塔里木溢流玄武岩的喷发特征*

上官时迈[1,2,3] 田伟[1] 徐义刚[2] 关平[1] 潘路[1]
SHANGGUAN ShiMai[1,2,3], TIAN Wei[1], XU YiGang[2], GUAN Ping[1] and PAN Lu[1]

1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室,北京大学地球与空间科学学院,北京 100871
2. 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
3. 中国科学院研究生院,北京 100039
1. *Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing* 100871, *China*
2. *State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *China*
3. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100039, *China*
2011-12-08 收稿, 2012-02-25 改回.

Shangguan SM, Tian W, Xu YG, Guan P and Pan L. 2012. The eruption characteristics of the Tarim flood basalt. ***Acta Petrologica Sinica*****, 28(4):1261 – 1272**

Abstract Integration of field investigation, regional stratigraphic comparison, remote sensing and image interpretation allow us to divide the Tarim Permian flood basalt province into three eruptive cycles listed by decreasing age: Kupukuziman flood basalt (KP), Felsic pyroclastic rocks (FP), Kaipaizileike flood basalt (KZ). KP features flood basalt and tuff; in the outcrop in Keping and Yingmaili areas, it can be differentiated into two units containing three thick layers of basaltic lava flows. These three layers decrease to one layer of basaltic lava flow in the Halahatang area; however, felsic pyroclastic rocks and lava layer thicknesses increase in the Halahatang area. FP in the outcrop in Keping area consists of ash fall tuff, ignimbrite, resedimented pyroclastic rocks, and the tuff layer interbedded with the normal clastic rocks section from top to bottom. This section is comparable to the tuff layer in the Yingmaili and Halahatang area, thus reveals one layer of lava flow covering an extensive area due to a unit of the eruption of the FP. KZ mainly features flood basalt in its Kaipaizileike section, identifications of 4 eruptive units, 8 layers of flood basalt, and 1 layer of andesitic basalt were made. Traces of clastic rocks were found between eruption units, but no FP interlayers were found. This characteristic is different from Yingmaili and Halahatang volcanic sequences, but similar to the flood basalt in Tazhong area. The differentiation between these three volcanic cycles reveals that Tarim flood basalt underwent a "flood basalt-felsic pyroclastic rocks-flood basalt" transformation, and is similar to Afro-Arabian large igneous province; thus, a comparative study between these two regions is merited.
Key words Flood Basalt; Large Igneous Province (LIP); Volcanic stratigraphy; Pyroclastic rock; Tarim

摘 要 通过对柯坪地区二叠系野外火山岩露头剖面和英买力、哈拉哈塘井区二叠系火山岩钻井剖面的对比,将塔里木早二叠世溢流玄武岩划分为三个旋回,从老到新依次是:库普库兹满溢流玄武岩旋回(KP),长英质火山碎屑岩旋回(FP)和开派兹雷克溢流玄武岩旋回(KZ)。KP 旋回以巨厚溢流玄武岩夹凝灰岩为特征,在柯坪露头区和英买力井区均可划分出三层巨厚玄武质熔岩流,至哈拉哈塘井区减少为一层玄武岩流,但长英质火山碎屑岩和熔岩厚度增加。FP 旋回在柯坪露头区自下而上包括空落相凝灰岩,熔结凝灰岩,再沉积火山碎屑岩和正常碎屑岩夹火山灰层,该层可与英买力及哈拉哈塘井区的凝灰岩层对比,表明在塔北存在一期面积广泛的长英质火山喷发。KZ 旋回以溢流玄武岩为主,在开派兹雷克剖面识别出四期喷发共 8 层溢流玄武岩和一期安山质玄武岩,每期喷发之间夹少量碎屑岩,但未见长英质火山碎屑岩夹层,该特征与英买力和哈拉哈塘井区的火山层序组合不同,而与塔中溢流玄武岩类似。三个火山旋回的划分表明塔里木大火成岩省经历了"基性溢流玄武岩-酸性火山碎屑岩-基性溢流玄武岩"的演变过程,与 Afro-Arabian 溢流玄武岩省相似,可进行对比研究。

* 本文受国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB808905)、中国科学院国际合作海外团队项目和国家自然科学基金(41072040)联合资助.
第一作者简介: 上官时迈,男,1985 年生,博士生,岩石学专业,E-mail: socialdis@163.com

关键词 溢流玄武岩;大火成岩省;火山地层学;火山碎屑岩;塔里木
中图法分类号 P588.145

塔里木溢流玄武岩是新近确认的一个早二叠世大陆溢流玄武岩省,其面积超过 0.3Mkm^2,由酸性凝灰岩锆石夹层限定的巨厚玄武岩喷发时间在 291 ~ 287Ma 之间(Tian *et al.*,2010)。由于该溢流玄武岩省绝大部分被后期沉积地层覆盖,露头主要分布在盆地周边有限的几个区域,导致人们对其火山层序和喷发特征知之甚少。前人主要对溢流相玄武岩、酸性熔岩和侵入岩等进行研究(例如:Yang *et al.*, 2007; Tian *et al.*,2010; 余星等,2010; Zhang *et al.*,2008, 2010),对火山碎屑岩则很少涉及。但是,近年来火山碎屑岩在大火成岩省研究中开始占据越来越重要的位置。人们逐渐认识到,一些大陆溢流玄武岩省中发育很大体积的镁铁质,甚至是长英质火山碎屑岩,例如 Siberian Traps 的镁铁质火山碎屑岩占总岩浆体积的 26%(Ross *et al.*,2005),Karoo 溢流玄武岩省中 Lebombo 长英质流熔凝灰岩(rheoignimbrite)残留体积达 35000km^3(Saggerson and Bristow,1983; Cleverly *et al.*,1984; Miller and Harris,2007), Parana-Etendeka 溢流玄武岩省的长英质流熔凝灰岩分布面积超过 25000km^2,最小喷发体积估计超过 6340km^3(Milner *et al.*,1992; 1995; Ewart *et al.*,1998),Ethiopia-Yemen CFBP 仅在 Afro-Arabian 一个区域的长英质熔结凝灰岩加空落相火山灰总体积超过 6200km^3(Baker *et al.*,1996; Peate, 2003; Peate *et al.*, 2003a)。那么塔里木溢流玄武岩省是否也有类似特征的火山碎屑岩?其岩石类型和分布特征如何?与溢流相玄武岩的关系如何?对这些问题的解答对于深入了解塔里木溢流玄武岩省的火山喷发特征、划分岩浆旋回、研究其成因和构造背景具有重要意义。

本文中,我们根据详细的野外测量和钻井资料,以火山岩产状和岩相学为基础,初步建立了塔里木北部早二叠世溢流玄武岩的火山地层学格架,讨论了其喷发特征的演化过程。并首次报道了在塔里木西北部柯坪露头区大范围分布、保存良好的长英质火山碎屑岩层的发现。

1 区域地质背景

塔里木盆地为天山、昆仑山和阿尔金山三大造山带所环绕,是中国西部最大的内陆盆地。塔里木盆地内广泛发育二叠纪玄武岩,但大部分被晚期沉积地层覆盖(杨树锋等,1996; 贾承造,1997)。最近利用巨厚玄武岩中夹层流纹岩的锆石 U-Pb 年龄限定的塔里木二叠纪玄武岩喷发时间在 ~ 291 ~ 287Ma 之间,其喷发面积超过 0.3Mkm^2(Tian *et al.*, 2010)。大量的地球化学数据表明,塔里木二叠纪玄武岩具有典型洋岛玄武岩(OIB)特征(陈汉林等,1997; 姜常义等,

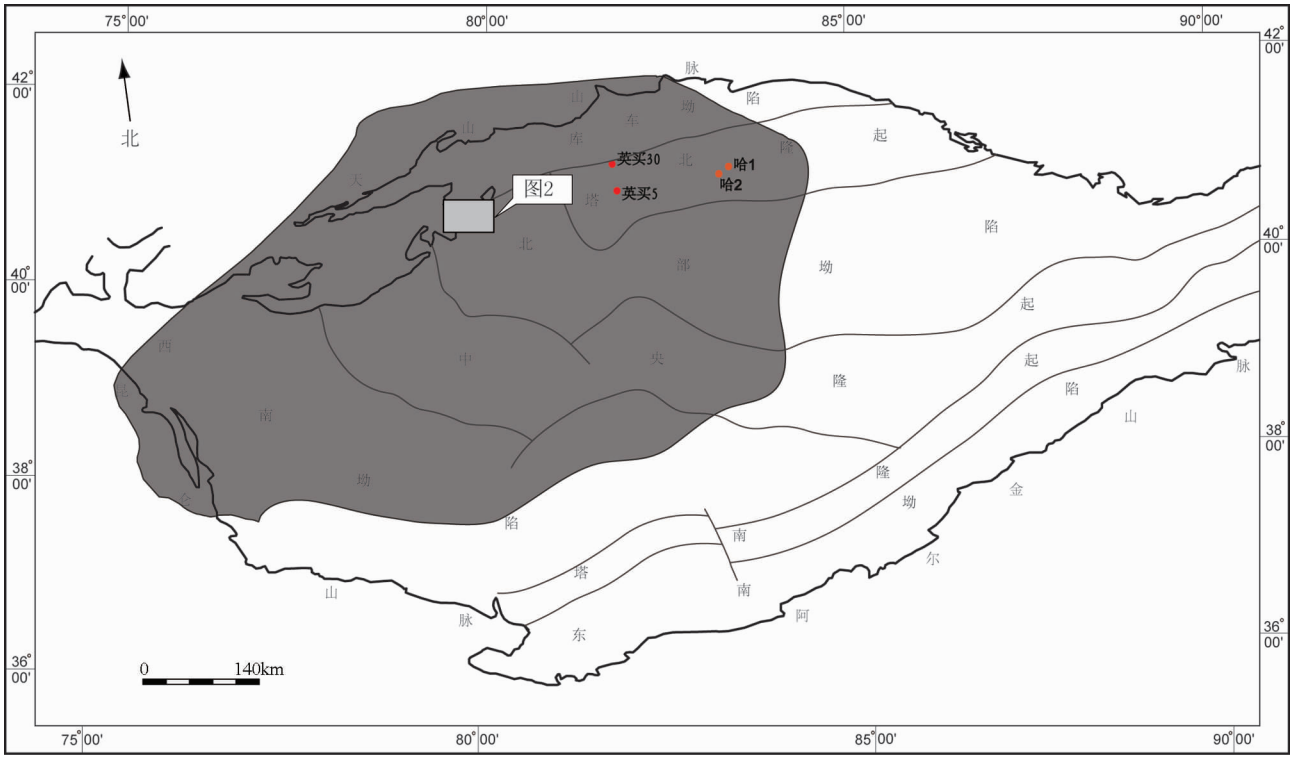


图 1 塔里木盆地区域地质简图

Fig. 1 Sketch geological map of the Tarim basin

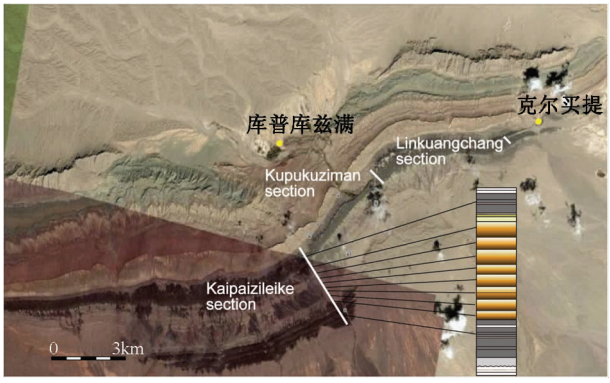


图 2 柯坪地区二叠纪溢流玄武岩野外剖面 Goolge Earth™遥感影像图及剖面位置示意

图中柱状图的分层与遥感影像中的红-白色影纹组合相对应

Fig. 2 Google Earth™ satellite image of the Keping Permian outcrops, showing locations of the outcrop cross sections

Stratigraphic divisions shown in the inset column section are corresponding to the red-white stripes

2004；杨树锋等，2005，2007；厉子龙等，2008；Jiang *et al.*，2006；Yang *et al.*，2007；Zhang *et al.*，2008；陈咪咪等，2010；Tian *et al.*，2010；Yu *et al.*，2010），而且有高 Mg 苦橄岩（Tian *et al.*，2010）。上述特征均表明：塔里木早二叠世玄武岩构成一个典型的大陆溢流玄武岩省（Tian *et al.*，2010）。

塔里木早二叠世溢流玄武岩均出露于盆地周边的新生代褶皱、隆起带，主要包括柯坪库普库兹满组和开派兹雷克玄武岩，塔西南棋盘组玄武岩，巴楚县黑山头玄武岩等喷出岩露头。另外巴楚县一间房、三岔口和小海子一带广泛出露的辉绿岩墙群以及瓦基里塔格层状杂岩体都具有相似的早二叠世侵位年龄（陈咪咪等，2010；位荀和徐义刚，2011），也属于溢流玄武岩省的重要组成部分。

本文所研究的柯坪地区（图 1）位于塔里木盆地西北缘，构造上属于柯坪断隆，是塔里木盆地向天山的过渡带。由于后期逆冲推覆作用，地层发生掀斜，连续出露了前寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系、石炭－二叠系、新近系等一系列地层（张师本，2003）。其中，该区的早二叠世剖面拥有塔里木盆地中保存最完整，出露最好的早二叠世火山岩露头。

在柯坪克尔买提-库普库兹满一带，出露的地层从北往南时代渐新。从 Google Earth 遥感图上可以清晰识别出两大套黑色玄武岩（图 2），根据张师本（2003）的划分，位于北侧的较老的玄武岩属于库普库兹满组上亚组，位于南侧的上部玄武岩属于开派兹雷克组上亚组。两套玄武岩上下均为杂色陆相碎屑岩，以岩屑砂岩、粉砂岩为主，夹少量泥岩、泥灰岩等。库普库兹曼组下伏地层为石炭系康克林组浅灰色亮晶生物屑灰岩夹细砂岩，反映滨浅海环境，与早二叠陆相沉积差异较大。开派兹雷克组之上为上二叠统吴家坪阶沙井子组泥岩、钙质泥岩夹石膏，表明开派兹雷克组溢流玄武岩喷发时，该地区仍为陆相环境（张师本，2003）。

英买力地区位于塔北隆起西部，西为阿瓦提凹陷，东邻哈拉哈塘凹陷。在该区的石油勘探工作中，多口油井钻遇火成岩，井下火成岩最大厚度超过 1000m，主要岩性为玄武岩，安山岩以及少量火山碎屑岩。

哈拉哈塘地区位于塔北隆起东部，北邻库车坳陷，南邻北部坳陷（又称“满加尔坳陷”）。二维地震资料显示区内二叠系玄武岩与塔北西部英买力井区的玄武岩为连续分布。工区内二叠系火山岩厚度为 100～300m 不等，西南部最厚，向东北迅速减薄（上官时迈等，2011）。

2 火山地层学特征

作者在柯坪野外露头区实地测量了 3 条代表性剖面，自西向东分别是开派兹雷克剖面、库普库兹满剖面和磷矿厂剖面（图 2），并与英买力井区和哈拉哈塘井区的四口代表性探井钻遇的二叠系火山岩地层进行了对比（图 3）。根据火山岩岩性和火山-沉积地层组合特征，划分出三个主要的火山活动旋回，分别是库普库兹满溢流玄武岩（KP）旋回，长英质火山碎屑岩（FP）旋回，开派兹雷克溢流玄武岩（KZ）旋回。下面按照火山旋回的顺序对野外和井下剖面的火山地层特征进行介绍。

2.1 库普库兹满玄武岩旋回（KP）

从遥感图（图 2）可看到，此旋回野外露头分布面积最广。在三个野外露头剖面测得该旋回玄武岩喷发厚度在 125～140m 之间。碎屑岩夹层将此旋回分为两个溢流玄武岩单元（E1 和 E2）。第一喷发单元 E1 底部可见厚约 0.5～1m 的玄武质凝灰岩，含碳化的植物化石。E1 可识别出两期熔岩流，第一期熔岩流厚度局部可达 50m，下部柱状节理发育（图 4a），上部为气孔玄武岩和气孔杏仁玄武岩，表明其为典型的陆相喷发。第一期与第二期熔岩流之间可见断续的薄层（几十厘米到一米）玄武质凝灰岩。E1 和 E2 之间为长英质碎屑岩，厚度约为 20m，表明存在一个喷发间断（图 4b）。E2 仅能鉴别一期熔岩流，且其顶部被剥蚀，实测残留厚度可达 50m，残留玄武岩层均为柱状节理发育的块状玄武岩，无气孔或含少量气孔，表明该层玄武岩的富气孔杏仁层段均遭剥蚀，其原始厚度应明显大于现存厚度。该玄武岩流底部可见厚达 1m 的玄武质凝灰岩和碳化植物化石，顶部剥蚀界面之上亦可见少量玄武质凝灰岩，表明该期熔岩流之后还存在玄武岩喷发，但熔岩流可能未到达该区。

三维地震资料显示英买力井区约 5000～6500m 深度的二叠系地层中连续分布一套巨厚的玄武岩层，根据三维地震资料限定的分布面积超过 1000km^2（Tian *et al.*，2010），二维地震剖面追索显示该套玄武岩在整个塔北二叠系地层中虽厚度有变化，但分布连续，可以大范围对比。英买 30 井共钻遇玄武岩厚度超过 1000m，其中夹有三层长英质凝灰岩（图 3）（Tian *et al.*，2010），可作为划分喷发单元的依据，于红娇

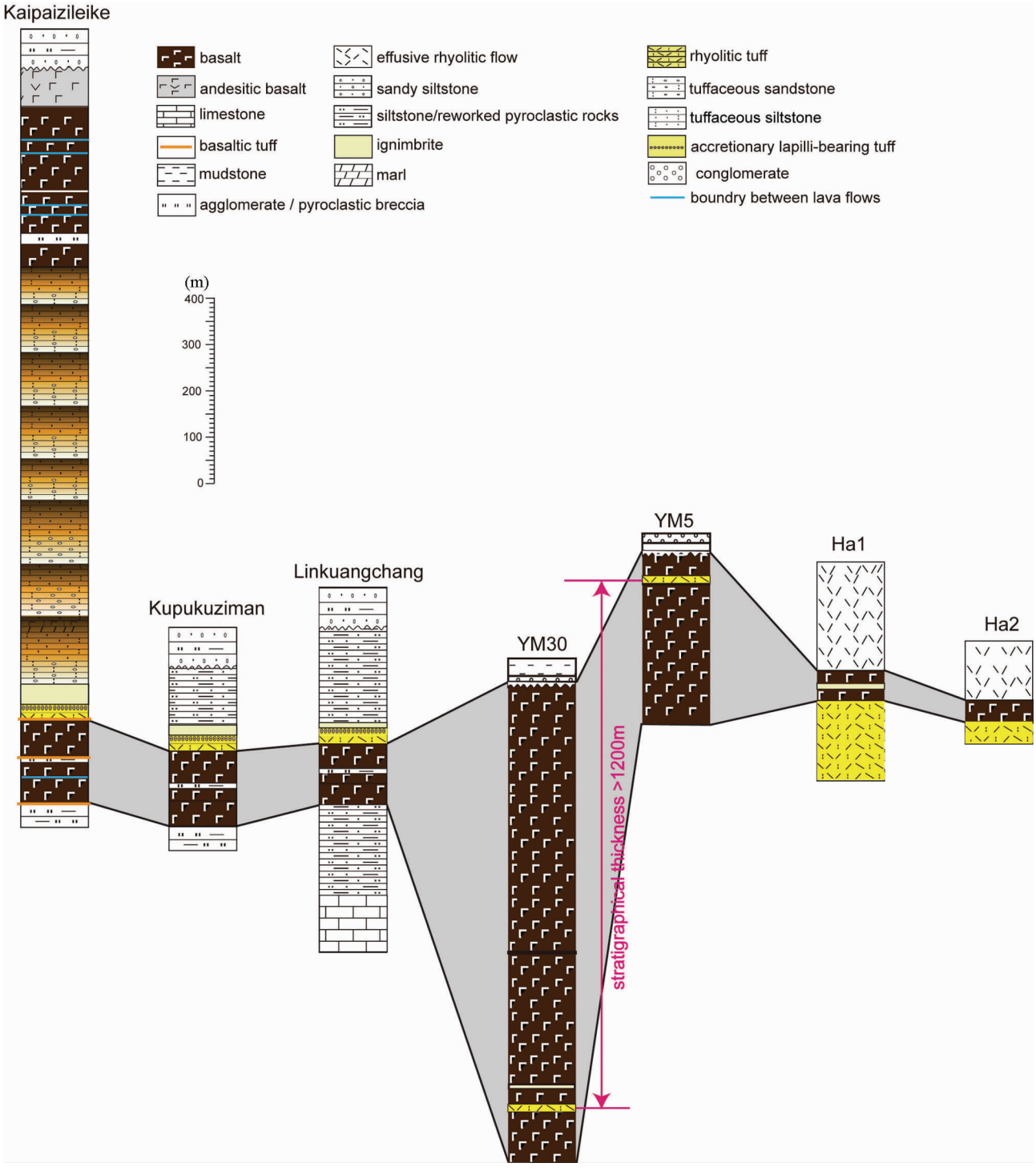


图 3 柯坪地区二叠纪溢流玄武岩火山地层学特征示意图

YM30, YM5 资料来源于 Tian *et al.* (2010)

Fig. 3 Schematic volcanic stratigraphy of flood volcanic units emplaced during Permian flood basalt volcanism in Keping

The data of YM30 and YM5 after Tian *et al.* (2010)

等(2009)根据测井数据恢复的玄武岩密度和孔隙度特征以及火山岩组合特征,将英买力井区火山岩划分出 4 个喷发单元,其中下面三个喷发单元均由薄层凝灰岩 + 巨厚溢流玄武岩构成,顶部喷发单元为玄武质凝灰岩。上述火山层序特征与 KP 旋回一致。另外,根据英买 30 井的录井资料,该套玄武岩之下为志留系砂岩,从层位对比上,也说明英买力井区玄武岩应属 KP 旋回。

位于塔北东部哈拉哈塘井区的二叠系火山岩与塔北西

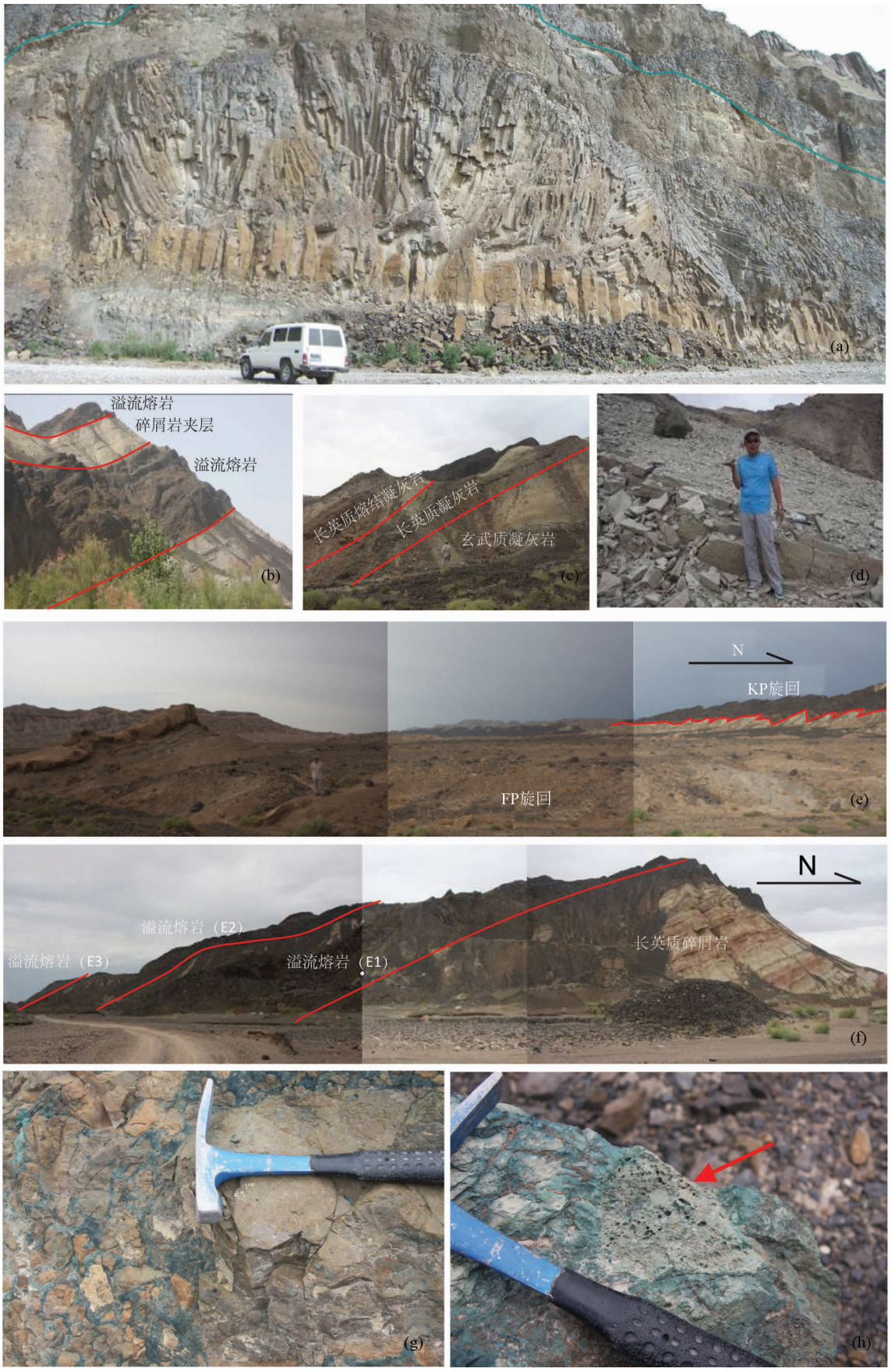


图 4　柯坪地区二叠纪溢流玄武岩野外剖面及露头特征

(a)-库普库兹满组溢流熔岩远景图,厚度数十米,柱状节理;(b)-库普库兹满溢流玄武岩旋回底部远景图,自图中右下往左上方依次是,石炭纪砂岩,溢流熔岩(E1),火山碎屑岩夹层,溢流熔岩(E2);(c)-A 剖面中玄武质凝灰岩、长英质凝灰岩和长英质熔结凝灰岩远景,红线示三者界线,其中玄武质凝灰岩和长英质凝灰岩之间的界线亦为玄武质火山作用和长英质火山作用的界线;(d)-长英质火山碎屑岩剖面底部激浪堆积物近景,激浪堆积物呈浅绿色,层状构造发育;(e)-含长英质火山碎屑岩旋回远景图,左侧红线示库普库兹满溢流玄武岩和含长英质碎屑岩界线;(f)-开派兹雷克溢流玄武岩旋回远景图,右侧红线示长英质熔结凝灰岩和溢流熔岩界线,此界线亦为长英质火山作用和玄武质火山作用的界线,图中细红线示三期溢流熔岩之间的界线;(g)-火山集块熔岩近景,见大量棱角状火山岩块;(h)-火山集块熔岩近景,箭头示浮岩角砾

Fig. 4 Characters of the section and the outcrop of the Permian flood basalt in Keping

(a)-distant view of the Kupukuziman flood basalt, with thickness up to several tens of meters, with columnar joints; (b)-distant view of the bottom side of the Kupukuziman flood basalt, successively from the lower right to the upper left are Carboniferous sandstone, flood basalt (E1), interbedded pyroclastic rock, flood basalt (E2); (c)-in A section, distant view of the basaltic tuff, felsic tuff and felsic ignimbrite, with the red lines showing their boundaries, the boundary of the basaltic tuff and the felsic tuff is also the boundary of the basaltic volcanism and the felsic volcanism; (d)-close shot of the basal surge deposits at bottom of the felsic pyroclastic rock cycle, with light green in color and bedded structure developed; (e)-distant view of the felsic pyroclastic rock cycle, the red line on the left shows the boundary of the Kupukuziman flood basalt and the felsic epiclastic rock; (f)-distant view of the Kaipaizileike flood basalt cycle, the red line on the right side shows the boundary of the felsic ignimbrite (right to the line) and the lava flow (left to the line), also the line is the boundary line of the felsic volcanism and the basaltic volcanism; the thin red lines shows the boundary of the three stages of flood basalt; (g)-close shot of the agglomerate lava, massive angular blocks set in a magmatic matrix which was altered to be hydrothermal alteration minerals by metasomatism; (h)-close shot of the agglomerate lava, the arrow shows the pumice

部火山层序特征差别较大,上官时迈等(2011)根据三维地震资料以及钻探和测井资料将该区火山作用自下而上划分为三个期次:第一期以碎屑岩夹玻屑凝灰岩为主,玻屑凝灰岩厚度较小,但在全区皆有分布;第二期是玄武岩,厚度较小,根据岩石结构判断应属溢流相玄武岩喷发;第三期为英安质熔岩和熔结凝灰岩,厚度变化较大,在哈 4 附近呈熔岩穹丘状产出,表明该期喷发为酸性熔岩喷溢与热火山碎屑流喷发。二维地震剖面显示,英买力井区和哈拉哈塘井区的火山岩连续分布,中间不具有明显的沉积岩夹层。根据空落相凝灰岩广泛分布并被溢流相玄武岩覆盖的特征,我们认为第一、第二期火山喷发可与 KP 旋回对比,第三期的喷溢相酸性熔岩无法与 KP 旋回对比,可能晚于 KP 旋回。

综上,KP 旋回在塔北地区广泛分布,其火山岩层以溢流玄武岩为主,但不同熔岩流之间夹有薄层凝灰岩。这可能是由于溢流玄武岩活动早期,玄武岩浆在上升过程中与地表或地下含水层相遇,水-岩浆强烈相互作用有关,此特征与 NAIP (Peate *et al.*, 2003b)、Afro-Arabian(Peate *et al.*, 2005)相似。

2.2 长英质火山碎屑岩旋回(FP)

柯坪地区的长英质火山碎屑岩旋回一直被忽视,其火山地层特征和分布也不清楚。我们在柯坪地区的三个露头剖面中,首次发现了广泛分布、层位稳定的空落相长英质火山灰和火山碎屑流相的熔结凝灰岩,从而确定了柯坪地区长英质火山碎屑岩旋回的存在。根据岩石学特征,该旋回从下而上可分为四层:第一层为含增生火山砾的空落相凝灰岩;第二层为原生的熔结凝灰岩;第三层为经历再沉积作用的火山碎屑岩(reworked pyroclastic rocks);至第四层过渡为含砾粗砂岩-砂岩-粉砂岩的碎屑岩(epiclastic)组合,但其中亦夹有较多火山碎屑。下面分层进行详细描述:

FP 旋回底部的空落相凝灰岩为灰白色,总厚度在 0.2 ~ 1m,发育稳定的平行层理(图 4d)。凝灰岩层中见多层增生火山砾,其形状为均为椭圆形,长短轴之比 ≥1.5(图 5b)。部分增生火山砾具有软变形特征,表明其沉积时仍然湿润(Self, 1983)。增生火山砾及基质主要由原生玻屑(>80%)和少量岩屑及晶屑组成,玻屑粒度 <250μm(图 5c)。增生火山砾内部玻屑粒度较粗,边缘玻屑粒度极细,且不具有明显的定向排列和变形特征。背散射图像(图 5c)显示,玻屑为鸡骨状或长圆弧状,应属破裂气泡壁型,指示其形成于岩浆剧烈气泡化过程(Heiken, 1972)。

熔结凝灰岩在开派兹雷克剖面出露较好,厚度可达 2m,但露头不连续。熔结凝灰岩具典型的假流纹构造(图 5d),含有较多岩屑,包括长英质凝灰岩岩屑、块状英安岩岩屑以及少量玄武质岩屑和非火成岩屑,晶屑以酸性长石和石英为主,可见少量辉石。局部可见塑形变形的浆屑,呈火焰状。玻屑含量可达 20% ~30%,其形态与空落相凝灰岩中玻屑类似,并可见破碎的增生火山砾(图 5e),表明其来自下部的凝灰岩层。

再沉积火山碎屑岩(reworked pyroclastic rocks)在本文特指具有水下沉积特征,但碎屑成份中火山碎屑占绝大多数的岩石。该层在三个剖面均很发育。从露头来看,其具有类似岩屑砂岩的外貌,镜下特征(图 5f)显示其碎屑主要由轻度磨圆的熔岩、凝灰岩岩屑,石英和长石碎屑以及少量火山灰球组成,结构为颗粒支撑,颗粒间隙可见次生的石英微晶,表明其经受了再沉积作用。按照 Fisher and Schmincke(1984)的定义,本套岩石为再沉积火山碎屑岩。

再沉积火山碎屑岩之上为含砾粗砂岩-砂岩-粉砂岩的碎屑岩(epiclastic)组合,夹薄层泥灰岩。根据 Google Earth™ 遥感图像及野外实地测量,可确定出 8 组沉积韵律层理。FP 旋回中火山碎屑岩所占的比例较小(图 4e)。该套组合中岩

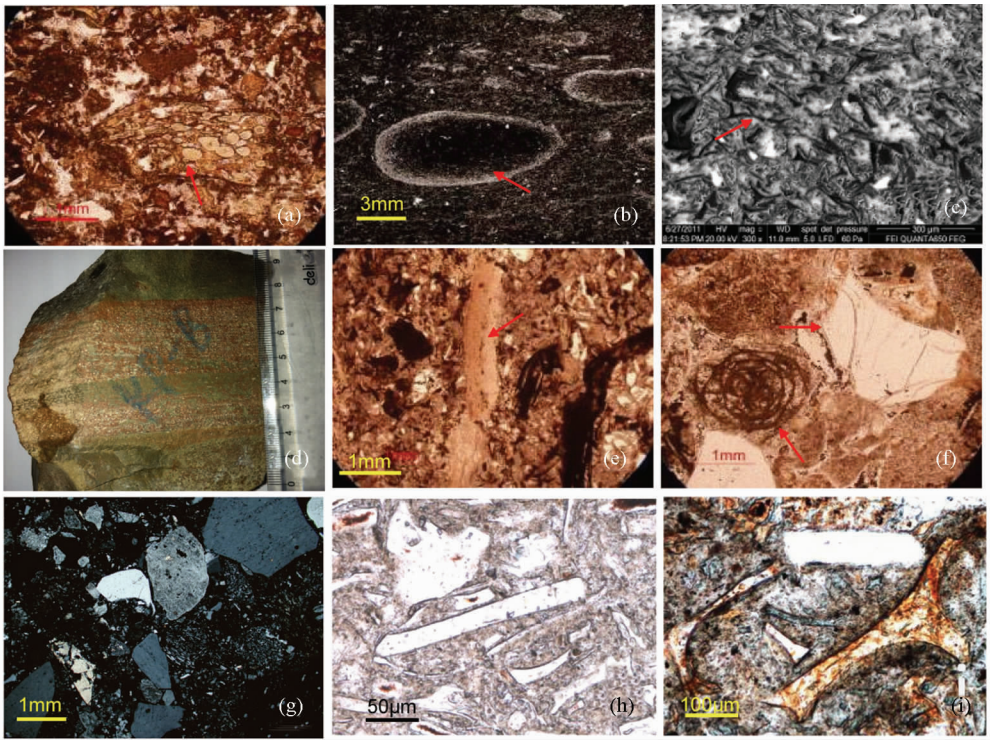


图 5　柯坪地区二叠纪溢流玄武岩岩相学、矿物学特征

(a)-库普库兹满剖面溢流玄武岩旋回顶部玄武质凝灰岩镜下特征，图中箭头所示为浮岩碎屑，示强烈爆炸式喷发的特征；(b)-含增生火山砾凝灰岩镜下特征，图中箭头所示为椭圆状增生火山砾，其长轴约为 1cm；(c)-含增生火山砾凝灰岩在扫描电镜下的特征，图中区域拍摄于增生火山砾内部，含大量鸡骨状玻屑(箭头所示)，示强烈爆炸式喷发的特征；(d)-库普库兹满剖面顶部玄武质熔结凝灰岩手标本特征；(e)-开派兹雷克剖面中长英质凝灰岩镜下特征，图中箭头所示为增生火山砾破碎后的边部残片，指示其层位对应图(c)中所示的空落相凝灰岩；(f)-长英质火山碎屑岩底部原生熔结凝灰岩的背散射图像，图中左上方箭头所指为被熔浆胶结的岩屑，下方箭头所指为熔浆液滴淬冷收缩形成的同心环状裂隙(珍珠构造)，反映了熔结凝灰岩的原生结构特征；(g)-英买 30 井 6333m 岩心镜下特征，岩性为凝灰岩，可见含呈自形长条状钠长石与粒状石英的岩屑，晶屑与岩屑多呈破碎、尖角等不规则形状，边缘有熔蚀；(h)-哈 1 井 5541m 岩心镜下特征，示强烈爆炸成因的玻屑凝灰岩；(i)-哈 2 井 5492～5494m 岩心镜下特征，示强烈爆炸成因的玻屑凝灰岩

Fig. 5　Lithofacies characters of the Permian flood basalt in Keping

(a)-photomicrograph of the basaltic tuff situated at the top of the Kupukuziman flood basalt, the arrow shows a pumice fragment, indicating a violently explosive origin; (b)-photomicrograph character of the lapilli tuff, the arrow shows a elliptical accretionary lapillus, the long axis of which is 1cm; (c)-scanning electron microscope (SEM) of the lapilli tuff, the image was filmed inside the lapillus, containing abundant chicken boned glass shard (as the arrow shows), indicating a violently explosive origin; (d)-hand specimen of the basaltic ignimbrite at the top of the Kupukuziman section; (e)-photomicrograph of the felsic tuff in B section, the arrow shows the fragment of the accretionary lapillus, indicating its position corresponding with the airfall tuff in Fig. 5c; (f)-back scatter image of the primary ignimbrite in the bottom part of the felsic pyroclastic rock, the arrow in the upper left shows the debris being glued by the magma, the arrow in below shows the homocentric ringlike fissure which was formed by the droplet of the magma shrinking when quenching, reflecting the characteristic of the primary texture of the ignimbrite; (g)-drilling core from borehole YM30 with the depth of 6333m, tuff with the debris of the striplighted albite and granulous quartz, the crystal fragments and the debris are mainly crushed and closed angled, with the edge corroded occasionally; (h)-drilling core from borehole HA1 with the depth of 5541m, the vitric tuff indicating a violently explosive origin; (i)-drilling core from borehole HA2 with the depth of 5492～5494m, the vitric tuff indicating a violently explosive origin

屑含量高且其主要类型为长英质火山岩岩屑。另外，在正常碎屑岩层序中可见多层火山灰夹层，表明在该区形成正常碎屑岩的同时其它地区可能仍有火山活动。

英买力井区 KP 旋回巨厚层玄武岩中见多层长英质火山岩夹层。其中位于上部层位的岩性为英安质熔结凝灰岩，下部层位为流纹质凝灰岩(图 5g)，从火山岩相特征上，似乎下部凝灰岩可与柯坪地区 FP 旋回空落相凝灰岩对比。

哈拉哈塘井区火山岩段下部玻屑凝灰岩层分布广泛，而且从 Ha1 和 Ha2 井分别采得的玻屑凝灰岩具有非常相似的岩相学特征，均为玻屑含量高、玻屑形态以破裂气泡壁型为主、无明显压实现象(图 5h，i)，表明其应为空落相火山碎屑堆积，可与柯坪地区 FP 旋回空落相凝灰岩对比。而该区上部英安质熔岩和熔结凝灰岩应属喷溢相-热火山碎屑流相，且喷发规模远大于柯坪及英买力地区，说明该区可能位于长

英质火山活动的中心。

综上,FP 旋回下部为原生的火山碎屑岩,包括空落相(可见增生火山砾)和热火山碎屑流相。部分火山碎屑岩经历了搬运、再沉积作用而具有正常沉积岩的结构特征。FP 旋回上部为厚层的长英质碎屑岩,代表该区存在火山活动间断。FP 旋回在整个塔北地区空间上分布不均:以哈拉哈塘地区的长英质火山活动最为剧烈;FP 旋回与 KP 旋回的火山活动时间有交叠。

2.3 开派兹雷克玄武岩旋回(KZ)

KZ 旋回主要包含四个溢流玄武岩单元(E1, E2, E3, E4)(图 4f)。KZ 旋回下伏地层为 FP 旋回顶部的长英质碎屑岩。其上是第一喷发单元 E1,E1 仅能鉴别出一期熔岩流,厚度约为 50m。在 E1 和 E2 之间发育一套熔浆胶结的火山集块熔岩(agglomerate lava)。火山集块包括棱角状刚性岩块和浮岩角砾,沿岩块和角砾间的裂隙充填玄武质熔浆胶结物,但大部分胶结物已经受到交代而被绿色热液蚀变矿物(绿泥石等)取代(图 4g,h)。集块熔岩之上的第二喷发单元 E2 中共识别出三期熔岩流,第一期厚度达 50m,柱状节理发育,第二、第三规模较小,顶部为长英质碎屑岩。第三喷发单元包括三期熔岩,第一、二期规模较小,厚度仅 3 ~ 5m,第三期为规模巨大的柱状节理玄武岩。厚度从 20 ~ 30m 不等。E2 之上是第三喷发单元 E3,E3 总厚度约 160m,共鉴别出三期熔岩流,厚度从 30 ~ 70m 不等,在局部发育柱状节理。第四期为安山质玄武岩,含长石斑晶,基质富斜长石,玻基交织结构,气孔杏仁构造。由于当地施工原因,E3 和 E4 间在地表的界线被覆盖。

从现有资料来看,KZ 旋回在英买力和哈拉哈塘地区缺失。究其原因,KZ 旋回中的熔岩流可能受地形控制和运移能力的影响,未到达上述地区;也可能到达该地区之后遭受剥蚀,未保存下来。

2.4 火山地层分布规律总结

在塔北地区,火山地层分布基本特征是:(1)火山作用经历了"基性溢流玄武岩(KP)-酸性火山碎屑岩(FP)-基性溢流玄武岩(KZ)"的演变过程;(2)基性旋回主要岩性是玄武岩,玄武质凝灰岩;(3)长英质旋回主要由火山碎屑岩构成,可能经历了再沉积作用而形成厚层长英质碎屑岩;(4)KP 和 FP 旋回在时间和空间上存在交叠现象。

长英质火山岩在塔北分布较广,但厚度不均匀,总体来看其比例并不大。在火山岩层出露最全的开派兹雷克剖面,长英质火山岩总厚度占火山总出露厚度的比例为 ~8%;在英买力井区长英质火山岩所占比例小于 5%;在哈拉哈塘地区,长英质地层所占比例很大,超过 60%;而在库车河剖面,仅有酸性岩的出露,未见基性岩露头;在塔中地区,塔西南地区,至今未见长英质火山岩、火山碎屑岩的报道。总体来看,长英质火山岩占统治地位的区域,其火山岩类型主要为喷溢相熔岩,属于近火山口相,例如库车河剖面就存在指示破火山口存在的英安质熔结集块岩。由于长英质熔岩黏度大,上述近火口相厚层火山岩在横向上不可能延续很远距离。综上,柯坪-英买力地区长英质火山岩所占比例可能较具代表性,即塔北酸性火山岩所占比例可能在 2% ~8%,与其它几个含长英质火山碎屑岩的大陆溢流玄武岩省(例如 Parana-Etendeka, Afro-Arabian 等,据 Bryan *et al.*,2002)类似。

3 火山岩相分析

由于二叠纪塔里木溢流玄武岩年代久远,且露头稀少,进行系统火山学填图研究其喷发特征和火山岩相十分困难。因此我们主要通过岩石学特征、地面遥感分析、大范围火山地层对比等方法进行火山岩相分析。下面对研究区不同火山岩相的特征进行分析。

溢流相玄武质火山作用在大陆溢流玄武岩省中占统治地位,而且是其得以命名的原因(Tyrrell,1937)。典型的大陆溢流玄武岩应具有如下特征:熔岩流长度与厚度之比(aspect ratio)很大,在 50 ~ 500 之间;岩浆由狭长的裂隙供给,没有明显的火山机构;在很远的距离内,表层和内部结构几乎没有明显变化(Self *et al.*,1997; White *et al.*,2009)。柯坪露头区的 KP 和 KZ 旋回均发育多层溢流相玄武岩,且单个熔岩流的长度远大于其厚度。从图 2 可见,KP 旋回溢流相玄武岩在超过 30km 的范围内连续分布,KZ 旋回溢流相玄武岩的出露范围略小,但很可能是由于后期沉积物覆盖而未能出露地表。更大范围的遥感影像(Google Earth™)表明:研究区西侧还分布有超过 50km 的连续溢流玄武岩露头,该露头虽然被近南北向走滑断层切断,但断层两侧的层位完全可以对应。大量的野外观察已证明柯坪露头区溢流玄武岩未见明显的火山机构,表明该区玄武岩应为裂隙式喷发。另外,在数十公里范围内的多个剖面上,玄武岩均具有自下而上发育柱状节理-气孔玄武岩-杏仁玄武岩的特征,变化很小,表明熔岩流结构在大范围内是一致的。在英买力地区的地震剖面研究也表明:在超过 1000km^2 区域中,连续分布厚达 2 ~ 3km 的巨厚玄武岩层(Tian *et al.*, 2010)。上述特点表明:塔里木早二叠世玄武岩具有典型大陆溢流玄武岩的特征。

虽然溢流相玄武岩占据主要地位,但在 KP 旋回中可见多层玄武质火山碎屑岩夹于溢流相玄武岩之间,而后者未见明显的含水矿物。图 5a 为库普库兹满剖面 KP 旋回顶部的玄武质火山碎屑岩的特征,由图可见:基质主要由玄武质火山灰组成;碎屑物包括玄武质浮岩岩屑,具有粒玄结构的块状玄武岩岩屑,玄武质增生火山砾等。上述结构特征表明玄武岩喷发时可能环境中含水较多,存在射汽岩浆喷发(phreatomagmatism)(Morrisey *et al.*, 2000; Valentine and Fisher,2000; Ross *et al.*,2005)。

柯坪露头区含增生火山砾长英质凝灰岩具有如下典型特征:(1)分布范围广,厚度稳定;(2)成层性好,平行层理发

育(图4d),未见交错层理;(3)增生火山砾具有软变形特征(图5b);(4)火山灰粒度极细(<250mm),含量超过80%,绝大多数的形态为破裂气孔壁型(图5c)。以上特征表明,该层凝灰岩可能为空落相火山灰沉积,其对应的火山岩浆含有大量挥发份,喷发方式为剧烈爆炸式喷发。增生火山砾是由细粒的火山灰在静电作用和液体表面张力的作用下相互结合而形成的(Gilbert and Lane, 1994; Schumacher and Schmincke,1995),需要湿润的环境(Self,1983; Schumacher and Schmincke,1991),结合增生火山砾同沉积的软变形特征,表明火山喷发时含水较多(White and Houghton,2000; 孙谦和樊祺诚,2005;刘招君等,2008),其火山作用类型可能与下伏玄武质凝灰岩类似,亦属射汽岩浆喷发。图5e中红色箭头所指为出现在熔结凝灰岩结构中的增生火山砾残片,说明其喷发方式可能经历了从射汽岩浆喷发到火山碎屑流的转变(Self,1983)。

再沉积火山碎屑岩虽然其原始火山碎屑结构受到了改造,但岩相学观察表明,该类岩石除了石英和长石外,岩屑几乎均为火成碎屑,包括英安岩碎屑、长英质火山灰球等。另外,薄片中还可见具珍珠岩状裂纹的玻屑和爆裂石英(图5f),前者说明存在遇水淬冷的火山玻璃,后者说明其可能源于爆发相火山作用。

FP旋回上部厚层碎屑岩代表该区岩浆活动较弱,但其中的火山灰夹层的发育表明塔里木其它地区仍然有火山活动。另外,柯坪地区大量长英质碎屑岩的物源可能与英买力地区和哈拉哈塘地区大规模长英质火山碎屑岩喷发活动有关,原生的近源火山碎屑物质是柯坪长英质碎屑岩的合理物源。而长英质碎屑岩中发现的玄武质凝灰岩夹层表明附近仍有玄武质火山活动,暗示其可能与英买力及哈拉哈塘地区的玄武质岩浆活动有关。

KZ旋回中发现的火山集块熔岩可能代表附近存在玄武质岩浆喷发的火山口,但也可能是大规模熔岩流在流动时形成自碎角砾熔岩并由熔浆胶结而形成,是否存在玄武岩火山口还需要更多的野外证据。

4 岩浆喷发模式

在大陆溢流玄武岩省中,溢流熔岩和火山碎屑岩的时空关系对于制约该火成岩省的岩浆作用时限,岩浆作用产物的分布范围都有极其重要的意义。导致火成岩省岩浆作用产物多样性的主要因素是其喷发方式的不同。从现今保留的露头和井下资料可以恢复火成岩省各个阶段的喷发方式。对喷发方式的恢复,可以极大地帮助我们了解整个火成岩省的演化过程。

对全球大陆溢流玄武岩省物理火山学演化特征的研究(White *et al.*,2009)表明:大陆溢流玄武岩早期主要为爆炸式喷发,形成大量火山碎屑岩沉积;主期以裂隙式喷发为特征,形成大规模溢流玄武岩。溢流玄武岩主期喷发包含若干个间断期,间断期形成多期溢流玄武岩之间的火山碎屑岩夹层,即所谓的"layered cake"或"lasagne"。而塔里木溢流玄武岩的溢流相熔岩之下的火山碎屑岩厚度仅为1m左右,未发现类似于Faeroes(~56Ma)和Siberian Traps那样厚度达数百米甚至是千米级的火山碎屑物质,但与Afro-Arabian早期缺失火山碎屑岩相类似(Ross *et al.*,2005)。这可能与后期溢流熔岩对早期火山碎屑岩的剥蚀有关,也可能是因为在早期喷发时缺少地表水,难以提供足够的挥发份。此外,在KP旋回底部的长英质熔结凝灰岩和KZ旋回底部的玄武岩之间发现了厚度达数百米碎屑岩,其碎屑颗粒的物源很有可能是KZ旋回底部的长英质火山碎屑岩,这与Peate在Afro-Arabian发现的产出在主期溢流玄武岩顶部的Epiclastic Sediment相类似,其成因尚需进一步研究(Peate *et al.*,2005)。

根据柯坪露头区岩浆岩,火山碎屑岩产状和岩性特征,本文总结了塔里木溢流玄武岩省在塔北地区的岩浆喷发特征,并依据其喷发特征绘制了火山构造演化(volcanotectonic evolution)模式图(图6)。我们将其火山构造演化过程分为如下7个阶段:

(1)玄武质岩浆上涌至近地表时,遇到地表含水层,发生爆炸,在地表形成热火山碎屑流,以形成玄武质凝灰岩为特征。受热火山碎屑流的烘烤作用,一些地表植物发生碳化。在露头上对应KP旋回底部的含碳化植物化石碎片的玄武质凝灰岩;

(2)玄武质岩浆沿着先前爆炸形成的裂隙状火山口继续上涌,以溢流式喷发至地表,形成熔岩流,以出现巨厚层状溢流玄武岩为特征,在露头上对应KP旋回中的E1溢流玄武岩;

(3)在地表冷却固结的溢流玄武岩阻塞先前形成的裂隙状火山口,在地表形成含水层,当深部岩浆进一步上涌至地表时,产生类似第1阶段的爆炸,产生热火山碎屑流,以形成玄武质凝灰岩为特征,在露头上对应KP旋回中E2层位之上的玄武质凝灰岩;

(4)在局部地区,酸性岩浆喷发。酸性岩浆上涌至近地表时,遇水猛烈爆炸,发生射汽岩浆喷发,以出现含增生火山砾的凝灰岩为特征。射气岩浆喷发形成火山喷发柱(volcanic plume)和火山碎屑流,产生长英质凝灰岩和熔结凝灰岩,在露头上对应FP旋回底部的凝灰岩和熔结凝灰岩。在另一些地区,玄武质岩浆持续喷发,形成类似于(1)、(2)、(3)阶段的产物(模式图中省略);

(5)在局部地区(例如本文的研究区:柯坪露头区)岩浆活动大幅度减弱,形成明显的喷发间断;

(6)在喷发间断期,位于顶部层位的长英质凝灰岩和熔结凝灰岩遭受风化剥蚀,并在局部地区沉积,形成含长英质碎屑的砂岩、泥岩等碎屑岩。很可能对应在KP旋回底部的长英质熔结凝灰岩和KZ旋回底部的玄武岩之间发现的厚度达数百米的碎屑岩。该套碎屑岩的碎屑颗粒之物源很可能

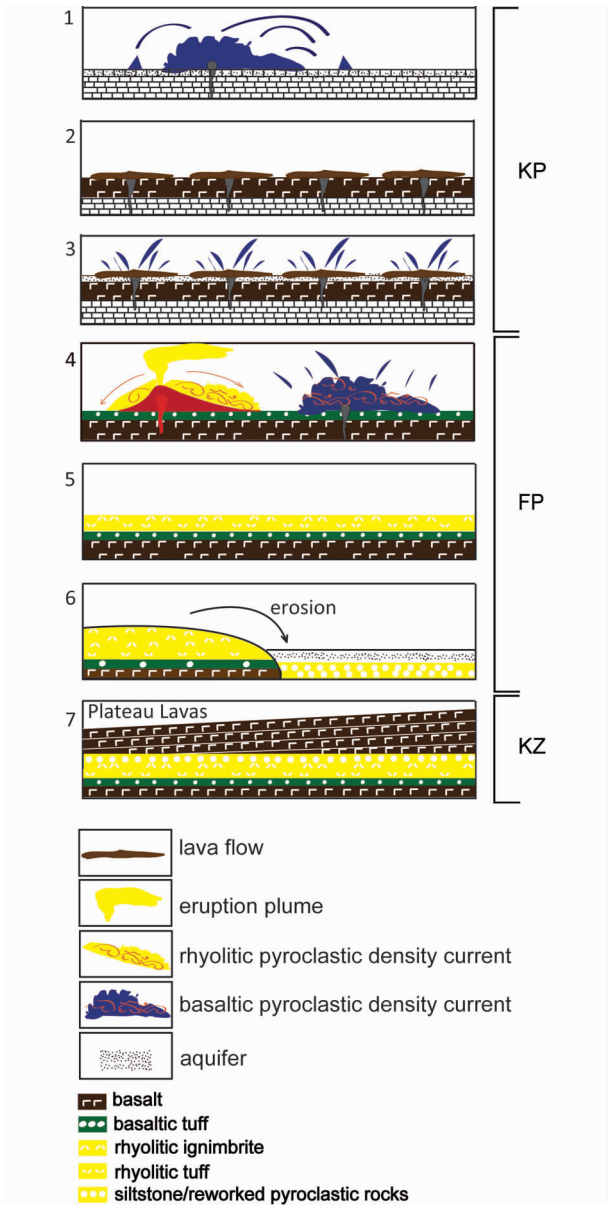


图 6 塔里木二叠纪溢流玄武岩火山构造演化示意图

Fig. 6 Schematic illustration of the volcanotectonic evolution of the Permian flood basalt in Tarim

是 KZ 旋回底部的长英质火山碎屑岩,其成因尚需进一步研究;

(7)酸性岩浆活动结束之后,转变为玄武质岩浆活动,其产物对应 KZ 旋回中的多期溢流玄武岩。

5 与 Afro-Arabian 大火成岩省的对比

目前为止,对大陆溢流玄武岩省中长英质火山作用的研究甚少,尤其是对其物理火山学特征,岩浆成分和喷发规模的研究(Bryan *et al.*, 2002)。对其中长英质火山作用进行过相对详细研究的大陆溢流玄武岩省主要有 Parana-Etendeka 和 Afro-Arabian (Jerram and Widdowson, 2005)。塔里木大陆溢流玄武岩省中长英质单元的发现给我们提供了很好的研究实例,在此将其喷发特征和 Afro-Arabian 的喷发特征作以对比。

Peate *et al.* (2005)将 Afro-Arabian 溢流玄武岩划分为三个期次:(1)主期溢流玄武岩期;(2)主期长英质火山作用期;(3)双峰式火山作用期。"主期溢流玄武岩期"主要产物为溢流玄武岩。主期长英质火山作用期产出岩石主要包括八期熔结凝灰岩,单期厚度从 15 ~ 100m 不等,同时还包括分布在 2700km 外印度洋底的空落相火山灰层,这些火山灰层在地球化学特征上可与陆相熔结凝灰岩对应。通过熔结凝灰岩典型的火山碎屑结构,空落相火山灰大范围分布等特征判断其是强烈爆炸成因,其爆炸时温度较低,约为 850 ~ 1000℃。据估算,现今陆相熔结凝灰岩总体积约为 1500km^3,若将印度洋底发现的空落相凝灰岩计算在内,其长英质火山作用的总产物大于 3000km^3。在整个"主期长英质火山作用期",空落相凝灰岩和熔结凝灰岩占据主导地位。按照 White *et al.* (2009) 的估算,长英质火山岩和火山碎屑岩在 Afro-Arabian 溢流玄武岩中所占的比例约为 5% ~10%。

而塔里木溢流玄武岩在本文中被划分为三个期次:库普库兹满溢流玄武岩期,长英质火山碎屑岩期,开派兹雷克溢流玄武岩期。本文所讨论的 3 个剖面在横向上连续展布超过 10km,加上塔北地区的 YM30, YM5, HA1, HA2 井,其火山地层连续展布超过 400km。综合其火山地层学特征,我们认为在塔里木溢流玄武岩中:(1)溢流玄武岩以多期熔岩流的形式产出,在玄武质火山作用期占据主导地位;(2)长英质火山作用伴随玄武质火山作用而进行;(3)长英质火山作用的产物有可观的体积和展布范围;(4)与玄武质火山作用的产物中溢流熔岩占主导地位相比,长英质火山作用的产物在部分地区以火山岩占主导地位,而在另一些地区以火山碎屑岩占据主导地位;(5)从总的喷发量来看,在大陆溢流玄武岩省中,玄武质火山作用的产物占据主导地位,长英质火山作用的产物占据次要地位。

致谢 感谢罗震宇和刘海泉在柯坪地区野外工作期间的帮助。

References

Baker JA, Snee L and Menzies M. 1996. A brief Oligocene period of flood volcanism: Implications for the duration and rate of continental flood volcanism at the Afro-Arabian triple junction. Earth and Planetary Science Letters, 138: 39 – 55

Bryan SE, Riley TR, Jerram DA, Leat PT and Stephens CJ. 2002. Silicic volcanism: An under-valued component of large igneous provinces and volcanic rifted margins. In: Menzies MA, Klemperer SL, Ebinger CJ and Baker J (eds.). Magmatic Rifted Margins. Geological Society of America Special Paper, 362: 99 – 118

Chen HL, Yang SF, Dong CW, Jia CZ, Wei GQ and Wang ZG. 1997. The discovery of Permian basic rock belt in Tarim Basin and its

tectonic meaning. Geochimica, 26(6): 77 – 87(in Chinese with English abstract)

Chen MM, Tian W, Zhang ZL, Pan WQ and Song Y. 2010. Geochronology of the Permian basic-intermediate-acidic magma suite from Tarim, Northwest China and its geological implications. Acta Petrological Sinica, 26(2): 559 – 572(in Chinese with English abstract)

Cleverly RW, Betton PJ and Bristow JW. 1984. Geochemistry and petrogenesis of the Lebombo rhyolites. In: Erlank AJ (ed.). Petrogenesis of the Volcanic Rocks of the Karoo Province. Special Publication of the Geological Society of South Africa, 13: 171 – 194

Ewart A, Milner SC, Armstrong RA and Duncan AR. 1998. Etendeka volcanism of the Goboboseb mountains and Messum igneous complex, Namibia. Part II: Voluminous quartz latite volcanism of the Awahab magma system. Journal of Petrology, 39: 227 – 253

Fisher RV and Schmincke HU. 1984. Pyroclastic Rocks. Berlin: Springer-Verlag Press, 88 – 124

Gilbert JS and Lane SJ. 1994. The origin of accretionary lapilli. Bulletin of Volcanology, 56: 398 – 411

Heiken G. 1972. Morphology and petrography of volcanic ashes. Geological Society of America Bulletin, 83: 1961 – 1988

Jerram DA and Widdowson M. 2005. The anatomy of continental flood basalt provinces: Geological constraints on the processes and products of flood volcanism. Lithos, 79: 385 – 405

Jia CZ. 1997. Tectonic Characteristics and Petroleum, Tarim Basin, China. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese)

Jiang CY, Jia CZ, Li LC *et al.* 2004. Source of the Fe riched type high Mg magma in Mazhartager region, Xinjiang. Acta Geologica Sinica, 78(6): 770 – 780(in Chinese with English abstract)

Jiang CY, Li YZ, Zhang PB *et al.* 2006. Petrogenesis of Permian basalts on the western margin of the Tarim basin, China. Russian Geology and Geophysics, 47(2): 232 – 241

Li ZL, Yang SF, Chen HL *et al.* 2008. Chronology and geochemistry of Taxinan basalts from the Tarim basin: Evidence for Permian plume magmatism. Acta Petrologica Sinica, 24(5): 959 – 970(in Chinese with English abstract)

Liu ZJ, Miao QY, Liu X and Liu R. 2008. Geological features and significance of base-surge deposits. Oil & Gas Geology, 29(1): 11 – 18(in Chinese with English abstract)

Miller JA and Harris C. 2007. Petrogenesis of the Swaziland and northern Natal rhyolites of the Lebombo rifted volcanic margin, Southeast Africa. Journal of Petrology, 48 – 1: 185 – 218

Milner SC, Duncan AR and Ewart A. 1992. Quartz latite rheoignimbrite flows of the Etendeka Formation, northwestern Namibia. Bulletin of Volcanology, 54: 200 – 219

Milner SC, Duncan AR, Whittingham AM and Ewart A. 1995. Trans-Atlantic correlation of eruptive sequences and individual silicic units within the Parana-Etendeka igneous province. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 69:137 – 157

Morrisey M, Zimanowski B, Wohletz K and Buettner R. 2004. Phreatomagmatic Fragmentation. In: Sigurdsson H, Houghton B, McNutt SR, Rymer H and Stix J (eds.). Encyclopedia of Volcanoes. New York: Academic, 431 – 445

Peate IU. 2003. Volcanostratigraphy, geochronology and geochemistry of silicic volcanism in the Afro-Arabian flood volcanic province (Yemen and Ethiopia). Ph. D. Dissertation. Royal Holloway University of London, 1 – 358

Peate IU, Baker JA, Kent AJR *et al.* 2003a. Correlation of Indian Ocean tephra to individual silicic eruptions from the Oligocene Afro-Arabian flood volcanic province. Earth and Planetary Science Letters, 211: 311 – 327

Peate IU, Larsen M and Lesher CE. 2003b. The transition from sedimentation to flood volcanism in the Kangerlussuaq Basin, East Greenland: Basaltic pyroclastic volcanism during initial Palaeogene continental break-up. Journal of the Geological Society, London, 160: 759 – 772

Peate IU, Baker JA, Al-Kadasi M *et al.* 2005. Volcanic stratigraphy of large-volume silicic pyroclastic eruptions during Oligocene Afro-Arabian flood volcanism in Yemen. Bulletin of Volcanology, 68:135 – 156

Ross PS, Peate IU, McClintock MK, Xu YG, Skilling IP, White JDL and Houghton BF. 2005. Mafic volcaniclastic deposits in flood basalt provinces: A review. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 145(3 – 4): 281 – 314

Saggerson EP and Bristow JW. 1983. The geology and structural relationships of the southern Lebombo volcanic and intrusive rocks, South Africa. Bulletin of Volcanology, 46(2):161 – 181

Schumacher R and Schmincke HU. 1991. Internal structure and occurrence of accretionary lapilli: A case study at Laacher See Volcano. Bulletin of Volcanology, 53: 612 – 634

Schumacher R and Schmincke HU. 1995. Models for the origin of accretionary lapilli. Bulletin of Volcanology, 56: 626 – 639

Self S. 1983. Large-scale phreatomagmatic silicic volcanism: A case study from New Zealand. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 17(1 – 4): 433 – 469

Self S, Thordarson TH and Keszthelyi LP. 1997. Emplacement of continental flood basalt lava flows. In: Mahoney JJ and Coffin MF (eds.). Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism. American Geophysical Union, Geophysical Monographs, 100: 381 – 410

Shangguan SM, Tian W, Li XH, Guan P, Pan M, Chen MM and Pan WQ. 2011. SIMS Zircon U-Pb age of a rhyolite layer from the Halahatang area, northern Tarim, NW China: Constraint on the eruption age of major pulse of Tarim flood basalt. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 47(3): 561 – 564(in Chinese with English abstract)

Sun Q and Fan QC. 2005. Study pregress on volcanic phreatomagmatic eruption. Acta Petrologica Sinica, 21(6): 1709 – 1718(in Chinese with English abstract)

Tian W, Campbell IH, Allen C, Guan P, Pan W, Chen M, Yu H and Zhu W. 2010. The Tarim picrite-basalt-rhyolite suite, a Permian flood basalt from northwest China with contrasting rhyolites produced by fractional crystallization and anatexis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 160(3): 407 – 425

Tyrrell GW. 1937. Flood basalts and fissure eruption. Bulletin of Volcanologique, 2: 89 – 114

Valentine GA and Fisher RV. 2000. Pyroclastic surges and blasts. In: Sigurdsson H, Houghton B, McNutt SR, Rymer H and Stix J (eds.). Encyclopedia of Volcanoes. New York: Academic, 571 – 580

Wei X and Xu YG. 2011. Petrogenesis of Xiaohaizi syentie complex from Bachu area, Tarim. Acta Petrologica Sinica, 27(10): 2984 – 3004 (in Chinese with English abstract)

White J and Houghton B. 2000. Surtseyan and related phreatomagmatic eruptions. In: Sigurdsson H, Houghton B, McNutt SR, Rymer H and Stix J (eds.). Encyclopedia of Volcanoes. New York: Academic, 495 – 512

White J, Bryan SE, Ross PS, Self S and Thordarson T. 2009. Physical volcanology of continental large igneous provinces: Update and review. Studies in Volcanology: The Legacy of George Walker. Special Publications of IAVCEI, 2: 291 – 321

Yang SF, Chen HL, Dong CW *et al.* 1996. The discovery of Permian syenite inside Tarim Basin and its geodynamic significance. Geochimica, 25(2): 121 – 128(in Chinese with English abstract)

Yang SF, Chen HL, Ji DW *et al.* 2005. Geological process of Early to Middle Permian magmatism in Tarim basin and its geodynamic significance. Geological Journal of China Universities, 11: 504 – 511(in Chinese with English abstract)

Yang SF, Li ZL and Chen HL. 2007. Permian bimodal dyke of Tarim Basin, NW China: Geochemical characteristics and tectonic implications. Gondwana Research, 12: 113 – 120

Yang SF, Yu X, Chen HL *et al.* 2007. Geochemical characteristics and petrogenesis of Permian Xiaohaizi ultrabasic dyke in Bachu area, Tarim basin. Acta Petrologica Sinica, 23(5): 1087 – 1096(in Chinese with English abstract)

Yu HJ, Guan P, Pan WQ, Tian W and He GY. 2009. Geophysical

behaviors of volcanic reservoirs, western Tabei uplift, Tarim Basin. Petroleum Exploration and Development, 36(5): 562 – 568 (in Chinese with English abstract)

Yu X, Chen HL, Yang SF *et al*. 2010. Distribution characters of Permian basalts and their geological significance in the Kalpin area, Xinjiang. Journal of Stratigraphy, 34(2): 127 – 134 (in Chinese with English abstract)

Zhang CL, Li XH, Li ZX, Ye HM and Li CN. 2008. A Permian layered intrusive complex in the western Tarim block, northwestern China: Product of a ca. 275Ma mantle plume? Journal of Geology, 116(3): 19

Zhang CL, Xu YG, Li ZX and Wang HY. 2010. Diverse Permian magmatism in the Tarim Block, NW China: Genetically linked to the Permian Tarim mantle plume? Lithos, 119: 537 – 552

Zhang SB. 2003. A Guide to the Stratigraphic Investigation on the Periphery of the Tarim Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 1 – 280 (in Chinese)

附中文参考文献

陈汉林, 杨树锋, 董传万, 贾承造, 魏国齐, 汪振国. 1997. 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(6): 77 – 87

陈咪咪, 田伟, 张自力, 潘文庆, 宋宇. 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(2): 559 – 572

贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征和油气. 北京:石油工业出版社

姜常义, 贾承造, 李良辰, 张蓬勃, 卢登蓉, 白开寅. 2004. 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(6): 770 – 780

厉子龙, 杨树锋, 陈汉林, Langmuir CH, 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, 24(5): 959 – 970

刘招君, 苗巧银, 刘祥, 柳蓉. 2008. 基浪堆积物(岩)地质特征及其地质意义. 石油与天然气地质, 29(1): 11 – 18

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), 47(3): 561 – 564

孙谦, 樊祺诚. 2005. 火山射气岩浆喷发作用研究进展. 岩石学报, 21(6): 1709 – 1718

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(10): 2984 – 3004

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(2): 121 – 128

杨树锋, 陈汉林, 冀登武, 厉子龙, 董传万, 贾承造, 魏国齐. 2005. 早中二叠世岩浆作用过程及地球动力学意义. 高校地质学报, 11(4): 504 – 511

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(5): 1087 – 1096

于红娇, 关平, 潘文庆, 田伟, 何国源. 2009. 塔北隆起西部火山岩储集层空间格架的地球物理响应. 石油勘探与开发, 36(5): 562 – 568

余星, 陈汉林, 杨树锋, 厉子龙, 王清华, 李兆恒. 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(2): 127 – 134

张师本. 2003. 塔里木盆地周缘地层考察指南. 北京: 石油工业出版社, 1 – 280