塔里木早二叠世大火成岩省的成因模式

余星^{1*}, 杨树锋^{2†}, 陈汉林², 厉子龙², 励音骐²

1. 国家海洋局第二海洋研究所海底科学实验室, 杭州 310012;

2. 浙江大学地球科学学院, 杭州 310027

* 通讯作者, E-mail: yuxing@sio.org.cn

† 通讯作者, E-mail: yjsy-ysf@zju.edu.cn

收稿日期: 2016-07-13; 接受日期: 2017-08-21; 网络版发表日期: 2017-09-07

浙江省自然科学基金项目(编号: LY17D020001)、国家海洋局基本科研业务费专项资金项目(编号: JG1518、2017QNA3015)和国家自然科学基金项目(批准号: 41506070、41603029)资助

摘要 近20年来, 塔里木早二叠世大火成岩省在各类火成岩的空间分布、时间序列、地球化学特征、地幔源区和岩浆演化等方面有了深入的认识, 为揭示大火成岩省的成因模式和演化过程奠定了坚实的基础. 本文将主要基于塔里木大火成岩省存在的两阶段岩浆产物, 结合前期研究基础和前人研究成果, 系统论证塔里木早二叠世大火成岩省成因的两阶段熔融模式. 模式认为塔里木大火成岩省的形成与地幔柱活动有关, 其地幔柱作用形式兼具“巴哈纳型”和“德干型”两种特点, 即早期高热的地幔柱引起了岩石圈地幔的低程度部分熔融, 后期地幔柱上升绝热减压引起地幔柱自身部分熔融. 在早期熔融事件中, 地幔柱主要表现为上部岩石圈熔融所需的热供给, 后期熔融过程中地幔柱成为熔融发生的主要场所和物质供给源. 第一阶段喷发的两类玄武岩具有高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、低¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd的同位素特征, 富集大离子亲石元素和高场强元素, 为富集的大陆岩石圈地幔部分熔融的产物, 具有“巴哈纳型”特征; 而第二阶段产出的基性-超基性侵入岩具有相对两类玄武岩较低的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, 较高的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd比值, 为地幔热柱熔融的产物, 具有“德干型”特征. 其中第一阶段, 可细分为Group1和Group2两类玄武岩, Group2玄武岩相对Group1玄武岩具有较低的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, 较高的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd比值. Group2玄武岩显示连接Group1玄武岩和第二阶段岩浆作用的过渡类型特征, 表明塔里木早二叠世大火成岩省是地幔柱与岩石圈地幔持续相互作用的结果. 关于塔里木大火成岩省成因模式的研究有助于增进对塔里木大火成岩省岩浆作用、深部地质过程和地球动力学过程的全面认识, 有利于丰富大火成岩省的成因理论和地幔柱活动理论.

关键词 大火成岩省, 早二叠世, 两类玄武岩, 成因模式, 塔里木盆地

1 引言

塔里木大火成岩省是中国继峨眉山大火成岩省之后的又一重大发现(图1), 继姜常义等(2004a)和Yang

等(2006)提出塔里木大火成岩省的概念之后迅速引起了国内外同行的关注, 成为大火成岩省研究的重要靶区(例如, 陈汉林等, 2006; Yang等, 2007; Zhang C L等, 2008; Zhou等, 2009; Tian等, 2010; Yu等, 2011; Li等,

中文引用格式: 余星, 杨树锋, 陈汉林, 厉子龙, 励音骐. 2017. 塔里木早二叠世大火成岩省的成因模式. 中国科学: 地球科学, 47: 1179–1190, doi: 10.1360/N072016-00246
英文引用格式: Yu X, Yang S F, Chen H L, Li Z L, Li Y Q. 2017. Petrogenetic model of the Permian Tarim Large Igneous Province. Science China Earth Sciences, 60: 1805–1816, doi: 10.1007/s11430-016-9098-7

图1 塔里木大火成岩省各类火成岩残余分布图

深灰色为玄武岩区, 浅灰色为酸性火成岩区, 分布范围参考杨树锋等(2014). 各钻井符号代表井位依次为Yt6-羊塔6井, Dh6-东河6井, Sl1-胜利1井, Ym4-依敏4井, Hd5-哈得5井, Mx2-满西2井, He4-和4井, Mc1玛参1井, Tz22-塔中22井, B4-巴4井, Q5-群5井

2011; Li Y Q等, 2012; Xu等, 2014; Cao等, 2014; Li D X等, 2014; Wei等, 2014a; Cheng等, 2014, 2015; Shang-guan等, 2016; Zou等, 2015; Zhang等, 2017). 已有的研究主要围绕塔里木大火成岩省的年代学、地球化学、岩石成因、相关的沉积作用和成矿作用等方面, 在大火成岩省的时空分布、岩浆演化、地幔源区特征、沉积剥蚀响应及成矿效应等多个方面积累了丰富的基础资料(例如, 李勇等, 2007; 余星, 2009; Yu等, 2011; 励音骐等, 2010; Li Y Q等, 2014; Li Z L等, 2012; Wei等, 2014b, 2015, 2016; Chen等, 2014; Zhang和Zou, 2013; Zhang等, 2013; Li D X等, 2014). 这些资料为我们认识塔里木早二叠世大火成岩省的成因模式奠定了坚实的基础. 而塔里木早二叠世大火成岩省成因模式的研究将有助于增进对大火成岩省岩浆作用、深部地质过程和地球动力学过程的总体认识, 有利于丰富大火成岩省的成因理论和地幔柱活动理论. 本文基

于塔里木大火成岩省的时间序列及地球化学特征, 结合已有的研究基础和前人的研究成果, 讨论塔里木早二叠世大火成岩省的成因模式及其存在的问题.

2 大火成岩省的一般成因模式

目前关于大火成岩省的成因主要有两类观点: 地幔柱成因和非地幔柱成因(张招崇和董书云, 2007; 徐义刚等, 2013; Ernst, 2015). 地幔柱成因是指大火成岩省的形成与地幔柱活动有关(Campbell, 2005), 如西伯利亚暗色岩系可能源于地幔柱头熔融(Campbell和Griffiths, 1990), 德干暗色岩系与留尼旺地幔柱有关(Duncan和Pyle, 1988; Mahoney等, 2002). 峨眉山大火成岩省、卡鲁大火成岩省和“巴哈纳”大火成岩省等也均被认为与地幔柱活动有关(Zhang Z C等, 2006, 2008; Xu等, 2007; Hastie等, 2014; Turner等, 1996). 非地幔柱成因包括陨石撞击(Ingle和Coffin, 2004; Jones, 2005; Hagstrum,

2005)、克拉通边缘对流(King和Anderson, 1998)、大规模岩石圈拆沉和板片断离(Keskin, 2003)、裂谷减压熔融等(King和Anderson, 1995). 这些非地幔柱成因也在一定程度上解释了部分大火成岩省的形成, 但目前最常用的大火成岩省成因解释模式是地幔柱模式.

地幔柱模式可以按地幔柱的作用形式分为热贡献和物质贡献两类, 分别对应于两种大火成岩省的形成模式: “巴哈纳型”和“德干型”(Turner等, 1996). 以巴哈纳为代表的大火成岩省, 其岩石圈相对较厚, 地幔热柱到达岩石圈底部尚未达到减压熔融条件, 而使富含挥发份的富集岩石圈先发生部分熔融, 形成具有岩石圈地幔特征的玄武质岩浆(Turner等, 1996). 而以德干为代表的大火成岩省, 岩石圈相对较薄, 地幔柱上升直接发生绝热减压熔融, 形成具有地幔柱组成特征的岩浆, 岩浆喷发速率高(Mahoney等, 2002). “德干型”的玄武质岩浆显示类似于OIB的地球化学特征, 指示地幔柱的直接物质贡献(Sen等, 2009). “巴哈纳型”大火成岩省的岩浆源区主要为大陆岩石圈地幔, 其发生的条件包括: 地幔热柱的潜能温度在1380~1580℃, 岩石圈地幔由富挥发份橄榄岩组成, 岩石圈厚度大于100km, 喷发时间达10~15Ma, 熔融区域与地表分布的玄武岩面积相当.

3 塔里木大火成岩省的时间序列、地化特征及对成因模式的启示

3.1 主要火成岩类的时间序列

基于目前已有的同位素年龄资料和野外接触关系, 可以将塔里木早二叠世大火成岩省的岩浆作用划分为两个主要阶段. 第一阶段以柯坪玄武岩为代表, 其年龄为~290Ma, 报道的年龄数据集中于288~292Ma(余星, 2009; 张达玉等, 2010; Yu等, 2011)(图2a). 位于巴楚夏河南地区的层状玄武岩目前尚没有年龄数据报道, 不过该区的玄武岩与柯坪开派兹雷克组玄武岩具有极好的匹配性, 判断属于同期喷发的产物(余星等, 2017). 位于塔西南地区棋盘剖面玄武岩也具有相似的年龄(厉子龙等, 2008), 属于第一阶段. 位于塔北隆起西部的玄武岩, 其直接的年龄资料较少, 但其中的流纹岩夹层限定了玄武岩形成时代约为288~286Ma(Tian等, 2010; 陈咪咪等, 2010; Liu等, 2014), 因此判断塔北

图2 塔里木大火成岩省的主要火成岩类年龄分布图

(a) 分布于柯坪、塔西南、塔中地区的玄武岩(即Group1玄武岩)的定年结果; (b) 分布于塔北隆起西部钻井中的玄武岩(即Group2玄武岩)、流纹岩、英安岩等的定年结果; (c) 分布于巴楚小海子和瓦基里塔格地区的基性-超基性杂岩体、酸性岩、碱性岩等的定年结果. 年龄数据主要参考Cheng等(2015)、Zou等(2015)和Zhang等(2016)的最新研究成果以及Shangguan等(2016)整理的年龄资料. 所采用的年龄数据均限于二叠纪年龄范围之内, 并且对测试误差较大的样品进行了剔除. 由于年龄数据比较少且分散, 尚未包含吐哈盆地、库鲁克塔格及皮羌等地区的二叠纪火成岩年龄资料. 灰黑色直方图代表锆石U-Pb年龄, 条纹状直方图部分为K-Ar和⁴⁰Ar-³⁹Ar年龄数据

玄武岩和部分流纹岩同属于第一阶段(图2b).

第二阶段以巴楚小海子和瓦基里塔格地区的侵入岩为代表, 年龄为~280Ma(图2c), 具体包括辉石岩、辉长岩、闪长岩、正长岩和正长斑岩等(李勇等, 2007; 张洪安等, 2009; Li等, 2011; 位荀和徐义刚, 2011; Zou等, 2015; Shangguan等, 2016). 塔北地区的流纹岩有两类, 除了第一阶段, 同时发育第二阶段的流纹岩, 年龄为283~272Ma(Tian等, 2010; 上官时迈等, 2011; Liu等,

2014). 塔里木早二叠世辉绿岩分布很广, 且穿插于不同的火成岩或地层之中, 年龄跨度较大, 为281~225Ma(李昌年等, 2001; 李勇等, 2007; 张自力等, 2008; 张洪安等, 2009; Zou等, 2015), 属于第二阶段或略晚于第二阶段的岩浆作用产物. 瓦基里塔格霞石岩的金红石U-Pb年龄为 (268 ± 30) Ma(Cheng等, 2015), 分析误差较大, 但结合野外的产状可初步判断其属于第二阶段的岩浆产物. Zhang C L等(2010)、Zhang和Zou(2013)和Huang等(2012)认为皮羌地区的超镁铁岩和哈拉峻的A型花岗岩也属于同期的岩浆事件, Zhang等(2016)利用锆石U-Pb定年方法测得皮羌辉长岩的年龄为~275Ma, 大体上属于第二阶段的岩浆活动.

巴楚瓦基里塔格金伯利岩的成因比较复杂(姜常义等, 2004c; 励音骐等, 2010), 其形成年龄尚存在一定的争议(李昌年等, 2001; Zhang等, 2013), 并且金伯利岩与大火成岩省的相关性问题也受到质疑(Sun等, 2014), 因此目前难以判断瓦基里塔格金伯利岩与两阶段岩浆作用的关系.

3.2 大火成岩省的总体地球化学特征

3.2.1 两类玄武岩

塔里木大火成岩省的玄武岩可分为两类: Group1

玄武岩和Group2玄武岩, 两者具有明显不同的地球化学特征(余星, 2009; Li Z L等, 2012). Group1玄武岩是指广泛分布于盆地内部具有柯坪玄武岩特征的玄武岩, 典型出露区位于柯坪、夏河南、塔西南等露头以及塔中22井、和4井等. Group2玄武岩是指分布于塔北隆起西部钻井中的玄武岩, 典型样品来源于英买5井、英买8井、羊塔6井、胜利1井等(图1). Group1玄武岩多为无斑隐晶质结构, 局部含少量斜长石斑晶, 个别层位玄武岩发育气孔和杏仁体构造, 岩石矿物组成为斜长石、单斜辉石和橄榄石, 副矿物为磁铁矿等, 次生矿物为伊丁石、蛇纹石、绿泥石等(余星, 2009; Li Z L等, 2012). Group2玄武岩含普通辉石、橄榄石和斜长石斑晶, 其中以单斜辉石主, 基质为间粒结构、微晶结构或玻璃质结构(Tian等, 2010; Li Z L等, 2012).

两类玄武岩的主量元素、微量元素和同位素组成均存在明显的差异(图3~8). 根据TAS图解和Nb/Y-Zr/TiO₂综合判别结果, Group1玄武岩和Group2玄武岩均为碱性玄武岩, 且Group2玄武岩碱性程度更高(余星, 2009; Li Y Q等, 2014). Group1玄武岩具有相对Group2玄武岩较高的TiO₂、Fe₂O₃和P₂O₅, 较低的SiO₂和Mg[#](Li Z L等, 2012). Group1玄武岩和Group2玄武岩的主量元素相关性较差, 不能用同一母岩浆的结晶

图3 塔里木两类玄武岩及辉绿岩的主量元素对比图

虚线示意两类玄武岩的主量元素分布界线. 巴楚辉绿岩包括出露于巴楚小海子地区和瓦基里塔格地区的辉绿岩岩墙, 柯坪辉绿岩指出露于柯坪的辉绿岩岩墙. 主量元素数据来源于厉子龙等(2008)、余星(2009)、Yu等(2011)和Li Y Q等(2012, 2014)

图4 塔里木两类玄武岩及辉绿岩的稀土元素、微量元素配分型式

数据来源同图3. 灰色阴影区代表Group1玄武岩的稀土元素和微量元素特征. 用于标准化的球粒陨石稀土元素数据来源于Sun和McDonough (1989), 原始地幔微量元素数据来源于McDonough和Sun(1995). OIB、E-MORB、N-MORB的稀土元素和微量元素丰度数据均来源于Sun和McDonough(1989)

图5 塔里木早二叠世基性火成岩的Sm/Yb-Sm图解

数据来源同图3, 含斜条纹的方框代表MgO含量大于7.0wt.%的样品. 灰色区域为苦橄岩(Tian等, 2010). 部分熔融模式参考Shaw(1970)的非分批式熔融方程, 稀土元素分配系数来源于McKenzie和O'Nions(1991). PM和N-MORB成分数据来源于Sun和McDonough(1989), TAM为最佳拟合的塔里木玄武岩地幔源区

分异来解释, 两者的岩浆来源不同, 即源区或熔融过程存在差异, 或者经历了地壳混染.

Group1玄武岩和Group2玄武岩的微量元素(包括稀土元素)组成也存在明显差异. 两类玄武岩均具有类似洋岛玄武岩(OIB)的微量元素特征(Zhou等, 2009; Zhang Y T等, 2010), 但Group2玄武岩的稀土元素和微量元素配分型式相对于Group1玄武岩更接近于OIB, 表明其与地幔柱更紧密的联系(图4a和b). Group2玄武岩的重稀土元素相对更亏损, 轻、重稀土元素比值更高, 表明Group2玄武岩源区可能残留有石榴石相, 地幔源区深度大. 利用稀土元素反演, 可以揭示两类玄武岩的岩浆熔融过程(如Sm/Yb-Sm图解). Group1玄武岩来源于岩石圈地幔尖晶石-石榴石(1:1)二辉橄榄岩的部分熔融, 来源较浅, 按较原始岩浆(MgO含量在8wt.%左右)的反演结果熔融程度约7%; Group2玄武岩源区更接近石榴石二辉橄榄岩, 来源较深, 熔融程度约

图6 塔里木两类玄武岩及辉绿岩的微量元素特征

数据来源同图3. MORB、PM(Primitive Mantle)和OIB微量元素数据参照Sun和McDonough(1989), 上地壳(UC)和下地壳(LC)成分参考Taylor等(1981)

图7 塔里木大火成岩省的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 与 SiO_2 关系图解

数据来源同图3

5%(图5). 微量元素比值关系图(如图6, Ce/Nb-Ce/Zr和Zr/Y-Nb/Zr)也直观地显示Group2玄武岩和Group1玄武岩的差异, Group2玄武岩具有更高的Nb/Zr, Zr/Y比值, 并在相同Ce/Zr比值条件下具有比Group1玄武岩更低的Ce/Nb比值, 与OIB更接近(图6a和6b). 两类玄武岩的微量元素组成差异同样难以用同一母岩浆的分离结晶作用来解释, 母岩浆的成分受由源区特征、部分熔融程度、地壳混染等因素影响(图4~6). 稀土元素特征表明两类玄武岩的熔融程度相关不大, 即两者的地球化学差异主要源于地幔源区的不同或地壳混染作用. 根据 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - SiO_2 关系图, 随 SiO_2 含量变化, Group1玄武岩和Group2玄武岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化均很小(图7), 表明两类玄武岩所经历的地壳混染作用较小, 不足以引起

图8 两类玄武岩及辉绿岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解

塔里木玄武岩和辉绿岩数据来源同图3. 巴楚瓦基里塔格杂岩体数据来源于姜常义等(2004c)、Cao等(2014)、Zhang C L等(2008, 2010)、Zou等(2015)、Cheng等(2015); 塔里木基底数据来自Zhang等(2017); 地幔端元(如DM、OIB、EMI、EMII)来源于Zindler和Hart(1986); 其他大火成岩省的同位素数据分别为: 峨眉山玄武岩(Chung和Jahn, 1995), 西伯利亚暗色岩(Wooden等, 1993), 德干暗色岩(Peng等, 1998), 巴哈纳溢流玄武岩(Peate等, 1990)

两类玄武岩的地球化学差异. 这与Zhang等(2017)的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ -Ce/Pb判断结果相吻合, 塔里木玄武岩没有受到显著的上地壳或下地壳的混染作用, 两类玄武岩的地球化学差异主要源于地幔源区的不同.

两类玄武岩的同位素组成特征明显不同. Group1玄武岩具有明显负的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-4.95~-1.83), 较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值, 与富集的大陆岩石圈地幔有关(姜常义等, 2004a); 而Group2玄武岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值在全硅酸盐

地球(BSE)附近, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值较低,处于OIB同位素分布范围,可能指示与地幔柱活动有关(图8). 两类玄武岩的Sr-Nd同位素特征进一步证实其来源于不同的地幔源区. 将两类玄武岩与全球其他典型的大陆溢流玄武岩相比较,发现Group1玄武岩的同位素特征与南美洲的巴哈纳溢流玄武岩相似,指示类似“巴哈纳型”的成因模式(Turner等, 1996; Peate, 1997),而Group2玄武岩包含于德干暗色岩的同位素分布范围,指示类似“德干型”的成因模式(图8).

3.2.2 两类辉绿岩

与两类玄武岩相类似,广泛分布于塔里木盆地西部的早二叠世基性侵入岩—辉绿岩也具有不同的地球化学特征(余星, 2009). 分布于柯坪地区的辉绿岩稀土元素配分曲线比较平缓,而巴楚地区(包括小海子和瓦基里塔格地区)的辉绿岩轻稀土元素和重稀土元素分异更明显,曲线较陡(图4). 柯坪辉绿岩和巴楚辉绿岩具有不同的Ce/Nb、Ce/Zr、Zr/Y、Nb/Zr等微量元素比值,并且分别与Group1玄武岩和Group2玄武岩相对应(图6). 稀土元素和微量元素特征显示巴楚辉绿岩相对柯坪辉绿岩富集不相容元素,表明其岩浆相对富集. 不过部分巴楚辉绿岩样品显示了与柯坪辉绿岩相似的稀土元素配分模式,表明两类辉绿岩的区分界线不明显,暗示了塔里木早二叠世辉绿岩的地球化学组成呈现渐变特征.

辉绿岩的同位素特征表明柯坪辉绿岩与巴楚辉绿岩具有连续变化的Sr-Nd同位素组成,即区分不明显. 柯坪辉绿岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为-4.1~-4.0, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值0.7048~0.7074,巴楚辉绿岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为-2.5~-5.2, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值0.7036~0.7068,两者的同位素比值跨度均较大,且相互交叠(图8). Sr-Nd同位素特征显示塔里木早二叠世辉绿岩可能是由两个不同端元混合而成,具体表现为不同地幔源区的混合或是地壳混染. 两个可能的地幔源区对应于Group1玄武岩代表的富集端元(姜常义等, 2004a; Zhou等, 2009; Yu等, 2011; Wei等, 2014a; Li Y Q等, 2014)和巴楚瓦基里塔格杂岩体代表的亏损端元(姜常义等, 2004c; Cao等, 2014; Zhang C L等, 2008, 2010; Zou等, 2015; Cheng等, 2015). 另一方面,辉绿岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 SiO_2 含量呈现一定的负相关关系(图7),表明来源于亏损地幔的辉绿岩同时经历了地壳富集组分的混染改造(Yu等, 2011).

3.2.3 基性-超基性杂岩体和酸性岩

出露于巴楚瓦基里塔格的基性-超基性杂岩体具有亏损的地幔源区特征,其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为0.16~5.4, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值0.7032~0.7065(图8). 瓦基里塔格杂岩体及其相关的火成岩包括辉石岩(Cao等, 2014)、辉长岩(Zhang C L等, 2008; Cao等, 2014)、闪长岩(Zou等, 2015)、正长岩(Zhang C L等, 2008; Zou等, 2015)、霞石岩(Cheng等, 2015)等,均具有亏损的Sr-Nd同位素组成特征,指示来源于亏损的地幔源区. 瓦基里塔格爆破角砾岩(姜常义等, 2004c)或金伯利质岩(Zhang等, 2013)也具有亏损的源区特征,尽管金伯利质岩与塔里木大火成岩省的关系有待进一步确认. 同时期分布于巴楚小海子地区的正长岩体和正长斑岩岩脉等也具有亏损的Sr-Nd同位素特征,与瓦基里塔格杂岩体具有相似的地幔源区(姜常义等, 2004b; 余星, 2009; 位荀和徐义刚, 2011; Wei等, 2014b). 哈拉峻杂岩体(包括皮羌杂岩体)的年龄与第二阶段岩浆作用相似, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为-2.9~-2.08(Zhang C L等, 2010; Huang等, 2012). 塔北隆起西部钻井中的流纹岩可分为两类,时间上分别对应于两期岩浆活动,且Sr-Nd同位素特征也相符,第一阶段流纹岩亏损Nb和Ta, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为-7.7~-4.2,第二阶段流纹岩富集Nb和Ta, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为-3.4~-1.3(Tian等, 2010; Liu等, 2014).

4 塔里木大火成岩省成因——“塔里木模式”

随着塔里木大火成岩省研究工作的不断推进,其成因模式的研究越来越受关注(余星, 2009; Zhang C L等, 2010; Wei等, 2014a; Xu等, 2014; 杨树锋等, 2014; Zou等, 2015; Cheng等, 2015). 余星(2009)根据两类玄武岩的地球化学差异提出了两阶段岩浆作用模式,认为塔北玄武岩(Group2)应该晚于柯坪玄武岩(Group1),是地幔柱部分熔融的产物. 不过目前已有的年龄资料,不能支持两者的形成先后顺序,而可能为同期岩浆作用的产物(Tian等, 2010; 陈咪咪等, 2010). Zhang C L等(2010)认为塔里木玄武岩来源于富集岩石圈地幔,而基性岩墙和其他侵入岩则由岩石圈下软流圈地幔部分熔融的岩浆演化而来. 不过塔里木玄武岩本身可以分为Group1和Group2两个类别,两者具有不同的微量元素和同位素组成特征,源区组成可能存在差异. Xu等(2014)和Wei等(2014a)考虑了金伯利质岩的最新定年结果提出了塔里木大火成岩省三阶段成因模式,即

金伯利质岩(~300Ma)来源于被交代的岩石圈地幔底部, 溢流玄武岩(~290Ma)来源于大陆岩石圈地幔熔体与地幔柱熔体的混合, 而晚期(~280Ma)的岩浆作用来源于软流圈地幔. Cheng等(2015)认为俯冲交代岩石圈底部形成金伯利质岩的地幔源区, 地幔柱-岩石圈相互作用产生了溢流玄武岩, 大陆岩石圈地幔熔融形成了晚期(~280Ma)侵入岩, 最晚期的瓦基里塔格霞石岩是受碳酸盐交代的软流圈地幔熔融的产物. 金伯利质岩和晚期岩脉均具有亏损的地幔源区特征, 这与Xu等(2014)认为的第一阶段和第三阶段具有不同源区的认识不符, 与Cheng等(2015)认为的俯冲交代岩石圈地幔(一般具有富集特征)也不一致. Zou等(2015)通过研究瓦基里塔格地区的基性岩墙、闪长岩和正长岩的成因, 认为塔里木大火成岩省的地幔源区经历了从富集(以EMII为主)到亏损(FOZO型地幔柱)的演变过程. 这一模型基本符合塔里木大火成岩省的总体演化特征, 不过在岩浆作用过程的细节阐述方面仍有待完善. 本文基于前人的研究成果, 综合分析塔里木早二叠世各主要火成岩类的时空分布、地球化学特征、沉积响应及岩墙群展布等研究成果, 提出塔里木大火成岩省成因的最简单模式——“塔里木二阶段熔融模式”, 简称“塔里木模式”(图9).

“塔里木模式”认为, 塔里木早二叠世大火成岩省主要由两个阶段的岩浆作用组成, 第一阶段主要包括Group1玄武岩和Group2玄武岩, 时代为~290Ma; 第二阶段主要包括巴楚小海子和瓦基里塔格地区的基性-超基性侵入岩、酸性侵入岩, 时代为~280Ma. 在第一阶段, 高热的地幔柱到达岩石圈底部, 加热富集的岩石圈地幔, 使岩石圈地幔先于地幔柱发生低程度部分熔

融, 形成Group1玄武岩. Group1玄武岩具有高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, 低 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, 富集大离子亲石元素和高场强元素等特征, 与俯冲交代的富集大陆岩石圈地幔源区相符(Cheng等, 2015). 由于岩石圈厚度差异, 上涌的地幔柱沿岩石圈底部侧向流动到岩石圈厚度较薄的地方, 使地幔柱发生局部小规模减压熔融, 并与岩石圈地幔熔融的产物发生相互作用形成Group2玄武岩. Group2玄武岩相对Group1玄武岩具有较高的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值和较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 显示较多的地幔柱组分信息, 为地幔柱和大陆岩石圈地幔相互作用的产物. 第一阶段流纹岩显示富集的同位素特征(Liu等, 2014), 由玄武质岩浆演化而成. 到第二阶段, 前期岩石圈地幔的部分熔融以及区域的拉张应力作用给地幔柱上升提供了更多空间, 在岩石圈厚度较薄的地区(包括盆地边缘和隆升剥蚀较严重的巴楚地区), 地幔柱本身发生部分熔融, 形成具有较低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值、高 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值($\epsilon_{\text{Nd}}(t) > 0$)的基性-超基性侵入岩, 以及由基性岩浆进一步演化而成的正长岩、霞石岩、流纹岩等酸性、碱性岩. 广泛分布于盆地内的辉绿岩具有两阶段岩浆作用的过渡地球化学特征, 其成因与岩石圈地幔和地幔柱的相互作用有关, 并经历了一定程度的地壳混染.

塔里木早二叠世大火成岩省的形成与地幔柱活动有关, 其地幔柱作用形式兼具“巴哈纳型”和“德干型”两种特点. 早期Group1玄武岩主要为富集岩石圈地幔熔融的产物, 地幔柱为上覆岩石圈熔融提供所需的热量, 属于“巴哈纳型”作用模式. 后期亏损型的基性-超基性侵入岩主要为地幔柱自身熔融的产物, 地幔柱同时提供了熔融所需的物质和热量, 属于“德干型”作用模式. Group2玄武岩和辉绿岩表现为两个模式的过渡

图9 塔里木大火成岩省的形成模式示意图

模型主要参考余星(2009)、Xu等(2014)和Liu等(2014)的研究成果, 并结合陈汉林等(2006)和Li D X等(2014)关于塔里木早二叠世的古地理资料. 蘑菇状的地幔柱模型参考Campbell(2005). C表示地壳, SCLM为大陆岩石圈地幔

类型,即为岩石圈地幔和地幔柱相互作用的结果.而零星分布于塔北地区的苦橄岩则代表基本全部来自地幔柱熔融的产物(Tian等, 2010).从岩浆产物的产状可以判断,第一阶段岩浆量大,产生的溢流玄武岩分布面积广,是高温的地幔柱与富集的岩石圈地幔相互配合产生较大规模、较长时间、多期次、持续熔融的结果.第二阶段岩浆量相对较小,可能有两方面的原因.一方面,地幔柱在前期第一阶段供热过程中损失了较多的能量,被动上升减压熔融的规模和程度有限.另一方面,第二阶段岩浆作用明显受控于盆地内区域拉张应力作用,与岩石圈厚度密切相关,仅在岩石圈相对薄弱的地带以岩墙、岩脉及岩体的形式产出,如塔北和巴楚地区(Xu等, 2014; Wei等, 2014a).在巴楚隆起,由于地幔柱在岩石圈底部持续地热侵蚀以及地壳隆升使地表剥蚀减薄,而发生较大规模的基性-超基性岩浆侵入,形成巴楚小海子和瓦基里塔格的基性-超基性侵入岩,以及后期岩浆演化形成的酸性岩、碱性岩(杨树锋等, 1996; Yang等, 2007).

5 “塔里木模式”需要进一步论证的几个方面

根据已有的塔里木早二叠世大火成岩省的研究结果,“塔里木模式”提供了比较简洁的解释方案,从整体上有效地协调了各类火成岩时空分布、地球化学特征等方面的证据,同时对两类玄武岩及辉绿岩的成因进行了解释.两阶段的岩浆作用符合区域构造应力及地球动力学背景,符合深部软流圈地幔(地幔柱)与岩石圈地幔相互作用的经验模式.不过,塔里木早二叠世的火成岩岩石组合比较复杂,空间分布不集中,时代分布较散,岩石地球化学组成多样,关于大火成岩省成因的更多细节问题依然有待进一步论证.

Group2玄武岩与Group1玄武岩的时代关系.目前Group1玄武岩的喷发年龄已获得了较好的约束(李勇等, 2007; 厉子龙等, 2008; 张洪安等, 2009; 张达玉等, 2010; Tian等, 2010; Yu等, 2011; Wei等, 2014a),但Group2玄武岩由于主要分布于塔北地区的钻井中,所取得的岩芯相对较少,年龄数据较少(陈咪咪等, 2010; Tian等, 2010),其精确年龄以及与Group1玄武岩的接触关系有待进一步确定.Group2玄武岩和Group1玄武岩的时代关系将为揭示岩石圈地幔熔融及地幔柱熔

融的先后序列、发生期次以及熔融过程提供约束.

辉绿岩形成过程中的地壳混染与源区混合效应.柯坪辉绿岩与巴楚辉绿岩均具有较分散的Sr-Nd同位素组成,且 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 显示与 SiO_2 含量的正相关关系,表明存在地壳混染或源区混合过程.由于辉绿岩分布较广,年龄数据比较稀缺而且不集中(李昌年等, 2001; 李勇等, 2007; 张洪安等, 2009; 刘亚雷等, 2012; Zou等, 2015),无法准确判定辉绿岩产出的时空分布特征,从而难以讨论不同期次或不同区域辉绿岩受地壳混染的程度、源区混合的可能性及程度.因此,有关辉绿岩形成的细节过程有赖于更精确的年龄数据和地球化学资料的积累.

超基性侵入岩和喷出岩的成因问题.塔里木发现的超基性岩包括塔北的苦橄岩(Tian等, 2010)、小海子橄辉岩(杨树锋等, 2007)、瓦基里塔格爆破角砾岩(励音骐等, 2010)、辉石岩(Li Y Q等, 2012)等.由于超基性岩定年方法的限制,并且缺少可观测的与玄武岩、正长岩等的直接接触关系,超基性岩的形成时间难以准确约束,阻碍了其成因模式的研究.Xu等(2014)根据Zhang等(2013)对爆破角砾岩斜锆石、钙钛矿的定年结果认为超基性岩是塔里木大火成岩省的初始岩浆作用产物.不过仍需要提供更多关于其他超基性岩的年龄资料和地球化学数据,验证超基性岩的成岩过程.

塔里木早二叠世大火成岩省形成的详细构造背景.目前模型认为玄武岩喷发主要集中在第一阶段,而侵入岩类主要在第二阶段.不同岩浆作用形式受控于深部地质过程以及区域构造动力学背景.玄武岩的主动式喷发指示深部熔融规模较大,岩浆量充足,喷发压力大;而后期岩墙岩脉的形成则指示了区域的应力松弛,显示张裂环境,这种应力的释放可能与深部岩浆活动密切相关,同时也与区域的大地构造背景相联系.有必要结合同时期周边区域及更大尺度的构造活动,综合讨论塔里木早二叠世的构造-岩浆作用事件.

6 结语

塔里木大火成岩省的成因模式得益于近20年来塔里木大火成岩省的研究成果和地质发现,其理论意义除了合理解释已有的地质观察之外,更在于为全面认识塔里木大火成岩省的岩浆作用过程提供思路,为揭示大火成岩省发生的内在因素提供参考.塔里木二阶段熔融的简单模式可以有效地引导后续塔里木大

火成省岩的研究工作,同时新的研究成果和地质发现将使模式愈加完善.塔里木大火成岩省成因模式的研究将了解早二叠世前后区域的构造-岩浆作用事件提供直接证据,为丰富大火成岩省的成因理论和地幔柱活动理论提供有效的素材.

致谢 塔里木油田公司在塔里木大火成岩省研究过程中提供了野外考察及钻井资料获取等多方面的便利,论文写作过程中得到徐义刚研究员、张招崇教授、赵振华研究员等的启发和帮助,匿名审稿专家多次耐心细致地为本文提供众多宝贵的修改意见,在此一并表示诚挚的感谢.

参考文献

- 陈汉林,杨树锋,王清华,罗俊成,贾承造,魏国齐,厉子龙,何光玉,胡安平. 2006. 塔里木板块早-中二叠世玄武质岩浆作用的沉积响应. *中国地质*, 33: 545-553
- 陈咪咪,田伟,张自力. 2010. 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. *岩石学报*, 26: 559-572
- 姜常义,张蓬勃,卢登蓉,白开寅,王瑶培,唐索寒,王进辉,杨淳. 2004a. 柯坪玄武岩的岩石学、地球化学、Nd、Sr、Pb同位素组成与岩石成因. *地质论评*, 50: 492-500
- 姜常义,贾承造,李良辰,张蓬勃,卢登蓉,白开寅. 2004b. 新疆麻扎尔塔格地区铁富集型高镁岩浆的源区. *地质学报*, 78: 770-780
- 姜常义,张蓬勃,卢登蓉,白开寅. 2004c. 新疆塔里木板块西部瓦吉里塔格地区二叠纪超镁铁岩的岩石成因与岩浆源区. *岩石学报*, 20: 1433-1444
- 李昌年,路凤香,陈美华. 2001. 巴楚瓦吉里塔格火成杂岩体岩石学研究. *新疆地质*, 19: 38-42
- 李勇,苏文,孔屏. 2007. 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. *岩石学报*, 23: 1097-1107
- 厉子龙,杨树锋,陈汉林,Langmuir C H,余星,林秀彬,励音骐. 2008. 塔西南玄武岩年代学和地球化学特征及其对二叠纪地幔柱岩浆演化的制约. *岩石学报*, 2: 959-970
- 励音骐,厉子龙,孙亚莉,陈汉林,杨树锋,余星. 2010. 里木瓦吉里塔格超镁铁质隐爆角砾岩铂族元素和微量元素地球化学特征及其岩石成因探讨. *岩石学报*, 26: 3307-3317
- 刘亚雷,胡秀芳,黄智斌,吴根耀,郑多明,申银民,赵岩,李曰俊. 2012. 塔里木盆地塔北隆起西部火山岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学和地球化学特征. *岩石学报*, 28: 2423-2434
- 上官时迈,田伟,李献华,关平,潘懋,陈咪咪,潘文庆. 2011. 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. *北京大学学报(自然科学版)*, 3: 561-564
- 位荀,徐义刚. 2011. 塔里木巴楚小海子正长岩杂岩体的岩石成因探讨. *岩石学报*, 27: 2984-3004
- 徐义刚,何斌,罗震宇,刘海泉. 2013. 我国大火成岩省和地幔柱研究进展与展望. *矿物岩石地球化学通报*, 32: 25-39
- 杨树锋,陈汉林,董传万,贾承造,汪振国. 1996. 塔里木盆地二叠纪正长岩的发现及其地球动力学意义. *地球化学*, 25: 121-128
- 杨树锋,余星,陈汉林,厉子龙,王清华,罗俊成. 2007. 塔里木盆地巴楚小海子二叠纪超基性脉岩的地球化学特征及其成因探讨. *岩石学报*, 23: 1087-1096
- 杨树锋,陈汉林,厉子龙,励音骐,余星,李东旭,孟立丰. 2014. 塔里木早二叠世大火成岩省. *中国科学: 地球科学*, 44: 187-199
- 余星. 2009. 塔里木早二叠世大火成岩省的岩浆演化与深部地质作用. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学. 1-130
- 余星,杨树锋,陈汉林,厉子龙,励音骐,丘志力. 2017. 塔里木盆地夏河南层状玄武岩的岩石地球化学特征及地质意义. *岩石学报*, 33: 1729-1740
- 张达玉,周涛发,袁峰,范裕,刘帅,杜红星. 2010. 塔里木柯坪地区库普库兹曼组玄武岩锆石LA-ICPMS年代学、Hf同位素特征及其意义. *岩石学报*, 26: 963-974
- 张洪安,李曰俊,吴根耀,苏文,钱一雄,孟庆龙,蔡习尧,韩利军,赵岩,刘亚雷. 2009. 塔里木盆地二叠纪火成岩的同位素年代学. *岩石学报*, 44: 137-158
- 张招崇,董书云. 2007. 大火成岩省是地幔柱作用引起的吗? *现代地质*, 21: 247-254
- 张自力,秦其明,田伟,曹宝,李百寿,陈咪咪. 2008. 塔里木麻扎尔塔格基性岩墙群的侵位特征和空间分布规律研究. *岩石学报*, 24: 2273-2280
- Campbell I H. 2005. Large igneous provinces and the mantle plume hypothesis. *Elements*, 1: 265-269
- Campbell I H, Griffiths R W. 1990. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts. *Earth Planet Sci Lett*, 99: 79-93
- Cao J, Wang C Y, Xing C M, Xu Y G. 2014. Origin of the Early Permian Wajilitag igneous complex and associated Fe-Ti oxide mineralization in the Tarim large igneous province, NW China. *J Asian Earth Sci*, 84: 51-68
- Chen M M, Tian W, Suzuki K, Tejada M L G, Liu F L, Senda R, Wei C J, Chen B, Chu Z Y. 2014. Peridotite and pyroxenite xenoliths from Tarim, NW China: Evidences for melt depletion and mantle refertilization in the mantle source region of the Tarim flood basalt. *Lithos*, 204: 97-111
- Cheng Z G, Zhang Z C, Hou T, Santosh M, Zhang D, Ke S. 2015. Petrogenesis of nephelinites from the Tarim Large Igneous Province, NW China: Implications for mantle source characteristics and plume-lithosphere interaction. *Lithos*, 220-223: 164-178
- Cheng Z G, Zhang Z C, Santosh M, Hou T, Zhang D. 2014. Carbonate- and silicate-rich globules in the kimberlitic rocks of northwestern

- Tarim large igneous province, NW China: Evidence for carbonated mantle source. *J Asian Earth Sci*, 95: 114–135
- Chung S L, Jahn B. 1995. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary. *Geology*, 23: 889–892
- Duncan R A, Pyle D G. 1988. Rapid eruption of the Deccan flood basalts at the Cretaceous/Tertiary boundary. *Nature*, 333: 841–843
- Ernst R E. 2015. Large Igneous Provinces. Cambridge: Cambridge University Press. 653
- Hagstrum J T. 2005. Antipodal hotspots and bipolar catastrophes: Were oceanic large-body impacts the cause? *Earth Planet Sci Lett*, 236: 13–27
- Hastie W W, Watkeys M K, Aubourg C. 2014. Magma flow in dyke swarms of the Karoo LIP: Implications for the mantle plume hypothesis. *Gondwana Res*, 25: 736–755
- Huang H, Zhang Z, Kusky T, Santosh M, Zhang S, Zhang D, Liu J, Zhao Z. 2012. Continental vertical growth in the transitional zone between South Tianshan and Tarim, western Xinjiang, NW China: Insight from the Permian Halajun A1-type granitic magmatism. *Lithos*, 155: 49–66
- Ingle S, Coffin M F. 2004. Impact origin for the greater Ontong Java Plateau? *Earth Planet Sci Lett*, 218: 123–134
- Jones A P. 2005. Meteorite impacts as triggers to large igneous provinces. *Elements*, 1: 277–281
- Keskin M. 2003. Magma generation by slab steepening and breakoff beneath a subduction-accretion complex: An alternative model for collision-related volcanism in Eastern Anatolia, Turkey. *Geophys Res Lett*, 30: 8046
- King S D, Anderson D L. 1995. An alternative mechanism of flood basalt formation. *Earth Planet Sci Lett*, 136: 269–279
- King S D, Anderson D L. 1998. Edge-driven convection. *Earth Planet Sci Lett*, 160: 289–296
- Li D X, Yang S F, Chen H, Cheng X, Li K, Jin X, Li Z, Li Y, Zou S. 2014. Late Carboniferous crustal uplift of the Tarim plate and its constraints on the evolution of the Early Permian Tarim Large Igneous Province. *Lithos*, 204: 36–46
- Li Y Q, Li Z L, Chen H L, Yang S F, Yu X. 2012. Mineral characteristics and metallogenesis of the Wajilitag layered mafic-ultramafic intrusion and associated Fe-Ti-V oxide deposit in the Tarim large igneous province, northwest China. *J Asian Earth Sci*, 49: 161–174
- Li Y Q, Li Z L, Yu X, Langmuir C H, Santosh M, Yang S F, Chen H L, Tang Z L, Song B, Zou S Y. 2014. Origin of the Early Permian zircons in Keping basalts and magma evolution of the Tarim Large Igneous Province (northwestern China). *Lithos*, 204: 47–58
- Li Z L, Chen H L, Song B, Li Y, Yang S, Yu X. 2011. Temporal evolution of the Permian large igneous province in Tarim Basin in northwestern China. *J Asian Earth Sci*, 42: 917–927
- Li Z L, Li Y Q, Chen H L, Santosh M, Yang S, Xu Y, Langmuir C H, Chen Z, Yu X, Zou S. 2012. Hf isotopic characteristics of the Tarim Permian large igneous province rocks of NW China: Implication for the magmatic source and evolution. *J Asian Earth Sci*, 49: 191–202
- Liu H Q, Xu Y G, Tian W, Zhong Y T, Mundil R, Li X H, Yang Y H, Luo Z Y, Shang-Guan S M. 2014. Origin of two types of rhyolites in the Tarim Large Igneous Province: Consequences of incubation and melting of a mantle plume. *Lithos*, 204: 59–72
- Mahoney J J, Duncan R A, Khan W, Gnos E, McCormick G R. 2002. Cretaceous volcanic rocks of the South Tethyan suture zone, Pakistan: Implications for the Réunion hotspot and Deccan Traps. *Earth Planet Sci Lett*, 203: 295–310
- McDonough W F, Sun S. 1995. The composition of the Earth. *Chem Geol*, 120: 223–253
- McKenzie D, O’Nions R K. 1991. Partial melt distributions from inversion of rare Earth element concentrations. *J Petrol*, 32: 1021–1091
- Peate D W, Hawkesworth C J, Mantovani M S M, Shukowsky W. 1990. Mantle plumes and flood-basalt stratigraphy in the Paraná, South America. *Geology*, 18: 1223–1226
- Peate D W. 1997. The Paraná-Etendeka Province. In: Mahoney J, Coffin B, eds. Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism. AGU Geophys Monogr, 100: 217–245
- Peng Z X, Mahoney J J, Hooper P R, MacDougall J D, Krishnamurthy P. 1998. Basalts of the northeastern Deccan Traps, India: Isotopic and elemental geochemistry and relation to southwestern Deccan stratigraphy. *J Geophys Res*, 103: 29843–29865
- Sen G, Bizimis M, Das R, Paul D K, Ray A, Biswas S. 2009. Deccan plume, lithosphere rifting, and volcanism in Kutch, India. *Earth Planet Sci Lett*, 277: 101–111
- Shangguan S, Peate I U, Tian W, Xu Y. 2016. Re-evaluating the geochronology of the Permian Tarim magmatic province: Implications for temporal evolution of magmatism. *J Geol Soc*, 173: 228–239
- Shaw D M. 1970. Trace element fractionation during anatexis. *Geochim Cosmochim Acta*, 34: 237–243
- Sun J, Liu C Z, Tappe S, Kostrovitsky S I, Wu F Y, Yakovlev D, Yang Y H, Yang J H. 2014. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: Insights from *in situ* U-Pb and Sr-Nd perovskite isotope analysis. *Earth Planet Sci Lett*, 404: 283–295
- Sun S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 42: 313–345
- Taylor S R, McLennan S M, Armstrong R L, Tarney J. 1981. The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evi-

- dence from sedimentary rocks. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 301: 381–399
- Tian W, Campbell I H, Allen C M, Guan P, Pan W, Chen M, Yu H, Zhu W. 2010. The Tarim picrate-basalt-rhyolite suite, a Permian flood basalt from northwest China with contrasting rhyolites produced by fractional crystallization and anatexis. *Contrib Mineral Petrol*, 160: 407–425
- Turner S, Hawkesworth C, Gallagher K, Stewart K, Peate D, Mantovani M. 1996. Mantle plumes, flood basalts, and thermal models for melt generation beneath continents: Assessment of a conductive heating model and application to the Paraná. *J Geophys Res*, 101: 11503–11518
- Wei X, Xu Y G, Feng Y X, Zhao J X. 2014a. Plume-lithosphere interaction in the generation of the Tarim large igneous province, NW China: Geochronological and geochemical constraints. *Am J Sci*, 314: 314–356
- Wei X, Xu Y G, Zhang C L, Zhao J X, Feng Y X. 2014b. Petrology and Sr-Nd isotopic disequilibrium of the Xiaohaizi intrusion, NW China: Genesis of layered intrusions in the tarim large igneous province. *J Petrol*, 55: 2567–2598
- Wei X, Xu Y G, Luo Z Y, Zhao J X, Feng Y X. 2015. Composition of the Tarim mantle plume: Constraints from clinopyroxene antecrysts in the early Permian Xiaohaizi dykes, NW China. *Lithos*, 230: 69–81
- Wei X, Xu Y G, Ren Z Y, Luo Z Y. 2016. Origin of high-An plagioclase in the early Permian (~280 Ma) Xiaohaizi wehrlite, Northwest China: Insights from melt inclusions in clinopyroxene macrocrysts and zircon oxygen isotopes. *Int Geol Rev*, 58: 1005–1019
- Wooden J L, Czamanske G K, Fedorenko V A, Arndt N T, Chauvel C, Bouse R M, King B S W, Knight R J, Siems D F. 1993. Isotopic and trace-element constraints on mantle and crustal contributions to Siberian continental flood basalts, Noril'sk area, Siberia. *Geochim Cosmochim Acta*, 57: 3677–3704
- Xu Y G, He B, Huang X, Luo Z Y, Chung S L, Xiao L, Zhu D, Shao H, Fan W M, Xu J F, Wang Y J. 2007. Identification of mantle plumes in the Emeishan large igneous province. *Episodes*, 30: 32–42
- Xu Y G, Wei X, Luo Z Y, Liu H Q, Cao J. 2014. The Early Permian Tarim large igneous province: Main characteristics and a plume incubation model. *Lithos*, 204: 20–35
- Yang S F, Li Z L, Chen H L, Dong C W, Yu X. 2006. Permian large volume basalts in Tarim basin. In: June 2006 LIP of the Month, LIP record. <http://www.largeigneousprovinces.org/06june.html>
- Yang S F, Li Z L, Chen H L, Santosh M, Dong C W, Yu X. 2007. Permian bimodal dyke of Tarim Basin, NW China: Geochemical characteristics and tectonic implications. *Gondwana Res*, 12: 113–120
- Yu X, Yang S F, Chen H L, Chen Z Q, Li Z L, Batt G E, Li Y Q. 2011. Permian flood basalts from the Tarim Basin, Northwest China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics. *Gondwana Res*, 20: 485–497
- Zhang C L, Li X H, Li Z X, Ye H M, Li C N. 2008. A Permian layered intrusive complex in the Western Tarim Block, northwestern China: Product of a ca. 275 Ma mantle plume? *J Geol*, 116: 269–287
- Zhang C L, Xu Y G, Li Z X, Wang H Y, Ye H M. 2010. Diverse Permian magmatism in the Tarim Block, NW China: Genetically linked to the Permian Tarim mantle plume? *Lithos*, 119: 537–552
- Zhang C L, Zou H B. 2013. Permian A-type granites in Tarim and western part of Central Asian Orogenic Belt (CAOB): Genetically related to a common Permian mantle plume? *Lithos*, 172–173: 47–60
- Zhang D Y, Zhang Z C, Santosh M, Cheng Z G, He H, Kang J. 2013. Perovskite and baddeleyite from kimberlitic intrusions in the Tarim large igneous province signal the onset of an end-Carboniferous mantle plume. *Earth Planet Sci Lett*, 361: 238–248
- Zhang D Y, Zhang Z C, Mao J W, Huang H, Cheng Z G. 2016. Zircon U-Pb ages and Hf-O isotopic signatures of the Wajilitag and Puchang Fe-Ti oxide-bearing intrusive complexes: Constraints on their source characteristics and temporal-spatial evolution of the Tarim large igneous province. *Gondwana Res*, 37: 71–85
- Zhang Y T, Liu J Q, Guo Z F. 2010. Permian basaltic rocks in the Tarim basin, NW China: Implications for plume-lithosphere interaction. *Gondwana Res*, 18: 596–610
- Zhang Y, Wei X, Xu Y G, Long X P, Shi X F, Zhao J X, Feng Y X. 2017. Sr-Nd-Pb isotopic compositions of the lower crust beneath northern Tarim: insights from igneous rocks in the Kuluketage area, NW China. *Miner Petrol*, 111: 237–252
- Zhang Z C, Mahoney J J, Mao J W, Wang F S. 2006. Geochemistry of picritic and associated basalt flows of the western Emeishan flood basalt province, China. *J Petrol*, 47: 1997–2019
- Zhang Z C, Zhi X C, Chen L, Saunders A D, Reichow M K. 2008. Re-Os isotopic compositions of picrites from the Emeishan flood basalt province, China. *Earth Planet Sci Lett*, 276: 30–39
- Zhou M F, Zhao J H, Jiang C Y, Gao J F, Wang W, Yang S H. 2009. OIB-like, heterogeneous mantle sources of Permian basaltic magmatism in the western Tarim Basin, NW China: Implications for a possible Permian large igneous province. *Lithos*, 113: 583–594
- Zindler A, Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 14: 493–571
- Zou S Y, Li Z L, Song B, Ernst R E, Li Y Q, Ren Z Y, Yang S F, Chen H L, Xu Y G, Song X Y. 2015. Zircon U-Pb dating, geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of the Wajilitag alkali mafic dikes, and associated diorite and syenitic rocks: Implications for magmatic evolution of the Tarim large igneous province. *Lithos*, 212–215: 428–442