中国科学: 地球科学 2014 年 第 44 卷 第 2 期: 187 ~ 199
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

评 述

塔里木早二叠世大火成岩省

杨树锋[①], 陈汉林[①*], 厉子龙[①], 励音骐[①], 余星[②], 李东旭[①], 孟立丰[①]

① 浙江大学地球科学系, 杭州 310027;
② 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012
* 联系人, E-mail: hlchen@zju.edu.cn

收稿日期: 2012-11-26; 接受日期: 2013-04-27; 网络版发表日期: 2014-01-13
国家自然科学基金重点项目(批准号: 40930315)和国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2007CB411303, 2011CB808902)资助

摘要 塔里木早二叠世大火成岩省是继峨眉山大火成岩省之后在中国境内确认的又一个大火成岩省, 是当前研究的热点和前沿问题. 论文系统总结了塔里木大火成岩省近 20 年研究取得的成果, 指出了下一步重点研究领域. 塔里木大火成岩省火山岩的残余分布面积大于 25 万平方公里, 最大残余厚度达 780 m, 大规模玄武岩的喷出发生在 290~288 Ma 期间, 属于快速喷发的大火成岩省岩浆事件. 塔里木大火成岩省中最为发育的玄武岩和辉绿岩岩墙的微量元素特征与 OIB 的特征相似, 且以高钛型为主体; 但在同位素特征上明显的可以分为两类, 柯坪地区玄武岩具有负的 ε_{Nd} 值, 重稀土值相对较高, 来自富集型地幔; 塔北玄武岩和辉绿岩具有正的 ε_{Nd} 值和相对低的重稀土值, 来自亏损型地幔. 早二叠世大规模地壳抬升、苦橄岩与大规模岩墙群发育和瓦基里塔格大型钒钛磁铁矿矿床都支持塔里木大火成岩省与地幔柱活动有关. 塔里木大火成岩省与中亚地区广泛发育的二叠纪基性和超基性岩浆作用存在着时空联系, 它们是代表了一次具有重要地球动力学意义的构造岩浆事件. 论文指出了塔里木大火成岩省的深部地质过程、成矿作用、与地幔柱关系、与盆地环境变化和生命演化的关系及其大火成岩省的地球动力学意义等方面研究将是下一阶段的重点研究领域.

关键词
塔里木盆地
早二叠世
大火成岩省
时空特征
岩浆演化
地幔柱

被天山造山带、昆仑造山带和阿尔金造山带所围绕的塔里木板块是中国境内的三大主要板块之一, 是连接中亚构造域和特提斯构造域重要纽带. 塔里木盆地是我国最大的含油气盆地, 具有丰富的石油和天然气资源, 是我国油气资源的战略接替区.

塔里木板块内部发育了大量由早二叠世板内岩浆作用所形成的、以基性岩类为主的岩浆岩(包括玄武岩、辉绿岩、玄武安山岩和超镁铁质岩类等). 岩浆岩的残余分布面积仅在板块西部约 25 万平方公里(图 1)(杨树锋等, 1994[1)], 1996, 2005[2)]; Yang 等, 2006, 2007;

1) 杨树锋, 陈汉林, 董传万, 等. 1994. 塔里木盆地古生代火山作用与地质热事件研究. 国家"八·五"重点科技攻关项目(85-101)成果报告

2) 杨树锋, 陈汉林, 厉子龙, 等. 2005. 塔里木盆地二叠纪火山岩特征、形成机理及其与油气关系. 国家"十五"重点科技攻关项目(2004BA616A02)报告

中文引用格式: 杨树锋, 陈汉林, 厉子龙, 等. 2014. 塔里木早二叠世大火成岩省. 中国科学: 地球科学, 44: 187–199
英文引用格式: Yang S F, Chen H L, Li Z L, et al. 2013. Early Permian Tarim Large Igneous Province in northwest China. Science China: Earth Sciences, 56: 2015−2026, doi: 10.1007/s11430-013-4653-y

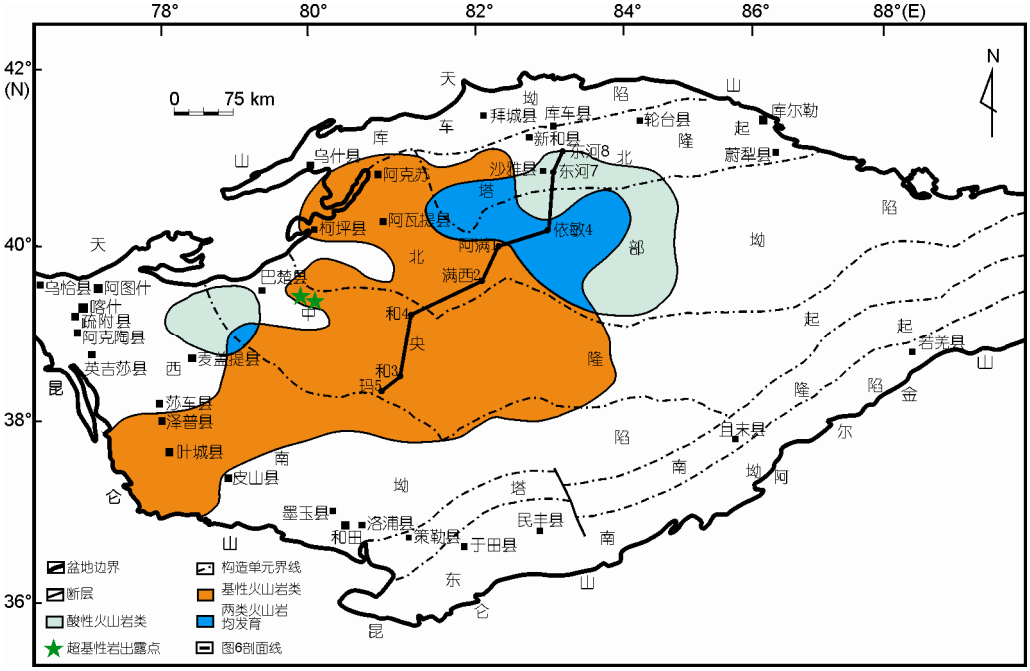

图 1　塔里木大火成岩省残余分布图

陈汉林等, 1997a, 1998; 贾承造等, 1997, 2004), 残余厚度几十米至几百米不等, 其残余分布规模与峨眉山玄武岩分布处于同一量级. 塔里木早二叠世板内岩浆作用形成的岩浆岩系列构成一个新的大火成岩省.

对塔里木板块内部二叠纪玄武岩的研究报道见于 1991 年, 王廷印等(1991)对塔里木板块西北缘柯坪地区开派兹雷克剖面出露的二叠纪玄武岩进行了研究, 认为该玄武岩形成于晚石炭世末到早二叠世, 其下部的玄武岩属亚碱性玄武岩, 上部的玄武岩属碱性玄武岩, 并指出了该玄武岩形成于大陆裂谷环境. 但由于大部分基性岩类发育在盆地内部, 被上覆地层所覆盖, 对其分布范围和重要性认识不足.

大范围、系统的研究开始于 1992 年, 浙江大学地球科学系研究小组在国家"八五"、"十五"重大科技攻关项目支持下对塔里木板块周边和内部钻井所揭示的玄武岩进行了研究(杨树锋等, 1994[1)], 1996, 2005[2)], 2005, 2006, 2007; Yang 等, 2006, 2007; 陈汉林等, 1997a, 1997b, 1998; 厉子龙等, 2008). 研究发现, 除了玄武岩外还发育有同时期的辉绿岩、碱性花岗岩和超基性岩类; 玄武岩主要为碱性和亚碱性玄武岩, 同时有少量拉斑玄武岩. 利用 K-Ar 和 Ar-Ar 定年发现其发育时间主要集中在早二叠世, 同位素年龄为 277~290 Ma; 最近的锆石 SHRIMP 定年结果显示柯坪地区玄武岩第一次喷发时间为 290 Ma, 最后一次喷发在 288 Ma(Li 等, 2011; Yu 等, 2011). 柯坪地区玄武岩在岩石化学成分上从剖面下部往上具有富钾、富铁和富磷的趋势; 在微量元素和稀土元素特征上具有板块内部的溢流玄武岩特征, 并与地幔柱的活动有着密切关系. 期间, 其他学者也对塔里木盆地露头区的玄武岩、辉绿岩及其超镁铁质岩进行研究(姜常义等, 2004a, 2004b, 2004c), 提出了超镁铁岩很有可能源自于核-幔边界之上的 D″层.

从 2006 年开始, 很多学者认识到塔里木早二叠世大规模岩浆作用的重要性, 从不同的角度对塔里木大火成岩省的不同单元进行了系统研究, 包括二叠纪玄武岩的年代学和地球化学特征系统研究(李勇等, 2007; 厉子龙等, 2008; 张洪安等, 2009; Zhou 等, 2009; 陈咪咪等, 2010; Tian 等, 2010; 余星等, 2010; 张传林等, 2010; Zhang C L 等, 2010; 张达玉等, 2010; Zhang Y T 等, 2010; Yu 等, 2011; Li 等, 2011), 二叠纪中酸性岩类的年代学与地球化学特征系统研究(陈汉林等, 1998; 杨树锋等, 2006; 李勇等, 2007; 陈咪咪等, 2010; Tian 等, 2010; 上官时迈等, 2011; 于峻川等, 2011), 基性、超基性岩墙和超美铁质岩石的年代学与地球化学特征研究(贾承造等, 2001; 李勇等, 2007; 孙林华等, 2007; Zhang 等, 2008; 张洪安等, 2009; 励

音骐等, 2010; 周黎霞等, 2010; Li Y Q 等, 2012; Li Z L 等, 2012), 大火成岩省岩浆作用的时间序列研究(陈汉林等, 2009; Li 等, 2011), 塔里木大火成岩省与邻区的二叠纪岩浆作用对比研究(余星等, 2009; 张传林等, 2010; Zhang C L 等, 2010; Qin 等, 2011; Xia 等, 2012), 塔里木大大火成岩省与资源和环境关系研究(朱毅秀等, 2005; 陈汉林等, 2006; Yang 等, 2006; 康玉柱, 2008)等.

通过近 20 年的塔里木大火成岩省系统研究, 取得以下新的认识:

(1) 塔里木大火成岩省的岩浆岩类型较多, 而且分布面积广泛; 火山岩残余分布面积达 25 万平方公里, 其中基性岩类的残余分布面积达 20 万平方公里(杨树锋等, 2005, 2006; Yang 等, 2006).

(2) 塔里木大火成省岩浆序列的发育时间为 290~275 Ma(陈汉林等, 2009; Li 等, 2011), 大规模的玄武质岩浆喷出发生 290~288 Ma(Yu 等, 2011).

(3) 柯坪地区玄武岩具有 OIB 相似的微量元素分布特征, 富集 LILE 和 HFSE, 具有高的$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$和负的 Nd(t), 来自于富集的地幔(Zhou 等, 2009; Zhang Y T 等, 2010), 是地幔柱与岩石圈相互作用的结果(余星, 2009; Zhang 等, 2010; Yu 等, 2011).

(4) 塔北中酸性火山岩、巴楚正长岩(A 型花岗岩)与正长斑岩、皮羌 A 型花岗岩的形成与地幔柱有关, A 型花岗岩是大火成岩省岩浆作用结束的标志(陈汉林等, 1998; 杨树锋等, 2006; 孙林华等, 2007; Zhang C L 等, 2010).

(5) 塔里木大火成岩省存在着与地幔柱有关的标志, 如大规模的地壳抬升(陈汉林等, 2006), 发育与苦橄岩成分一致的超基性岩(杨树锋等, 2007; Tian 等, 2010)、大规模岩墙群和大型的钒钛磁铁矿矿床.

(6) 塔里木盆地、准噶尔盆地、吐哈盆地和阿勒泰造山带内早二世基性和超基性岩浆岩可能属于同一个分布面积超过 60 万平方公里大火成岩省(张传林等, 2010; Zhang C L 等, 2010; Qin 等, 2011).

(7) 塔里木大火成岩省与盆地内部大型钒钛磁铁矿发育和二叠纪的沉积环境变迁密切相关(朱毅秀等, 2005; 陈汉林等, 2006; Yang 等, 2006; 康玉柱, 2008).

塔里木二叠纪基性岩浆作用已引起国际大火成岩省委员会(Large Igneous Provinces Commission)的高度重视和关注, 2006 年 6 月塔里木大火成岩省被国际大火成岩省(LIP)委员会列为“Large Igneous Province of the month”(http://www.largeigneousprovinces.org/06jun).

本论文将对塔里木大火成岩省的时空发育特征、基性岩浆来源与大火成岩省演化模式、与地幔柱关系和地球动力学意义等方面进行系统的分析和讨论.

1 塔里木大火成岩省的时空发育特征

1.1 塔里木大火成岩省岩石组合特征

塔里木大火成岩省的岩石组合以玄武质的岩浆岩为主(包括玄武岩、辉绿岩、玄武安山岩和超镁铁质岩类等), 同时还发育了碱性的酸性岩类.

1.1.1 超镁铁质类

塔里木大火成岩省的超镁铁质岩类主要分布在巴楚小海子地区和瓦基里塔格地区. 小海子地区出露的超镁铁质岩, 以岩墙形式产出, 围岩为早二叠世南闸组(P_1n)钙质粉砂岩、泥灰岩和泥岩. 岩墙直立, 走向近南北方向, 宽约 2 m. 与超镁铁质岩墙并排相邻产出的为细粒辉绿岩岩墙, 宽 5 m 左右, 两者在露头上被一透镜状地层相隔, 地层露头宽约 0.5 m, 为浅绿色状致密粉砂岩(图 2). 超镁铁质岩属含斜长石超镁铁质岩. 岩石中橄榄石约占 50%, 辉石占 30%, 斜长石约占 10%, 其余为磁铁矿等副矿物, 以及少量方解石等蚀变矿物.

瓦基里塔格地区超镁铁质岩主要为辉石岩和超基性隐爆角砾岩. 辉石岩呈岩体状侵入古生代地层当中. 隐爆角砾岩筒为隐爆的角砾云母橄辉岩, 岩筒产于泥盆纪红色砂岩区, 在地貌上为一中间凹陷的负地形. 隐爆角砾岩岩筒被晚期辉绿岩脉所切割, 因而辉绿岩侵入时间晚于隐爆角砾岩(图 3). 隐爆角砾岩成分复杂, 含有围岩角砾、早期凝固的熔岩角砾及深部的捕虏晶.

1.1.2 基性岩类

塔里木盆地早二叠世基性岩类分布较广, 残余分布于塔北隆起西部、北部坳陷、中央隆起和塔西南坳陷等(图 1). 基性岩类主要包括玄武岩和辉绿岩. 玄武岩既出露于盆地边缘, 如柯坪地区印干村-四石厂一带、塔西南达木斯-棋盘一带; 也出露与盆地内部的隆起区, 如夏河南黑山头地区、麻扎塔格地区. 在盆地沉积覆盖区, 众多钻井中也显示有玄武岩分布.

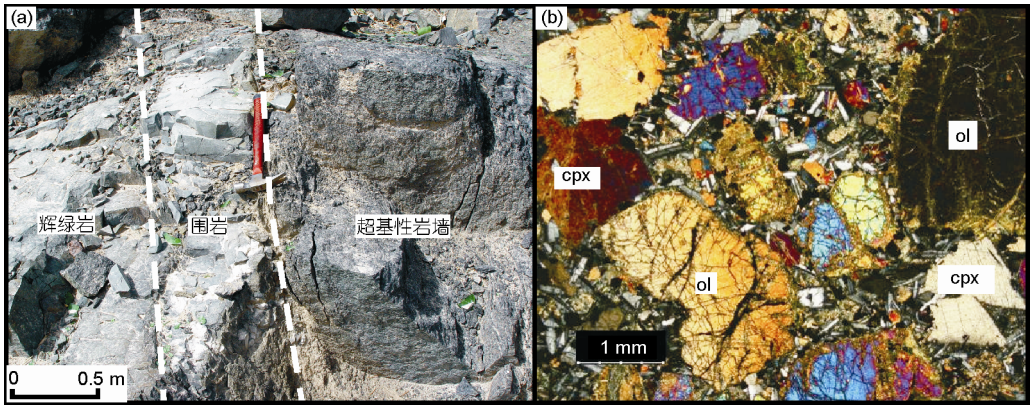

图 2　小海子超基性岩墙野外露头和显微照片

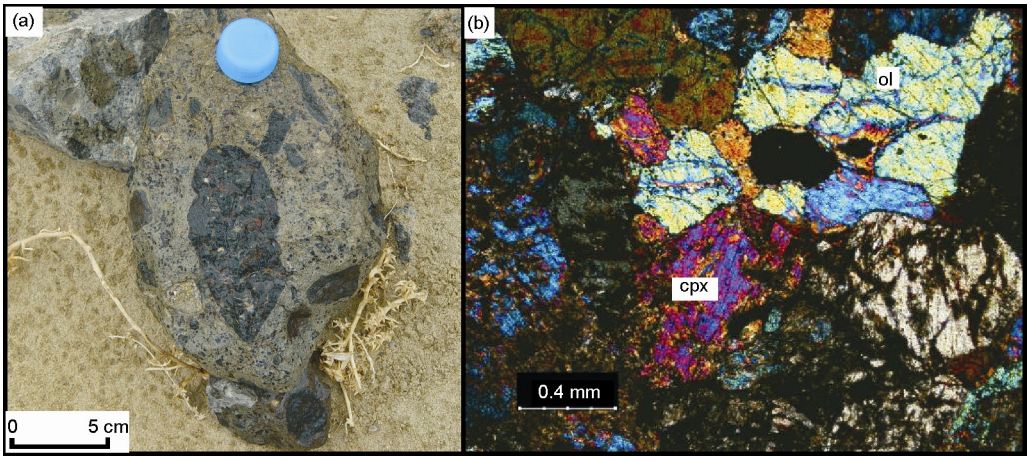

图 3　瓦基里塔格地区隐爆角砾岩野外露头和显微照片

柯坪地区玄武岩野外剖面最为典型, 主要有两套玄武岩, 分别发育在库普库兹曼组和开派兹雷克组中(图 4). 玄武岩一般呈灰绿色-暗绿色及灰褐色-褐色, 主要为气孔状玄武岩、杏仁状玄武岩、橄榄玄武岩、玻基玄武岩和粗玄岩等. 玄武岩矿物组成为斜长石、单斜辉石和橄榄石, 副矿物为磁铁矿等, 次生矿物为伊丁石、蛇纹石和绿泥石等. 玄武岩的基质以辉绿结构为主, 局部可发育间粒间隐结构. 部分玄武岩见轻度绿泥石、绿帘石化和碳酸盐化.

辉绿岩主要分布于巴楚小海子地区、瓦基里塔格地区和柯坪印干村地区(图 5), 其中巴楚地区分布最密集. 辉绿岩岩墙一般宽度在0.5~1 m, 宽的可达5 m以上. 辉绿岩岩墙常斜切地层, 但也有部分辉绿岩岩墙沿层间裂隙灌入, 与地层产状一致. 辉绿岩岩墙还常与酸性岩墙并行产出, 呈现双峰式岩浆岩特征. 辉绿岩具有典型的辉绿结构, 长条状斜长石组成的三角形格架中, 充填有细小的辉石颗粒.

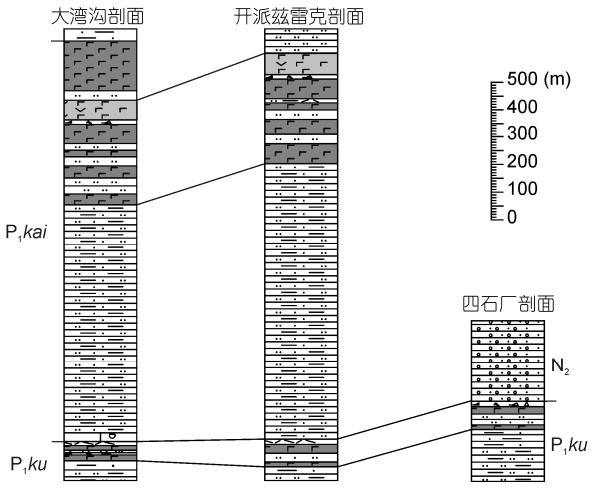

图 4　柯坪地区典型剖面地层柱状图

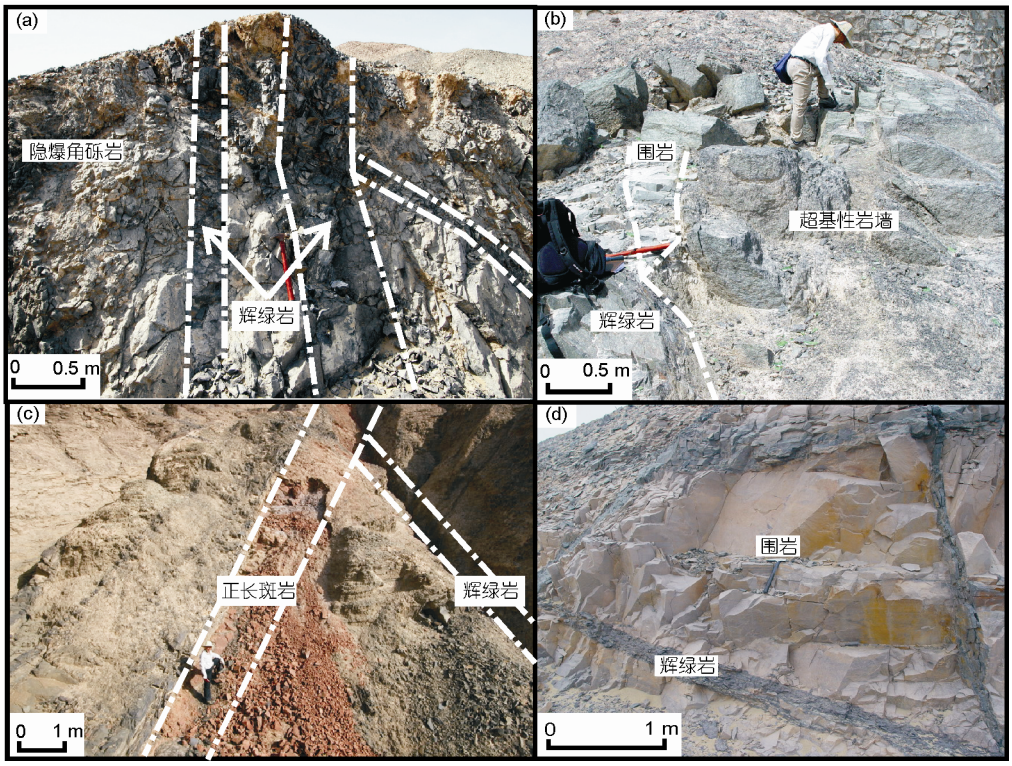

图 5　岩墙的野外照片

(a) 辉绿岩岩墙侵入到隐爆角砾岩中; (b) 辉绿岩岩墙切穿超基性岩墙; (c) 正长斑岩岩墙切穿了辉绿岩岩墙; (d) 辉绿岩岩墙侵入到泥盆系中

1.1.3　酸性岩类

塔里木盆地早二叠世酸性岩类主要包括正长岩、正长斑岩和酸性凝灰岩. 其中正长岩和正长斑岩主要分布于小海子地区和皮羌地区, 分别呈岩体和岩墙的形式产出. 凝灰岩往往与玄武岩相伴, 出露于柯坪、夏河南等玄武岩分布区, 在钻井中也有揭示.

小海子正长岩岩体位于巴楚小海子水库的东侧, 岩体在遥感图上呈圆形侵入体, 围岩为志留系、泥盆系和石炭系. 正长斑岩岩墙出露于正长岩体周边地层内, 与正长岩岩体有成因上联系, 来源于同一个岩浆源区. 正长斑岩岩墙可以与辉绿岩岩墙并行产出, 反映双峰式岩浆岩的特征.

凝灰岩主要形成于每一次玄武岩喷发末期, 往往分布于玄武岩层之上. 凝灰岩层的厚度一般 3~5 m, 呈灰绿色.

1.2　塔里木大火成岩省的空间发育特征

在 2005 年利用塔里木盆地的钻井资料、地震资料和野外地质调查资料, 对塔里木盆地二叠纪火山岩的残余厚度分布进行了系统研究, 编制了塔里木盆地二叠纪基性火山岩的残余分布图(图 1)和残余厚度分布图(Yang 等, 2006; Yu 等, 2011). 从图 1 中可以发现塔里木盆地早二叠世基性火山岩分布广泛, 不仅在北部坳陷西段和塔北隆起西段上有分布, 而且在塔中隆起和塔西南坳陷都有分布. 其北界为阿克苏-羊塔 6 井-英买 1 井-跃南 1 井-羊屋 1 井, 南界西段在昆仑山前, 中、东段为玛参 1 井南-塘参 1 井南, 西界为莎车-巴 1 井-柯坪南面的夏河黑山头剖面-乌什库鲁剖面东, 东界为哈得 7 井-塔中 33 井-塔参 1 井, 几乎涵盖半个塔里木盆地, 面积约 20 万平方公里. 另外, 还存在两个酸性火山岩的残余分布区, 分别在沙雅县以南地区和巴楚县以西地区. 如果考虑基性火山岩和酸性火山岩的分布, 其残余分布面积达到 25 万平方公里.

基性火山岩残余厚度分布共有以下 7 个厚度中心. (1) 位于柯坪断隆上阿克苏四石厂剖面-柯坪印干村剖面厚度中心, 走向北东, 最大残余厚度为 780 m; (2) 位于塔中隆起上的塔中 22 井厚度中心, 走向北西,

最大残余厚度为 548.9 m; (3) 位于塔中隆起的和 4 井厚度中心, 走向近东西, 最大残余厚度为 478.5 m(图 6); (4) 位于塔中隆起的山 1 井-山 2 井厚度中心, 走向近东西, 最大残余厚度为 442.9 m; (5) 位于北部坳陷的满西 2 井厚度中心, 走向北东, 最大残余厚度为 442.5 m; (6) 位于塔北隆起上的英买 5 井厚度中心, 走向南北, 最大残余厚度为 372m; (7) 位于北部坳陷的哈得 5 井厚度中心, 走向北东, 最大残余厚度为 207.1 m(Yu 等, 2011). 以上分析表明, 塔里木盆地二叠纪基性火山岩在塔中、巴楚和柯坪等隆起上残余厚度较大, 分布范围广; 而在坳陷中残余厚度较薄; 在塔西南坳陷中仅在昆仑山前的达木斯剖面、棋盘剖面和莫木克剖面见有 1~2 层玄武岩, 单层厚度为 20~30 m.

1.3 塔里木大火成岩省形成的时间序列

大火成岩省除了有非常大的分布范围和厚度之外, 其岩浆作用的持续时间也是一个非常重要的方面, Courtillot 等(2003)认为大火成岩省岩浆作用是在较短的时间内发生.

对于塔里木大火成岩省岩浆作用的时间一直备受地质学家们重视(表 1). 早期的研究主要是利用 K-Ar, ^{40}Ar-^{39}Ar 方法对柯坪、巴楚、库车河等地区以及一些钻井的岩性玄武岩、辉绿岩、正长岩、流纹岩和碱性花岗岩等的测定(王庭印和刘金坤, 1991; 杨树锋等, 1996, 2006, 2007; 贾承造, 1997; 张师本等, 2003[3]; 余星等, 2010). 近几年随着 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年技术的广泛应有, 多

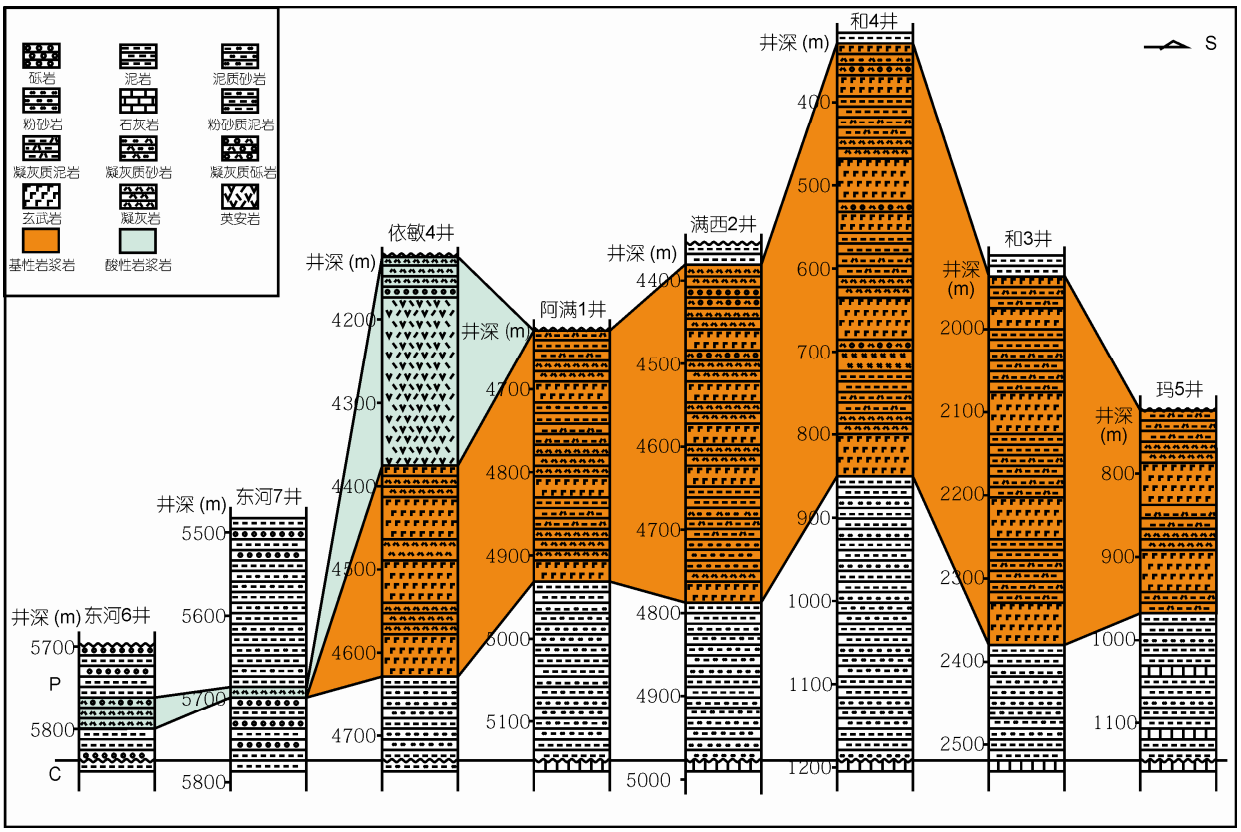

图 6 不同钻井中二叠纪基性岩浆岩和酸性岩浆岩的发育情况

剖面位置见图 1

3) 张师本, 王智斌, 杜品德, 等. 2003. 塔里木油气区石炭-二叠系划分对比、古环境研究及其含油气远景评价. 中国石油天然气股份有限公司“十五”重点科技攻关项目报告

位学者利用这些技术对玄武岩、辉绿岩、正长岩和正长斑岩进行了定年(李勇等, 2007; 陈汉林等, 1998; Zhang 等, 2008; Tian 等, 2010; Yu 等, 2011; Li 等, 2011).

Tian 等(2010)对塔里木盆地北部的英买力地区 YM30 井和 YM5 井玄武岩层中间的流纹岩夹层进行了同位素定年; 玄武岩底部流纹岩夹层的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(290.9±4.1) Ma, 而玄武岩顶部流纹岩夹层的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(286.6±3.3) Ma; 认为玄武岩的喷发时代应该早于 286 Ma.

Yu 等(2011)对印干村西大湾沟剖面的玄武岩进行了系统的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究, 认为柯坪玄武岩最早喷发年代在 290 Ma 左右((289.5±2.0) Ma), 最后一次喷发的时代大概在 288 Ma((288.9±3.4) Ma)(图 7); 塔里木大火成岩省的玄武岩喷发在 2 Ma 左右的时间内完成, 与通常所认为的大火成岩省的岩浆作用持续时间仅 1~2 Ma 相一致.

对于塔西南地区玄武岩的年龄, 杨树锋等(2006)采用 ^{40}Ar-^{39}Ar 方法获得了棋盘玄武岩年龄为(290.1±3.5) Ma. 塔西南玄武岩与柯坪地区玄武岩的形成年龄基本一致, 是同期火山作用的产物.

对于正长岩和正长斑岩的年龄, 不同学者和不同方法都获得了较为一致的年龄, 杨树锋等(1996)获得的正长岩 ^{40}Ar-^{39}Ar 坪年龄为(277.7±1.3) Ma, 杨树锋等(2006)用锆石 SHRIMP U-Pb 方法测得年龄为(277±4) Ma, 李勇等(2007)用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 方法测得两个正长岩样品年龄分别为(282±3) Ma 和(281±4) Ma; 而杨树锋等(2007)确定的正长斑岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为(278.4±2.2) Ma, 因此, 正长岩和正长斑岩的形成时代应该为 278 Ma 左右.

对于辉绿岩岩墙的年龄, 李勇等(2007)用锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 方法对巴楚辉绿岩年龄为(272±6) Ma, 但是从野外的接触关系调查可以发现, 辉绿岩没有切穿到小海子正长岩岩体, 说明要早于正长岩形成, 这一年龄的可靠性还值得进一步研究.

陈汉林等(2009)利用塔里木大火成岩省各岩石单元的接触关系和同位素年代学定年结果, 对各单元形成的时间序列进行了分析. 陈汉林等(2009)认为大火成岩省发育具有如下的时间序列: 瓦吉里塔格地区的层状岩体→隐爆角砾云母橄辉岩岩筒→库普库兹曼组玄武岩→开派兹雷克组玄武岩→超基性岩脉→辉绿岩岩脉→正长岩(包括石英正长斑岩岩墙). Li 等(2011)在陈汉林等(2009)提出的大火成岩省发育的时间序列的基础上, 利用新发现的接触关系、新的年代学结果和地球化学特征与岩浆演化的特点, 提出了新的大火成岩省发育的时间序列: 库普库兹曼组玄武岩→开派兹雷克组玄武岩→瓦吉里塔格地区的层状岩体、隐爆角砾云母橄辉岩岩筒→塔北玄武岩→辉绿岩脉→石英正长斑岩岩脉→正长岩. 两者的差异主要是对大火成岩省中超基性单元形成时间的认识.

表 1 塔里木大火成岩的玄武岩及其夹层的定年结果

组	单元	采样地点	岩性	测试方法	年龄(Ma)	文献
库普库兹曼组	Ⅰ1	印干	玄武岩	SHRIMP U-Pb	289.5±2.0	Yu 等, 2011
	Ⅰ2	印干	玄武岩	SHRIMP U-Pb	291.1±4.4	Yu 等, 2011
	Ⅰ	印干	玄武岩	K-Ar	289.0±6.1	张师本等, 2003[3)]
	Ⅰ	四十厂	玄武岩	K-Ar	292.4±0.5	王庭印和刘金坤, 1991
	顶部	四十厂	玄武岩	LA-ICP-MS U-Pb	293.9±4.6	张达玉等, 2010
	底部	四十厂	玄武岩	LA-ICP-MS U-Pb	291.9±2.2	张达玉等, 2010
		磷矿厂	玄武岩	^{40}Ar-^{39}Ar	282.9±1.6	Zhang C L 等, 2010
		大湾沟	玄武岩	^{40}Ar-^{39}Ar	274.1±2.4	Zhang C L 等, 2010
		大湾沟	玄武岩	^{40}Ar-^{39}Ar	271.9±1.55	Zhang C L 等, 2010
开派兹雷克组	Ⅱ6	印干	玄武岩	SHRIMP U-Pb	288.0±2.0	Yu 等, 2011
	Ⅱ	印干	玄武岩	^{40}Ar-^{39}Ar	282.5±4.4	Yang 等, 2006
	Ⅱ	开派兹雷克	玄武岩	^{40}Ar-^{39}Ar	278.5±1.4	陈汉林等, 1997
	Ⅱ6	印干	玄武岩	K-Ar	288.4±4.4	张师本等, 2003[3]
	顶部	印干	玄武岩	SHRIMP U-Pb	279.0±4.5	陈咪咪等, 2010
YM30-1	玄武岩底部夹层	英买力	流纹岩	LA-ICP-MS U-Pb	290.9±4.1	Tian 等, 2010
YM5-8	玄武岩顶部夹层	英买力	流纹岩	LA-ICP-MS U-Pb	286.6±3.3	Tian 等, 2010
棋盘组	棋盘	塔西南	玄武岩	K-Ar ^{40}Ar-^{39}Ar	289.6±5.6 290.1±3.5	Yang 等, 2006; 厉子龙等, 2008

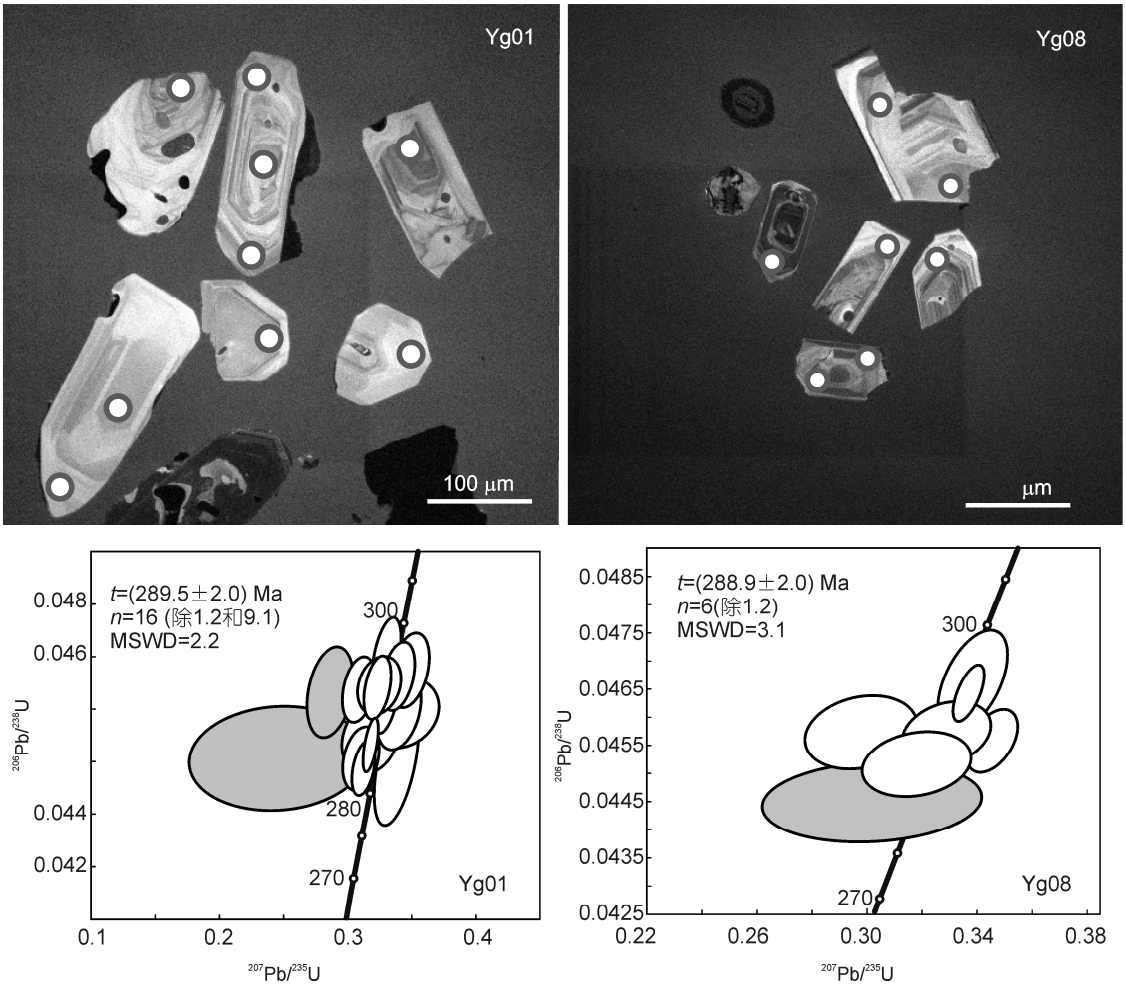

图 7　塔里木柯坪地区印干村西大湾沟剖面第一层(Yg01)和第八层(Yg08)玄武岩的锆石阴极发光照射影像与锆石 U-Pb 谐和年龄曲线(Yu 等, 2011)

造成这一争议的原因是超基性单元缺少同位素年代学数据, 同时与柯坪玄武岩的接触关系也不清楚. 超基性单元的年代学研究是下一步塔里木大火成岩省研究需要关注的内容.

2　塔里木大火成岩省岩石组合的地球化学特征与岩浆演化模式

塔里木大火成省的岩石类型丰富, SiO_2 含量可以从 31%~67%, 具有双峰式火成岩特征.

陈汉林等(1997)对柯坪地区玄武岩和巴楚地区辉绿岩的地球化学特征进行了研究, 认为玄武岩和辉绿岩的微量元素都亏损 Cr, Ni 和 Cu, 富集 Ti, Zn, Li, Be, Ba, Nb, Y 和 Yb; 过渡族元素经球粒陨石标准化后的分布模式呈"W"型. 辉绿岩和玄武岩的微量元素特征基本一致, 说明了辉绿岩与玄武岩有同源的成因联系. 玄武岩微量元素经洋中脊玄武岩 Nb 标准化后的分布模式呈"驼峰状", 说明它们形成于大陆板内的构造环境; 而稀土分布曲线均为右倾平滑曲线, 无 Eu 亏损, 与裂谷拉斑玄武岩的稀土分布曲线类似.

姜常义等(2004a, 2004b, 2004c)分别对瓦吉里塔格二叠纪超镁铁岩、麻扎尔塔格铁富集型高镁脉岩、柯坪玄武岩和库鲁克塔格二叠纪脉岩展开了地球化学和岩石成因的研究, 认为超镁铁岩很有可能源自于核-幔边界之上的 D″层.

Zhou 等(2009)对塔里木盆地发育的玄武岩和辉绿岩岩墙群等进行了地球化学研究, 认为玄武岩、辉

绿岩和超基性岩类来自于 OIB 相似的、同位素不均一的软流圈地幔, 高温和高镁性质的母岩岩浆指示了地幔柱来源.

Zhang Y T 等(2010)认为辉绿岩和超基性岩类来自 OIB 相似的软流圈地幔熔融及其后期的分馏, 地壳物质污染少; 而玄武岩是软流圈地幔熔融物质与存在下地壳且成分与 OIB 相似的岩石的混合及其后期的分馏.

余星(2009)和 Yu 等(2011)对塔里木大火成岩省单元中的超基性、基性和酸性单元进行了系统的研究, 认为大火成岩省的岩石组合单元的地球化学组成以富集大离子亲石元素和高场强元素、亏损重稀土元素为特征(图 8); 微量元素特征与 OIB 相似, 显示其成因与地幔柱有关. 同时还发现了柯坪玄武岩与塔北玄武岩和辉绿岩在同位素特征上存在明显的差异, 柯坪玄武岩具有负ε_{Nd}值, 塔北玄武岩ε_{Nd}值为 0 值附近, 而辉绿岩具有正ε_{Nd}值(同时还包括超基性岩)(图 9). 柯坪地区玄武岩具有负的ε_{Nd}值, 重稀土值相对较高, 与岩石圈地幔有关; 塔北玄武岩具有较高的 Nd 同位素初始比值和相对底的重稀土值, 代表亏损型地幔来源(图 9).

对于酸性岩类, 杨树锋等(1996)对巴楚小海子正长岩岩体进行了地球化学的研究, 认为该正长岩属于 A 型花岗岩, 是基性岩浆的直接结晶分异的结果. 杨树锋等(2006)对巴楚水工团附近发现石英正长斑岩岩墙进行了系统地球化学研究, 认为该正长斑岩具有富集大离子亲石元素(Ba, Rb)和高场强元素含量(Zr, Nb, Y)、Ga/Al 比值、高的稀土总量、高的 LREE/HREE 比值以及具 Eu 的负异常, 属于典型的 A 型花

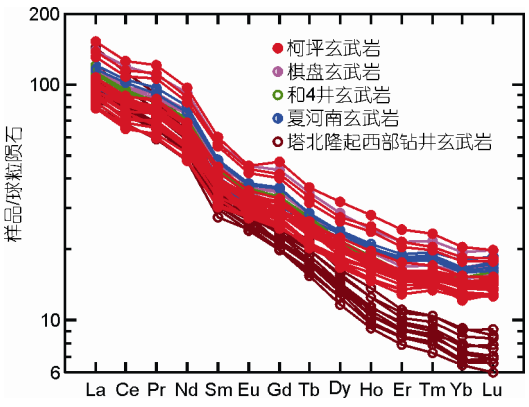

图 8　玄武岩的稀土配分曲线

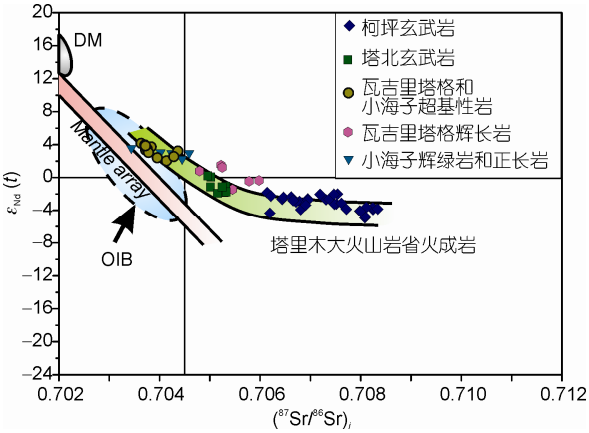

图 9　塔里木大火成岩省不同类型岩石的 $^{87}Sr/^{86}Sr$-ε_{Nd} 图

岗岩; 低的 Y/Nb(0.4)<1.2 以及微量元素蜘蛛网图中呈现大离子亲石元素富集以及 Nb 平坦或稍凸的图谱指示其源区来自于地慢, 并认为是塔里木大火成岩省岩浆热事件结束的标志.

对于塔里木大火成岩省成因模式, 余星(2009)根据大火成岩省的形成的时间序列和每个单元的地球化学特征, 并与 Turner 等(1996)提出大火成岩省的两种成因模式(德干型和巴哈纳型)进行了对比, 认为塔里木大火成岩省成因具有双面性, 即具有两种模式的共同特征, 从而提出了塔里木大火成岩省的成因模式. 余星(2009)认为柯坪玄武岩高 $^{87}Sr/^{86}Sr$, 低 $^{143}Nd/^{144}Nd$, 富集大离子亲石元素和高场强元素, 具有巴哈纳型特征, 为富集的大陆岩石圈地幔部分熔融的产物. 后期基性-超基性岩均属德干型, 为软流圈地幔与来自核幔边界的地幔柱共同作用的产物.

3　塔里木大火成岩省对盆地演化和油气资源的影响

二叠纪是塔里木盆地演化过程中一个非常重要的转折时期, 从早二叠世开始塔里木板块结束了海相沉积, 进入了陆相沉积阶段. 陈汉林等(2006)开展塔里木大火成岩省与塔里木盆地晚古生代沉积演化关系研究, 认为塔里木大火成岩省与塔里木盆地晚石炭世-二叠纪的沉积环境变迁在时间上有很好的匹配性、在空间上有很好的一致性(即岩浆作用强烈活动中心与沉积剥蚀区相一致), 岩浆作用对沉积作用具有明显的控制作用, 是来自地球深部的地幔柱上升导致塔里木板块的地壳抬升, 海水逐渐向西退出,

沉积作用从海相向陆相过渡.

塔里木大火成岩省的形成对盆地的油气演化和储层特性的改造产生了重要的影响. 朱毅秀等(2005)认为大火成岩省的岩浆分异作用形成富氟的酸性热流体, 进入碳酸盐岩地层后在适当的部位发生强烈溶蚀、交代作用, 形成萤石和方解石脉及大量残留溶蚀孔洞, 大大地改善了碳酸盐岩储层的储集性. 吕修祥等(2005)认为大火成岩省岩浆活动的流体通过物质和能量交换对碳酸盐岩储层进行溶蚀和交代使碳酸盐岩储集层的孔隙度、渗透率发生改变而使其储集性能发生改变, 从而形成深埋改造型的优质碳酸盐岩储层. 岩浆活动中高温的岩浆与热液和烃源岩长期直接接触, 给烃源岩带来能量, 使其在短期内经历异常高温而成熟或过成熟. 在塔中 3 井、塔中 4 井等井, 岩浆岩周围的石炭系烃源岩接近高成熟阶段, R_o 值高; 而不发育岩浆岩的邻近井石炭系烃源岩处于成熟阶, R_o 值相对较低(朱毅秀等, 2005). 在塔中地区, 岩浆侵入到上寒武统、奥陶系的泥岩、碳酸盐岩等巨厚岩层, 形成了与不同时代的地层近垂直侵入接触面, 油气可以沿这个面向上运移, 如塔中 47 油藏形成与侵入接触面作为油气运移通道有关(朱毅秀等, 2005). 塔里木盆地内部也发现了多个与大火成岩省岩浆活动有关的圈闭构造, 如塔中 47 井圈闭是先成的背斜圈闭被岩浆活动改造成岩浆岩侧向封堵的刺穿遮挡半背斜圈闭.

4 塔里木大火成岩省与地幔柱关系

Campbell(2002)提出了鉴别古老地幔柱的五个标志: 大规模火山作用前的地壳抬升、放射状岩墙群、火山作用的物理特征、火山链的年代学变化、幔源岩浆的化学成分.

陈汉林等(2006)通过晚古生代时期不同阶段的岩相古地理分布特征分析认为, 大火成岩省与塔里木盆地的沉积环境变迁在时间有很好的匹配性、在空间上有很好的一致性, 岩浆作用强烈活动中心与中二叠世在巴楚地区存在隆升剥蚀区相一致, 反映了地幔柱上升所导致的地壳抬升.

苦橄岩是厘定大火成岩省岩浆与地幔柱有关的一个重要的岩石学证据, 它是一种富含橄榄石的超镁铁质火山岩, 其化学成分特点是 SiO_2<47%, Na_2O+K_2O<2%和 MgO>18%. 杨树锋等(2007)在巴楚小海子水库发现了地球化学成分与苦橄岩一致的次火山岩(超基性岩墙), 该超基性岩墙的 SiO_2 介于 40.88%~42.8%、Na_2O+K_2O 介于 0.4%~0.99%、MgO 介于 28.66%~29.20%, 与苦橄岩的地球化学成分一致. Tian 等(2010)在塔北西部的英买力和牙哈地区报道了与二叠纪玄武岩同时代的苦橄岩(YT1, YH5). 这些成果为塔里木地幔柱的存在提供了重要的证据.

地幔柱岩浆形成的特色矿床有大型自然铜矿床、硫化铜镍矿床、钒钛磁铁矿矿床. 在塔里木盆地内部的瓦基里塔格发现了大型钒钛磁铁矿矿床, 铁矿石资源量 1 亿吨; 二氧化钛资源量 600 万吨; 五氧化二钒资源量 13 万吨, 属于中国第三大钒钛磁铁矿床.

大规模岩墙群是地幔柱的又一标志. 在塔里木盆地巴楚地区发育了大规模的岩墙群, 不仅有基性的辉绿岩岩墙群, 还发育有超基性和酸性岩墙群(图 5).

这些标志初步可以论证塔里木大火成岩省形成与地幔柱有关.

5 塔里木大火成岩省的地球动力学意义

二叠纪时期, 在塔里木板块上发育了塔里木早二叠世大火成岩省外, 在扬子板块西缘的发育了峨眉山晚二叠世大火成岩省(Chung 和 Jahn, 1995; Xu 等, 2001, 2004; Zhou 等, 2002, 2006; He 等, 2003; Xiao 等, 2003, 2004; Ali 等, 2005). 因此, 塔里木大火成岩省的形成并不是一个孤立的岩浆作用事件, 而是具有重要区域地球动力学意义的构造岩浆事件.

近年来, 塔里木大火成岩省的地球动力学意义的研究越来越得到地球科学家的关注. 学者们重点探讨塔里木大火成岩省与峨眉山大火成岩省和特提斯构造域演化等关系, 及其中亚构造域二叠纪基性-超基性岩浆作用的研究. Pirajno 等(2009)认为与塔里木大火成岩省有关的大规模岩浆作用事件同样还发生在东哈萨克斯坦、俄罗斯的萨莱尔、蒙古西部等西伯利亚克拉通与阿勒泰造山带之间的大部分区域. Zhang C L 等(2010)提出塔里木盆地、准噶尔盆地、吐哈盆地、阿勒泰造山带早二叠世基性和超基性岩浆作用都是塔里木大火成岩省的一部分, 分布面积超过 60 万平方公里, 形成时间为 275 Ma, 较 260 Ma 的峨眉山大火成岩省早约 15 Ma, 较 252 Ma 的西伯利亚大火成岩省早约 25 Ma. Zhang C L 等(2010)又根据

地球化学特征将塔里木大火成岩省进一步分为两个地球化学省, 分别为长期富集的塔里木省和与俯冲交代有关的亏损的中亚造山带省. Qin 等(2011)通过对比塔里木盆地内部与东天山、北山地区的二叠纪玄武岩的地球化学特征后提出两者系同一个地幔柱的产物. 塔里木盆地内部的玄武岩具有高钛低镁、低 $\varepsilon_{Nd}(t)$值等特点, 可能是地幔柱外围区域低程度部分熔融的产物. 而东天山、北山地区的玄武岩具有低钛高镁、高 $\varepsilon_{Nd}(t)$值等特点, 暗示它们可能来自于高程度部分熔融的岩石圈地幔, 与具有更高温度的地幔柱头部有更为密切的关系. 从以上研究可以发现在中亚地区广泛存在与地幔柱有关的早二叠世岩浆作用, 但是这些与地幔柱有关的岩浆作用的形成模式还值得进一步研究.

此外, 值得大家关注的是现有的中亚造山带形成演化模型并不支持北疆地区和阿尔泰地区的早二叠世基性和超基性岩浆作用与塔里木早二叠世大火成岩省有成因上的联系(Windley 等, 2007).

6 塔里木大火成岩省的下一步研究领域

塔里木大火成省已经历近 20 年的研究, 在大火成岩省的岩石组合、空间分布、时间序列、岩石地球化学特征取得了较系统的认识, 并在深部地质过程、与地幔柱关系和对盆地演化和油气资源的影响等方面也已经取得初步的认识. 塔里木大火成岩省的下一步研究重点应该关注以下几个方面.

(1) 塔里木大火成岩省的深部地质过程及与地幔柱关系研究. 虽然前期的研究认识到塔里木大火成岩省的玄武岩来自富集地幔(贾承造等, 1997, 2004; 杨树锋等, 2005; Yang 等, 2006); 巴楚地区各种脉岩均具有原始地幔的 Nd, Sr, Pb 同位素组成特征, 岩浆源自于下地幔(姜常义等, 2004c); 瓦吉里塔格超镁铁岩认为很有可能源自于核－幔边界之上的 D″层(姜常义等, 2004a); 基性岩墙和基性熔岩是来自 OIB 相似的、均一的地幔, 而超基性岩墙来自 OIB 相似的、非均一的地幔(姜常义等, 2004c). 但是这些看法都是从大火成岩省的单个单元的研究后提出, 没有把大火成岩省的各个单元作为同一个深部地质过程和同一个岩浆演化结果来分析.

(2) 塔里木大火成岩省的成矿作用研究. 大火成岩省岩浆作用沟通了地幔、地壳之间的物质与能量交换, 可以形成以幔源岩浆矿床为主, 如 Cu-Ni-PGE 矿床、V-Ti 磁铁矿矿床、铬铁矿矿床、金刚石矿床等(Naldrett 等, 1999). 而且大规模的幔源基性岩浆的上升可以诱发地壳的重熔及成矿作用, 形成壳源岩浆矿床、热液矿床, 如卡林型金矿、块状硫化物矿床等(Pirajno 等, 2000, 2008; Ernst 和 Buchan, 2003). 在塔里木盆地西北的巴楚隆起上已经发现了瓦基里塔格大型钒钛磁铁矿床, 预示了塔里木大火成岩省具有重要的成矿条件, 但是与此相关的研究还相对缺少, 需要进一步研究.

(3) 塔里木大火成岩省与盆地环境变化和生命演化的关系研究. 大火成岩省的岩浆活动与物种灭绝存在联系(Stothers 和 Rampino, 1990; Courtillot 等, 1996; Wignall, 2001; Olsen 等, 2002). 如二叠纪和三叠纪界线生物灭绝是与西伯利亚大陆溢流玄武岩的喷发有关, 而峨眉山玄武岩的喷发与 Guadalupian 末期的生物灭绝有关(Courtillot 等, 1999; Olsen 等, 2002). 早二叠世喷出的塔里木溢流玄武岩对生命演化和环境变化的影响又将是一个重要课题.

(4) 塔里木大火成岩省的地球动力学意义研究. 塔里木大火成岩省的形成并不是一个孤立的岩浆作用事件, 而是具有重要区域地球动力学含义的构造岩浆事件. 因此, 如何从全球大地构造演化的角度, 并结合其他的研究成果来分析其地球动力学意义是非常必要.

塔里木大火成岩省及相关的研究已经成为地球科学一个研究的热点, 通过国内外学者的共同努力, 塔里木大火成岩省的研究成果必将一个闪光的亮点.

致谢 塔里木油田公司在塔里木大火成岩省研究中提供的大量帮助, 浙江大学地球科学系的其他老师与同学为塔里木大火成岩省研究所作出的贡献, 郭召杰教授、金振民院士、李锦轶研究员、舒良树教授、田伟教授、王京彬研究员、肖文交研究员、徐义刚研究员、袁超研究员、翟明国院士、张传林研究员、张国伟院士、张招崇教授、赵振华研究员和周新民教授等给予的支持和帮助以及匿名专家审稿时所提的宝贵意见, 在此一并致谢.

参考文献

陈汉林, 杨树锋, 董传万, 等. 1997a. 塔里木盆地二叠纪基性岩带的确定及大地构造意义. 地球化学, 26: 7–87

陈汉林, 杨树锋, 董传万, 等. 1997b. 塔里木盆地地质热事件研究. 科学通报, 42: 1–43

陈汉林, 杨树锋, 贾承造, 等. 1998. 塔里木盆地北部二叠纪中酸性火成岩带的厘定及其对塔北构造演化的新认识. 矿物学报, 18: 70–376

陈汉林, 杨树锋, 王清华, 等. 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: 45–553

陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 等. 2009. 塔里木盆地二叠纪大火成岩省发育的时空特点. 新疆石油地质, 30: 79–182

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

贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气, 北京: 石油工业出版社, 1997. 157–170

贾承造, 杨树锋, 陈汉林, 等. 2001. 特提斯北缘盆地群构造地质与天然气, 北京:石油工业出版社, 2001. 136

贾承造, 王良书, 魏国齐, 等. 2004. 塔里木盆地板块构造与大陆动力学. 北京: 石油工业出版社. 127–135

姜常义, 贾承造, 李良辰, 等. 2004a. 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: 70–780

姜常义, 张蓬勃, 卢登蓉, 等. 2004b. 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: 3–44

姜常义, 张蓬勃, 卢登蓉, 等. 2004c. 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

康玉柱. 2008. 新疆两大盆地石炭-二叠系火山岩特征与油气. 石油实验地质, 30: 321–327

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: 097–1107

厉子龙, 杨树锋, 陈汉林, 等. 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: 59–970

励音骐, 厉子龙, 孙亚莉, 等. 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. 石学报, 26: 307–3317

吕修祥, 杨宁, 解启来, 等. 2005. 塔中地区深部流体对碳酸盐岩储层的改造作用. 石油与天然气地质, 2005, 26: 284–289

上官时迈, 田伟, 李献华, 等. 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), 47: 561–564

孙林华, 王岳军, 范蔚茗, 等. 2007. 新疆巴楚辉绿岩岩脉的岩石成因和大地构造意义. 岩石学报, 23: 1369–1380

王庭印, 刘金坤. 1991. 塔里木成盆期及裂谷作用初探. 见: 贾润胥, 主编. 中国塔里木盆地北部油气地质研究. 北京: 中国地质大学出版社. 115–124

杨树锋, 陈汉林, 董传万, 等. 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, 陈汉林, 龚登武, 等. 2005. 塔里木盆地早-中二叠世岩浆作用过程及地球动力学. 高校地质学报, 11: 504–511

杨树锋, 厉子龙, 陈汉林, 等. 2006. 塔里木二叠纪石英正长斑岩岩墙的发现及其构造意义. 岩石学报, 22: 1405–1412

杨树锋, 余星, 陈汉林, 等. 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

于峻川, 莫宣学, 董国臣, 等. 2011. 塔里木北部二叠纪长英质火山岩年代学及地球化学特征. 岩石学报, 27: 2184–2194

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, 31–100

余星, 陈汉林, 杨树锋, 等. 2009. 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. 岩石学报, 25: 1492–1498

余星, 陈汉林, 杨树锋, 等. 2010. 新疆柯坪二叠纪层状玄武岩的发育特征及其地质意义, 地层学杂志, 34: 127–134

张传林, 周刚, 王洪燕, 等. 2010. 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. 地质通报, 29: 779–794

张达玉, 周涛发, 袁峰, 等. 2010. 塔里木柯坪地区库普库兹曼组玄武岩锆石 LA-ICP-MS 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, 等. 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

周黎霞, 胡世玲, 王利刚, 等. 2010. 塔里木盆地西北缘皮羌辉长岩体的时代讨论. 地质科学, 45: 1057–1065

朱毅秀, 金之钧, 林畅松, 等. 2005. 塔里木盆地塔中地区早二叠世岩浆岩及油气成藏关系. 石油实验地质, 27: 50–54

Ali J R, Thompson G M, Zhou M F, et al. 2005. Emeishan large igneous province, SW China. Lithos, 79:475–489

Campbell I H. 2002. Identification of ancient mantle plumes. Mantle plumes: Their identification through time. Geol Soc Am, 352: 5–22

Chung S L, Jahn B M. 1995. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary. Geology, 23:89–892

Courtillot V, Jaeger J J, Yang Z, et al. 1996. The influence of continental flood basalts on mass extinctions: Where do we stand? In: Ryder G, Fastovsky D, Gartner S, eds. The Cretaceous-Tertiary Event and Other Catastrophes in Earth History. Geol Soc Am, 307: 513–525

Courtillot V, Jaupart C, Manighetti I, et al. 1999. On causal links between flood basalts and continental breakup. Earth Planet Sci Lett, 166: 177–195

Courtillot V, Davaille A, Besse J, et al. 2003. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. Earth Planet Sci Lett , 205: 295–308

Ernst R E, Buchan K L. 2003. Recognizing mantle plumes in the geological record. Annu Rev Earth Planet Sci, 31: 469–523

He B, Xu Y G, Chung S L, et al. 2003. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts. Earth Planet Sci Lett, 213: 391–405

Li Y Q, Li Z L, Chen H L, et al. 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 Z L, Chen H L, Song B, et al. 2011. Temporal evolution of the Permian large igneous province in Tarim Basin in northwestern China. J Asian Earth Scis, 42: 917–927

Li Z L, Li Y Q, Chen H L, et al. 2012. Hf isotopic characterisitcs 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

Naldertt A J. 1999. World-class Ni-Cu-PGE deposits: Key factors in their genesis. Miner Depos, 34: 227–240

Olsen P E, Koeberl C, Huber H, et al. 2002. Continental Triassic–Jurassic boundary in central Pangea: Recent pregresss and discusssion of an Ir anomaly. In: Koeberl C, MacLeod K G, eds. Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impacts and Beyond. Geol Soc Am, 356: 505–522

Pirajno F. 2000. Ore Deposi ts and Mant le Plumes. Dordrecht, Net herland: Kluwer Acad, 556

Pirajno F, Mao J W, Zhang Z C, et al. 2008. The association of mafic-ultramafic intrusions and A-type magmatism in the Tian Shan and Altay orogens, NW China: Implications for geodynamic evolution and potential for the discovery of new ore deposits. J Asian Earth Sci, 32**:** 165–183

Pirajno F, Ernst R E, Borisenko A S, et al. 2009. Intraplate magmatism in Central Asia and China and associated metallogeny. Ore Geol Rev, 35: 114–136

Qin K Z, Su B X, Sakyi P A, et al. 2011. SIMS ziron U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu bearing mafic-ultramafic intrusions in eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim basin (NW China): Constraints on a ca. 280 Ma mantle plume. Am J Sci, 311: 237–260

Stothers R B, Rampino M R. 1990. Periodicity in flood basalts, mass extinctions, and impacts: A statistical review and a model. Geol Soc Am, 247: 9–18

Tian W, Campbell I H, Allen CM, et al. 2010. The Tarim picrite-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 J, Gallagher K. 1996. Mantle plumes, flood basalts, and thermal models for melt generation beneath continents: Assessment of a conductive heating model and application to the Parana. J Geophys Res, 101: 11503–11518

Wignall P B. 2001. Large igneous provinces and mass extinctions. Earth-Sci Rev, 53: 1–33

Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. J Geol Soc, 164: 31–47

Xia L Q, Xu X Y, Li X M, et al. 2012. Reassessment of petrogenesis of Carboniferous-Early Permian rift-related volcanic rocks in the Chinese Tianshan and its neighboring areas. Geosci Front, 3: 445–471

Xiao L, Xu Y G, Chung S L, et al. 2003. Chemostratigraphic correlation of Upper Permian lavas from Yunnan Province, China: Extent of the Emeishan large igneous province. Int Geol Rev, 45: 753–766

Xiao L, Xu Y G, Mei H J, et al. 2004. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: implications for plume-lithosphere interaction. Earth Planet Sci Lett, 228: 525–546

Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, et al. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian-Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. Lithos, 58: 145–168

Xu Y G, He B, Chung S L, et al. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province. Geology, 32: 917–920

Yang S F, Li Z L, Chen H L, et al. 2006. ^{40}Ar-^{39}Ar dating of basalts from Tarim Basin, NW China and its implication to a Permian thermal tectonic event. J Zhejiang Univ, 7(Supp II): 170–174

Yang S F, Li Z L, Chen H L, et al. 2007. Discovery of Permian bimodal dyke: Geochemistry and implications for tectonic evolution related to the last major tectono-thermal event in Tarim Basin, NW China. Gondwana Res, 12: 113–120

Yu X, Yang S F, Chen H L, et al. 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, et al. 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, Li Z X, Li X H, et al. 2010. A Permian large igneous province in Tarim and Central Asian orogenic belt, NW China: Results of a ca. 275 Ma mantle plume? Soc Am Bull, 122: 2020–2040

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

Zhou M F, Malpas J, Song X Y, et al. 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end-Guadalupian mass extinction. Earth Planet Sci Lett, 196: 113–122

Zhou M F, Zhao J H, Qi L, et al. 2006. Zircon U-Pb geochronology and elemental and Sr-Nd isotope geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing area, SW China. Contrib Mineral Petrol, 151: 1–19

Zhou M F, Zhao J H, Jiang C Y, et al. 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