形式出露, 其显著特征为条带状构造: 主要矿物方解石和磁铁矿交替富集, 形成以方解石为主的浅色富方解石层和以磁铁矿为主的暗色富磁铁矿层, 两层间多为过渡关系。磷灰石在碳酸岩中不均匀分布, 局部可高达 10 vol%, 而橄榄石、金云母和铌矿物则以次要矿物或副矿物形式存在。磷灰石 U-Pb 年代学显示成岩成矿时代为 778 Ma。李家河碳酸岩中各层均具有一致的 Sr 和 Nd 同位素组成 [$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$]_i=0.7039~0.7048; $\epsilon\text{Nd}(t)$ =

+1.5~+3.4], 与区域岛弧型基性岩同位素特征相似, 暗示其源区可能为受俯冲板片流体交代改造的岩石圈地幔。方解石单矿物和全岩样品均表现出平坦型稀土元素 (REE) 配分模式 [(La/Yb)_N=4.74~6.79 和 5.54~14.1], 显著区别于全球典型原生碳酸岩富集 LREE 的特征, 暗示岩浆可能源自贫石榴石、相对富集 HREE 的碳酸岩化地幔源区。

目前, 关于条带状碳酸岩中铁氧化物矿化的成因主要有两种观点: 结晶分异作用和液态不混溶作用。通过对李家河碳酸岩的野外观察发现, 其富方解石层和富磁铁矿层之间呈现渐变过渡关系。矿物组合与厚度的突变特征表明, 铁矿的形成并非由简单的晶体沉降或矿物分选堆积机制驱动, 而主要受液态不混溶作用控制。富磁铁矿层的 TFe_2O_3 含量 (50.0~66.5 wt.%) 显著高于过渡层和富方解石层, 并富含 Co、HFSE (Nb=193×10⁻⁶~741×10⁻⁶)、Sn 和 Zn, 而 CaO、Sr、Ba 和 REE 含量较低, 这一地球化学特征与不混溶富铁熔体的行为一致。进一步研究表明, 李家河碳酸岩中的磁铁矿和方解石夹层形成于富铁熔体向方解石晶粥体的重力塌陷过程。液态不混溶促使富铁熔体与富碳酸岩熔体分离, 富铁熔体随后结晶形成富磁铁矿层。因此, 我们认为富铁熔体的液态不混溶作用是铁氧化物矿化形成的关键因素。

关键词: 条带状碳酸岩; 铁矿化; 磁铁矿; 韵律分层; 李家河

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (编号: 42072082); 湖北省自然科学基金项目 (编号: 2022CFB116); 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室开放研究基金项目 (编号: GPMR202441)

第一作者简介: 马丹贞 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学, Email: 2990510193@qq.com

*通信作者简介: 王连训 (1983-), 教授, 研究方向: 碱性-过碱性岩浆岩、火成碳酸岩及稀有稀土金属成矿作用, Email: lianxunwang@cug.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

浙江芙蓉山破火山的形成过程与岩浆系统演化

贺振宇^{1*}, 颜丽丽², 陆天宇¹, 张进³

1. 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083;

2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029;

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

中国东南沿海晚侏罗世-白垩纪火山活动强烈, 以大量发育的破火山为典型地质特征。本文以代表性的浙江芙蓉山破火山为研究对象, 通过野外地质调查、火山岩岩石学、锆石 U-Pb 定年等研究, 探讨其破火山形成与岩浆演化过程。芙蓉山破火山呈直径约 16 km 的圆形, 火山岩以环形断裂为界与早古生代陈蔡变质杂岩并置, 两者现今出露在近同一水平, 沿破火山边缘发育系列正断层。破火山形成喷发富晶体凝灰岩(第二阶段)和破火山口湖相沉积主要分布在破火山的东部, 破火山形成后喷发阶段熔结凝灰岩(第四阶段)及同火山碎屑流滞后集块岩主要分布在破火山的西部。这些地质特征表明芙蓉山破火山是典型的塌陷破火山, 并且是经历了两次不对称塌陷(类似跷跷板)的复式破火山。对破火山形成后的流纹质凝灰岩和沉凝灰岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年揭示了 159~151 Ma、146~141 Ma、139~135 Ma 等三组年龄,

分别对应于芙蓉山破火山形成前喷发、破火山形成喷发和破火山形成后喷发的时代。进一步的锆石 Hf 同位素分析结果显示破火山形成后喷发(139~135 Ma)锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化较大, 为 -10.6~+0.4, 平均为 -4.4 ± 8.4 (2SD), T_{DMC} 模式年龄为 1.83~1.14 Ga, 暗示了在峰期破火山形成喷发后的岩浆补给和岩浆房再累积过程, 以及穿地壳岩浆系统内部地幔和地壳两种不同来源岩浆的贡献。中国东南沿海硅质破火山分布广泛且类型多样, 普遍经历了喷发、塌陷和复活等多阶段复杂演化过程, 破火山精细填图、高精度年代学约束、破火山分类体系的建立、破火山时空分布的综合编图等研究是未来中国东南沿海晚侏罗世-白垩纪火山活动过程研究的重要基础和方向。

关键词: 芙蓉山破火山; 流纹质火山岩; 火山地质调查; 岩浆系统; 中国东南部

· 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 ·

河北省开平向斜南东翼煤矿区岩浆岩的成因机制

崔敏睿¹, 魏菱¹, 邢斌², 白林², 万业婷¹, 李伍^{1*}

1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;

2. 开滦能源化工有限公司, 河北 唐山 063018

河北省燕山褶皱带主题呈 EW 向展布, 构造-岩浆岩发育, 开滦矿区地处该褶皱带南缘的开平向斜内, 该向斜为一轴向 NE-SW、向北东端渐变为近 EW 向并仰起的、北西翼陡、南东翼缓的不对称向斜。在开平向斜南东翼的四对矿井中井下开采揭露一定规模的岩浆岩。矿区内岩浆岩发育产状主要为岩床和岩墙, 在矿区西部(钱家营矿、吕家坨矿), 岩浆岩主要以岩床的形式存在; 在矿区东部(范各庄矿、林西矿), 则以 NNW 向的两组连续岩墙形式侵入煤层, 且煤层与岩浆岩的接触带表现出显著的热变质作用和破坏。

前人研究表明开平向斜煤层形成于晚石炭—中二叠纪聚煤期(300~259 Ma), 本次研究采集的样品岩浆侵入体锆石定年实验结果显示, 锆石年龄分别为 291 Ma 与 300 Ma, 且锆石呈现清晰的振荡生长环带, 定年结果高度集中, 表明锆石为岩浆岩自生锆石。岩浆锆石年龄与传统观点存在较大差异, 经过多角度的构造、矿物及煤化学分析后认为, 该岩浆侵入煤层的现象可能是多期岩浆与构造耦合控制的结果。

已有资料表明, 华北板块北缘早石炭世晚期—中二叠世(330~265 Ma)有大规模岩浆侵入, 且侵入岩为中性岩, 闪长岩居多, 与研究区岩浆岩的矿物岩石学相符, 且定年锆石年龄在 273~324 Ma 之

间, 与研究区岩浆锆石定年结果吻合。因此初步推断研究区岩浆侵入岩与华北板块北缘侵入岩来自于同一岩浆房。

华北板块北缘在早石炭世晚期—中二叠世期间受古亚洲洋闭合的影响, 形成了近南北向(SN 向)挤压应力场, 而研究区位于华北板块东缘, 未完全进入太平洋构造区, 因此未受强烈的挤压应力场作用。华北板块北缘的岩浆在挤压应力场作用下向上侵入, 而研究区的岩浆在早石炭晚期至中二叠时期未发生显著向上侵入。至中生代早期, 受燕山运动的影响, 研究区经历了 NW-SE 向挤压, 深部岩浆房再度活化, 岩浆开始向上侵入煤层。

对于研究区晚石炭至中二叠世岩浆侵入煤层的初步提出的观点为: 石炭纪早期(300 Ma), 华北板块北缘东段形成中性岩浆房(锆石结晶年龄 300 Ma), 但未完全侵入地表, 滞留于中下地壳; 二叠纪至中生代, 燕山期构造挤压使先存岩浆房再活化, 沿开平向斜北西翼推覆构造向上侵入煤层, 引发接触变质。这为该区域的岩浆岩分布规律提供了预测思路, 并在岩浆通道系统及侵入成因机制有着一定的理论价值。

关键词: 岩浆侵入机制; 构造—岩浆耦合

第一作者简介: 崔敏睿(2001-), 博士, 研究方向: 地球化学. Email: tb23010005a51@cumt.edu.cn

*通信作者简介: 李伍(1987-), 硕士研究生, 研究方向: 地球化学、煤地质学及油气地质. Email: liwu@cumt.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

东昆仑都兰三叠纪富晶体与贫晶体火山岩的成因 及其对长英质岩浆系统晶粥活化的指示

张萌雨¹, 刘彬^{1*}, 马昌前^{2,3}, 张瑶瑶¹, 薛振华^{2,3}, 孙洋¹, 李艳青¹

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100;

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074;

3. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

晶粥活化是控制长英质火山喷发与岩浆分异的关键过程之一, 直接影响着晶体-熔体分离与熔体抽取效率、岩浆混合行为及火山喷发方式, 对于理解大陆地壳形成与演化、揭示火山喷发机理以及科学预测未来火山喷发等具有重要意义。然而, 目前国内外学者对于长英质岩浆系统的晶粥活化作用的研究还不够深入, 例如, 对于晶粥再活化的驱动机制还存在岩浆补给、流体加入等“外源触发”与挥发分、岩浆房超压等“内因主导”多种不同观点。本项研究选取都兰海寺沟地区出露的三叠纪地壳剖面中富晶体与贫晶体火山岩为研究对象, 通过开展锆石、磷灰石和石英微区结构与成分研究, 结合岩石地球化学研究, 综合分析对比富晶体与贫晶体火山岩的形成与演化机制差异, 在此基础上探讨有关岩浆系统的晶粥活化过程及其控制因素。研究区富晶体火山岩由富晶体英安岩和富晶体流纹质熔结凝灰岩组成, 而贫晶体火山岩主要由贫晶体流纹质熔结凝灰岩和流纹岩组成。本次锆石 U-Pb 年代学测定结果揭示这些火山岩具有相似的结晶年龄, 均为中三叠世火山活动的产物。锆石 Hf 同位素分析进一步揭示这些火山岩具有相似的岩浆源区, 并且以新生下地壳物质为主。基于锆石微量元素、锆石结晶和饱和温度与锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 压力计估算结果等对比, 可以判断富晶体与贫晶体流纹质熔结凝灰岩、流纹岩应该代表同一岩浆储库不同演化阶

段的产物, 而富晶体英安岩来自另一个不同的岩浆储库。石英电子探针与 CL 图像分析结果表明, 石英 Ti 含量与灰度具有明显的正相关关系。这些火山岩中的石英微区结构类型丰富, 主要发育韵律环带和反环带, 能够反映基性岩浆不同程度的补给作用。贫晶体和富晶体流纹质熔结凝灰岩中的石英 Ti 含量和温度存在重叠, 进一步指示两者应为同一岩浆储库不同演化阶段的产物。石英 Ti 扩散年代学显示, 富晶体火山岩对应岩浆储库从加热活化到喷发的时间通常显著长于贫晶体火山岩对应的时间。富晶体火山岩的磷灰石发育正、反两种环带, 贫晶体火山岩多发育成分均一或具有正环带结构的磷灰石, 暗示富晶体火山岩对应的岩浆储库演化存在较多基性岩浆熔体的注入与混合。综合上述研究数据, 可以推断研究区内富晶体与贫晶体火山岩的形成与中三叠世基性岩浆底侵诱发下地壳部分熔融密切相关, 其中富晶体与贫晶体流纹质熔结凝灰岩、流纹岩可能为同一岩浆储库不同演化阶段的产物, 富晶体英安岩为另一岩浆储库演化的产物。基性岩浆不同程度和不同方式补给很可能是导致研究区长英质岩浆系统晶粥多次活化的重要机制。

关键词: 长英质岩浆系统; 晶粥活化; 富晶体火山岩; 贫晶体火山岩; 岩石成因

国家自然科学基金项目(42130309, 41972066, 41502050)

第一作者简介: 张萌雨(1999-), 女, 汉族, 硕士研究生, 主要从事火成岩岩石学与地球化学、火山岩油气藏等方面研究.E-mail: myzhang.stu@yangtzeu.edu.cn

*通信作者简介: 刘彬(1987-), 男, 汉族, 教授, 博士生导师, 主要从事火成岩岩石学与地球化学、基岩潜山油气勘探等方面教学与研究.E-mail: binliu@yangtzeu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

准噶尔盆地中部石炭纪超深层火山岩的岩石成因 及其深部地球动力学机制 ——以 ZS1 井为例

李世泽¹, 刘彬^{1*}, 王鹏², 李艳青¹,
袁禹¹, 张萌雨¹, 吴栾¹

1. 长江大学 地球科学学院, 武汉 430100;

2. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100

新疆准噶尔盆地是中亚造山带西南缘的重要组成部分, 其不仅是研究古亚洲洋演化与大陆地壳生长的“天然实验室”, 而且也是当前我国深层-超深层油气勘探的关键地区。该盆地内部石炭纪火山岩厚度大、分布广, 源-储配置关系优越, 具有巨大的油气勘探潜力。已有研究多聚焦盆地中一浅层火山岩, 对于深层-超深层火山岩的研究至今仍非常薄弱, 尤其是超深层火山机构的具体类型、形成机制与发育模式等认识几乎为空白。本研究选取准噶尔盆地中部最新钻遇的一口超深层探井 ZS1 井中石炭纪火山岩为研究对象, 通过开展锆石 U-Pb 年代学、岩石学、地球化学和地球物理学等综合研究, 深入剖析其岩浆源区组成以及有关岩浆形成与演化机制, 在此基础上系统分析其岩石成因与深部地球动力学机制, 以期为深入认识准噶尔盆地石炭纪构造演化与促进超深层火山岩油气藏勘探开发提供重要支撑。本次锆石 U-Pb 年代学测定结果揭示 ZS1 井发育两套时代不同的火山岩, 分别为早石炭世(335.2±2.9 Ma)和晚石炭世(304.8±2.0 Ma)。基于井-震对比方法揭示 ZS1 井发育一套中心式多火山口复合火山机构, 在岩相序列上表现为爆发相—溢流相—爆发相的演化特征。岩石地球化学分析结果显示, 早石炭世火山岩和晚石炭世火山岩样品均具有亚碱性玄武岩系列的成分特征, 早石炭世火山岩样品属于中钾钙碱性系列, 晚石炭世火山岩样品属于低钾拉

斑系列。与早石炭世火山岩样品相比, 晚石炭世火山岩样品具有相对高的 SiO₂、Al₂O₃、Na₂O 含量, 相对低的 MgO、K₂O、CaO、FeO_t 含量。两套火山岩相对于球粒陨石富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素, 其 Eu 异常不明显。在原始地幔标准化图解上, 两套火山岩相对富集轻稀土和 Th 等元素, 显著亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素, 总体与起源于俯冲改造的岩石圈地幔的镁铁质岩成分特征类似。根据主量-微量元素特征指标可以判断两套火山岩受陆壳混染的影响较小, 经历了不同程度的橄榄石、辉石和角闪石等矿物的分离结晶。早石炭世和晚石炭世火山岩的 εHf(t) 分别为+1.8~+15.1 和-4.9~-2.6, 表明其分别起源于相对亏损或者相对富集岩石圈地幔。两套样品均具相对高的 Th/Yb 值, 变化范围大的 Ba/Th 和 Ba/La 值, 反映其地幔源区受到俯冲组分(以流体为主)的改造。这两套火山岩具有相对低的 Zn/Fe_t(×10⁴)和相对低的 Sm/Yb 值, 进一步表明两者均起源于尖晶石+少量石榴子石二辉橄榄岩地幔源区。综合本次研究成果以及区域多学科研究资料, 可以判断早石炭世火山岩应该形成于一个大陆弧的环境, 与北天山洋北向俯冲关系密切, 而晚石炭世火山岩形成于一个受板块回撤影响的大陆弧后盆地伸展环境中。

关键词: 超深层火山岩; 岩石成因; 地球动力学机制; 石炭纪; 准噶尔盆地中部

国家自然科学基金项目(41502050)和中国石化胜利油田分公司课题(24ZC0613)

第一作者简介: 李世泽(2000-), 男, 汉族, 硕士研究生, 主要从事火成岩岩石学与地球化学、火山岩油气藏等方面研究。E-mail: szli.stu@yangtzeu.edu.cn

*通信作者简介: 刘彬(1987-), 男, 汉族, 教授, 博士生导师, 主要从事火成岩岩石学与地球化学、基岩潜山油气勘探等方面教学与研究。E-mail: binliu@yangtzeu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

长白山天池火山破火山口阶段岩浆房系统形成与演化过程

李嘉慧¹, 单玄龙^{1*}, 衣健¹

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130012

长白山火山是我国公认的最具喷发危险的活火山, 一旦发生爆炸式喷发, 将会造成巨大的灾害影响。岩浆过程是火山形成、演化和喷发的根本原因, 准确认识和恢复地质过程及规律是有效预防地质灾害的根本。本次研究以天池火山为研究对象, 基于野外剖面, 利用岩相学、矿物学、地球化学、熔体包裹体等方法, 结合 rhyolite-MELTS 模拟结果和地球物理探测结果, 深入揭示天池火山破火山口阶段岩浆房系统形成演化过程, 这对进一步探索长白山复合岩浆房系统的演化规律和喷发趋势具有重要意义。

(1) 天池火山破火山口阶段喷发序列

基于野外剖面, 综合利用岩相学、矿物学、地球化学等方法认为破火山口阶段主要由四个期次构成。结合年代学测年结果, 由下至上依次为: 29 ka 前喷发的天文峰期黄色碱流质浮岩; 7~17 ka 前喷发的气象站期碱流质熔岩; 公元 946 年千年大喷发事件, 包括以浅灰色碱流质浮岩为代表的千年大喷发 I 期, 和以黑色粗面质浮岩为代表的千年大喷发 II 期。

(2) 岩浆演化过程模拟

运用 rhyolite-MELTS 热力学模型对天池火山破火山口阶段各期次岩浆演化过程进行模拟, 在 $P=1\sim 2$ kbar, 含水量为 0.3~0.5 wt.% 条件下, 模拟演化的结果与破火山口阶段四个期次样品分布吻合较好, 表明天池火山破火山口阶段岩浆的演化部位很可能处于地壳浅部位置。

(3) 复合岩浆房系统结构

利用熔体包裹体和单斜辉石-熔体温压计两种方法对岩浆房的温压条件进行计算, 结合 rhyolite-MELTS 模拟结果和地球物理探测结果, 实现对复合

岩浆房系统的刻画。天文峰期岩浆房深度范围为 4.7~6.8 km; 气象站期碱流质岩浆房深度范围为 5.9~7.5 km; 千年大喷发 I 期岩浆房深度范围为 4.3~7.8 km; 千年大喷发 II 期岩浆房深度范围为 2.5~5.5 km。

(4) 天池火山破火山口阶段岩浆房系统形成-发展过程

天文峰期岩浆来源于中地壳高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的粗面质岩浆。气象站期岩浆为另一个新生的岩浆房, 其岩浆来源于中地壳低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的粗面质岩浆。气象站期与千年大喷发 I 期岩浆具有一定继承关系, 可能存在由小岩浆房逐渐生长形成大岩浆房的规律。即在气象站期喷发结束后, 此时碱流质岩浆房处于生长膨胀的状态。由于中地壳岩浆的持续补给, 形成大型的千年大喷发 I 期岩浆房, 直到后期大规模粗面质岩浆注入, 触发了火山喷发。千年大喷发 II 期岩浆来源于中地壳岩浆房中储集的另外一期新的粗面质岩浆, 并继承千年大喷发 I 期碱流质岩浆房, 在经过短时间的演化后继续喷发, 形成黑色浮岩堆积。

(5) 未来喷发趋势

长白山千年大喷发期岩浆房已经发生坍塌破坏, 在千年大喷发之后又发生了多次小规模喷发, 说明地下深部岩浆又开始重新上升聚集, 形成新的小岩浆房。岩浆房系统又进入下一个从小岩浆房逐渐生长形成大岩浆房的过程。结合近期火山监测数据, 推测长白山火山下次喷发仍以小规模的中酸性岩浆喷发为主。

关键词: 天池火山; 破火山口阶段; 岩浆房系统; 岩浆演化; 触发机制

基金项目: 国家自然科学基金面上项目《长白山更新世-全新世碱性熔岩到浮岩阶段喷发方式转换的深部岩浆过程》(项目编号: 41972313)

第一作者简介: 李嘉慧 (1997-), 博士, 研究方向: 火山地质. Email: 852431474@qq.com

*通信作者简介: 单玄龙 (1969-), 教授, 研究方向: 火山地质、火山岩/变质岩油气藏. Email: shanxl@jlu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

火与热的馈赠：火山-岩浆活动景观价值链与地学旅游多维启示

任舫¹, 潘志新^{2*}, 张辉³, 李凌云⁴

1. 中国地质科学院 地质遗迹研究室, 北京 100037;
2. 海南大学 旅游学院, 海口 570228;
3. 海南交投环岛旅游公路投资开发有限公司, 海口 570233;
4. 海南省交通建设发展有限公司, 海口 570227

岩浆作用既是地球深部能量释放的窗口, 也是地表景观与资源协同演化的核心驱动力。本文以国内外著名的岩浆岩地质遗迹类型为例, 结合中国东南部白垩纪红层盆地丹霞地貌、美国黄石地热奇观及夏威夷火山景观等典型案例, 揭示火山-岩浆通道系统在资源形成、环境响应与美学塑造中的耦合机制。研究表明: (1) 火山活动通过岩浆分异、热液蚀变及火山碎屑沉积等过程, 直接塑造了地热泉、火山湖、熔岩台地等旅游资源, 并为关键金属 (如稀土元素)、非金属矿产 (沸石、浮石) 及矿泉水资源提供了成矿载体; (2) 景观演化密码: 中国东南部丹霞地貌的“赤壁丹崖”景观本质是中生代岩浆岩风化产物中铁元素氧化显色 (Fe^{3+} 胶结物) 与构造抬升共同作用的结果, 中国东南部丹霞地貌的成因与中生代火山-岩浆活动密切相关: 白垩纪岩浆岩经风化剥蚀为红层盆地提供了富铁碎屑物源, Fe^{3+} 胶结物的氧化显色作用与构造抬升共同造就了“赤

壁丹崖”的视觉奇观, 其美学价值已成为世界地质公园和世界遗产地旅游的核心吸引力; (3) 火山通道系统的多尺度结构 (如火山颈、放射状岩墙群) 不仅记录了岩浆运移的动力学历史, 其独特的地貌形态 [美国魔鬼塔国家纪念地 (Devil's Tower)、夏威夷火山链] 更成为科学普及与生态旅游的天然课堂。研究进一步提出“岩浆岩地质遗产资源链”模型, 强调从深部岩浆分异 (金属富集) 到浅表火山机构 (地貌景观) 再到表生地球化学循环 (资源再生) 的完整价值链。以湖南平江石牛寨、龙虎山、海口火山口等中国地质公园为例, 建议通过“地质遗迹保护-科学阐释-产业结合-旅游转化”的路径, 实现资源的多维开发与可持续利用, 为全球岩浆岩景观区域的生态价值转化提供科学范式。

关键词: 岩浆作用; 丹霞地貌; 地学旅游; 岩浆岩地质遗迹; 生态价值转化

基本科研业务费项目: 基于 GIS 的平江石牛寨地质公园丹霞地貌成因研究 (JKY202403)

海南省交通厅委托项目: 海南环岛旅游公路旅游地学资源挖掘与科普示范研究 (HX2023-09)

第一作者简介: 任舫, 副研究员, 研究方向: 地质遗迹保护, 丹霞地貌 Email: 546615019@qq.com

*通信作者简介: 潘志新, 副教授, 研究方向: 自然地理, 丹霞地貌, 地质遗迹保护, 生态地质. Email: 415979045@qq.com

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

利用地震资料解译火山岩有利储层的新视角 ——地层结构

唐华风^{1*}

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061

勘探早期火山岩有利储层的预测符合率一直以来是困扰勘探家的难点问题, 关键是需要建立储层与地震相的关系。已有的储层-岩相-地震相的研究方法流程未能建立起储层与地震相的关系。本文尝试从地层结构角度入手, 利用高勘探程度的松辽盆地白垩系营城组火山岩勘探成果, 建立地震相特征与储层的关系。研究表明, 松辽盆地白垩系营城组火山地层中发育似层状、似层状-块状、块状和层状等 4 类地层结构, 在火山岩圈闭的占比分别为 30%、26%、23%和 21%。从孔隙度几何均值、

渗透率几何均值和极好-好-一般储层的数量来看, 有利储层主要分布在似层状和层状结构的地层中。地层结构中导致储层品质好的原因是发育原生孔隙的似层状结构的熔岩流和热碎屑流。储层品质差的原因是原生孔隙不发育的块状结构的熔岩穹丘和熔岩流。该认识应用于勘探早期盆地的火山岩油气藏勘探, 可能会大幅度降低经济风险。

关键词: 火山岩; 火山机构; 有利储层; 分布模式

基金项目: 国家自然科学基金项目(41790453)和吉林省重点研发计划项目(20230203107SF)

第一作者简介: 唐华风(1979-), 教授, 研究方向: 火山岩储层和火山地层综合研究. E-mail: tanghfc@jlu.edu.cn

• 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 •

新元古代扬子陆块北缘汇聚裂解过程

游国庆^{1*}

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

我国华南板块中新元古代构造演化一直是近年来研究的热点。扬子陆块北缘大洪山地区发育的花山杂岩体是在新元古代时期扬子地块与桐柏一大别地块之间形成的前寒武纪重要地质体, 它们对全球 Rodinia 超大陆在扬子陆块北缘的汇聚裂解响应应具有重要的地质意义, 然而, 其地质单元形成的时空关系及其构造属性一直存在争议。通过对花山群杂岩岩浆岩和沉积岩有关锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素、沉积地层特征、岩石主微量元素的研究认为, 沉积地层(洪山寺组和六房咀组)与岩浆岩[辉长岩、辉绿岩、(枕状)玄武岩]不是同期同构造背景的产物。

花山杂岩体沉积地层的沉积学、地球化学等研究表明, 洪山寺组和六房咀组发育的小型斜层理位态和矿物成分显示物源可能主要来自南部地区下伏中元古代打鼓石群、太古宙鱼洞子杂岩以及崆岭杂岩等, 其沉积旋回显示裂陷扩张过程。其中, 洪山寺组主体形成于浅水浊积扇相, 六房咀组主要形成于深水盆地相。根据年代学研究资料和区域构造成果分析, 结合前人在扬子板块周缘发现的大量约 820 Ma 酸性—基

性岩浆活动记录以及同时代(820~800 Ma)的沉积地层, 花山群中的碎屑沉积物与基性火山岩、火山碎屑岩属于裂解背景下形成的同时代沉积火山建造, 说明花山群的沉积地层形成于青白口纪(820~815 Ma)的伸展构造背景, 其原型盆地形成于弧后裂陷构造环境。推测它可能形成于 Rodinia 超大陆裂解背景之下, 与超级地幔柱活动相关。

在花山群中的“蛇绿混杂岩”镁铁质岩体[辉长岩、辉绿岩、(枕状)玄武岩]组合在大洪山地区大致形成于 817~947 Ma 弧前或洋内构造背景, 可能是多阶段洋陆或洋内俯冲的产物。推测扬子陆块与桐柏一大别地块之间在晋宁期发生过一定规模的洋内或洋陆俯冲及造山运动, 二者可能曾在青白口纪晚期拼合到一起。

由此可见, 花山群镁铁质岩体与沉积建造依次反映了扬子板块北缘中新元古代时期由挤压构造背景向伸展构造背景的转换过程。

关键词: 扬子北缘; 新元古代; 汇聚与裂解; 花山杂岩体

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0603702)和中国地质调查局项目(DD20190370、DD20190685)

第一作者简介: 游国庆(1964-), 研究员, 研究方向: 区域构造学. Email: youchina@126.com

*通信作者简介: 游国庆(1964-), 研究员, 研究方向: 区域构造学. Email: youchina@126.com

· 专题 20: 火山-岩浆通道系统及其资源能源环境效应 ·

塔北阿满过渡带二叠纪火山岩时空演化与喷发机制

魏菱¹, 陆鹿^{1*}, 张银涛², 谢舟², 许永忠¹, 康鹏飞²,
李壮福¹, 陈皓宇¹, 汤恒昊¹

1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国石油股份有限公司塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000

阿满过渡带在构造上属于塔里木盆地北部坳陷, 位于西部阿瓦提凹陷与东部满加尔凹陷之间的低隆带上。该地区发育广泛的玄武质熔岩和大量的以英安岩为代表的长英质火山岩, 形成基性-酸性双峰式火山岩喷发体系(厚度>500 m, 展布面积 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$), 构成塔里木二叠纪大火成岩省的重要组成部分。本研究通过三维地球物理资料和钻井数据解析、宏微观岩相学系统分析、锆石 U-Pb 同位素定年(12 口钻井, 28 件样品)、关键界面相干体分析, 首次揭示了该区二叠系火山岩的时空分布规律, 并探讨不同单元火山岩的喷发模式。研究表明, 该区二叠系火山岩在横向上呈现典型多中心集中分布, 其中玄武岩以富满、果勒西为喷发中心(NW-SE 向展布), 英安岩则发育跃满(弧形构造带)、果勒西、满深三个喷发中心。火山喷发整体具有“内早外晚”的时代序列特征。弧形构造带内部的火山岩喷发时代较早(296~291 Ma), 而外部喷发时代较晚(291~287 Ma), 自弧形构造带内部向外逐渐变年轻, 整体表现出破火山口沉陷型火山喷发序列。玄武岩喷发通道与辉绿岩侵入

体相连, 二者构成由横向岩床群主导的岩浆运移系统。F₁₅ 断裂以东沿 NW-SE 向伸展断裂呈裂隙式喷发, 西段受 NNW 向走滑断裂控制。英安岩定向展布特征不明显, 表现为“三中心”集中喷发特征, 反映深部岩浆房孕育和演化占主控作用, 为破火山口式喷发。岩浆通道并非定向断裂, 而是塌陷式破火山口周缘断裂。基于地震剖面和关键界面相干特征分析, 刻画出了二叠系英安岩火山喷发通道。本研究揭示了阿满过渡带二叠系火山岩时空分布规律, 刻画和追踪了以“东横西顺”为特征的辉绿岩-玄武岩岩浆侵入-喷发通道以及破火山口周缘断裂式英安岩喷发通道, 并分析其地质控因。创新性提出地幔柱背景下的双模式喷发机制: 1) 基性岩浆沿基底薄弱带(南华系先存断裂)快速上升形成裂隙式喷发; 2) 酸性岩浆受深部岩浆房演化控制, 产生破火山口塌陷式喷发。该模型为理解克拉通内地幔柱背景下双峰式火山作用提供了新的构造岩浆学视角。

关键词: 塔里木大火成岩省; 二叠系火山岩; 时空分布规律; 喷发机制; 阿满过渡带

基金项目: 中石油塔里木油田公司横向委托项目“阿满过渡带火成岩形成期次及发育模式研究”(041022070109)

第一作者简介: 魏菱(1999-), 硕士研究生, 研究方向: 岩浆岩岩石学. Email: 2296335068@qq.com

*通信作者简介: 陆鹿(1989-), 副教授, 研究方向: 岩石大地构造、沉积盆地演化、油气储层地质. Email: geollulu@cumt.edu.cn