

塔西南其木干早二叠世玄武岩的喷发时代及地球化学特征*

李洪颜¹ 黄小龙^{1**} 李武显¹ 曹俊^{1,2} 贺鹏丽^{1,2} 徐义刚¹

LI HongYan¹, HUANG XiaoLong^{1**}, LI WuXian¹, CAO Jun^{1,2}, HE PengLi^{1,2} and XU YiGang¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院大学, 北京 100049

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

2013-04-22 收稿, 2013-07-01 改回.

Li HY, Huang XL, Li WX, Cao J, He PL and Xu YG. 2013. Age and geochemistry of the Early Permian basalts from Qimugan in the southwestern Tarim basin. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3353–3368

Abstract The Early Permian basalts of the Qipan Formation in the Qimugan section are important magmatism belonging to the southwestern part of Tarim Large Igneous Province. Based on the detrital zircon U-Pb dating on the underlying and overlying sandstones, it is suggested that the Qimugan basalts erupted at ca. 284Ma, which is contemporary with the basalts of the Kaipazileke Formation in the Keping area. The Qimugan basalts have wide range of major and compatible trace element concentration, indicating extensive fractional crystallization of olivine, clinopyroxene and feldspar. The Qimugan basalts are enriched in Th, U and LREE, with weak to moderate negative Eu anomaly ($Eu/Eu^* = 0.82 \sim 0.99$) on the chondrite-normalized REE patterns and negative Nb and Ta anomalies on the primitive mantle-normalized trace elements diagram. They have negative $\varepsilon_{Nd}(t)$ ($-4.8 \sim -3.9$) and $\varepsilon_{Hf}(t)$ values ($-2.4 \sim -1.6$) and high initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios ($0.7078 \sim 0.7086$) with decoupled Hf-Nd isotopes, suggesting an enriched mantle source containing pelagic sediments which were probably introduced during assembly of the Rodinia supercontinent. Overall, the Qimugan basalts are geochemically identical with the basalts of the Kaipazileke Formation in the Keping area, but have more enriched Sr-Nd-Hf isotopic compositions. Thus there is a stronger mantle metasomatism by pelagic sediments beneath the marginal area than the interior of the Tarim Block.

Key words Southwestern Tarim basin; Qipan Formation; Detrital zircon; Geochemistry; Pelagic sediments

摘要 塔西南其木干剖面棋盘组玄武岩是塔里木盆地早二叠世大火成岩省西南部的重要组成部分, 根据其下伏和上覆砂岩地层的碎屑锆石 U-Pb 年龄分析可以限定其喷发于 ~284Ma, 相应于柯坪地区开派兹雷克组玄武岩的形成时代。其木干玄武岩的主量元素和 Cr、Ni 等相容元素含量变化较大, 表明其曾经历广泛的橄榄石、辉石和长石结晶分异作用; 所研究样品相对富集 Th、U 和 LREE, 具有弱-中等程度的 Eu 负异常 ($Eu/Eu^* = 0.82 \sim 0.99$), 在微量元素蛛网图上显示 Nb-Ta 负异常; 较低的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ ($-4.8 \sim -3.9$) 和 $\varepsilon_{Hf}(t)$ ($-2.4 \sim -1.6$) 值、较高的 ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i ($0.7078 \sim 0.7086$) 和存在 Hf-Nd 同位素解耦等特征表明, 其木干玄武岩的源区为受远洋沉积物组分交代富集的岩石圈地幔, 该富集过程主要与 Rodinia 超大陆聚合过程有关。总体上, 其木干玄武岩的地球化学特征类似于柯坪地区的开派兹雷克组玄武岩, 但具有更为富集的 Sr-Nd-Hf 同位素, 暗示了塔里木板块周缘比板内地区可能经受了更强烈的远洋沉积物组分的交代富集。

关键词 塔西南; 棋盘组; 碎屑锆石; 地球化学特征; 远洋沉积物

中图法分类号 P588.145; P597.3

* 本文受国家 973 项目(2011CB808906)资助。

第一作者简介: 李洪颜, 男, 1981 年生, 副研究员, 构造地质学专业, E-mail: hongyanli@gig.ac.cn

** 通讯作者: 黄小龙, 男, 研究员, 岩石地球化学专业, E-mail: xlhuang@gig.ac.cn

1 引言

塔里木盆地西缘隆起区(皮羌-巴楚-柯坪一带)广泛出露二叠纪玄武岩、辉绿岩、正长岩、石英正长岩以及石英正长斑岩等,与盆地覆盖区同时代的岩浆岩构成一个分布面积大于250 000km²的大火成岩省(贾承造等,1997;陈汉林等,1997a;姜常义等,2004;厉子龙等,2008;蒲仁海等,2011; Tian *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2006a, 2007; Yu *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2008, 2010; Zhou *et al.*, 2009)。现有资料表明,塔里木二叠纪大火成岩省主要由两期岩浆活动组成,早期以柯坪一带的玄武岩露头为代表,晚期则以巴楚-皮羌一带的超基性-基性-长英质层状侵入岩和辉绿岩墙群为代表(Zhang *et al.*, 2008, 2010; Zhou *et al.*, 2009; Yu *et al.*, 2011; Wei *et al.*, 2014)。现有的锆石 U-Pb 年龄和全岩 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄限定了塔里木二叠纪大火成岩省晚期岩浆活动的时代为274~283Ma(杨树锋等,1996; Zhang *et al.*, 2008; 位荀和徐义刚,2011; Li *et al.*, 2011)。早期的玄武岩按照地层限定可以分成下部的库普库兹曼组和上部的开派兹雷克组(以下简称库组和开组),二者被800~1000m的碎屑沉积岩相间(张师本,2003; Yu *et al.*, 2011)。

对于早期玄武岩喷发的起始时间的限定,主要根据音干剖面库组最底部玄武岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄(289.5±2.0Ma, Yu *et al.*, 2011)和塔北覆盖区玄武岩中的流纹岩夹层的锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄(~291Ma; Tian *et al.*, 2010)两种方法得到误差范围内一致的结果。相对而言,早期玄武岩的喷发终止时间没有得到很好的制约,如不同研究者采用锆石 SHRIMP U-Pb 法获得的开组最顶部玄武岩年龄结果差别很大(288±2.0Ma, Yu *et al.*, 2011; 279.0±4.5Ma, 陈咪咪等,2010)。而同样采用⁴⁰Ar/³⁹Ar法得到的音干剖面的开组年龄(281.8±4.2Ma; Yang *et al.*, 2006a)不同于开派兹雷克剖面的开组年龄(278.5±1.4Ma; 陈汉林等,1997b)。总体上,开组的喷发时间至少比库组的晚2Myr,与两者之间具有800~1000m的沉积岩夹层相一致。

塔西南棋盘组玄武岩是塔里木盆地及其周缘仅有的与柯坪二叠纪玄武岩同期的野外露头,许多学者认为塔西南棋盘组玄武岩对应于柯坪地区的库组玄武岩(Yang *et al.*, 2006a; Yu *et al.*, 2011; 厉子龙等,2008; 陈咪咪等,2010),有关其形成时代和地球化学特征的研究对全面认识塔里木二叠纪大火成岩省时空演化过程具有重要意义。对塔西南棋盘组玄武岩的形成时代,目前已有少量的年代学研究结果,如 Yang *et al.* (2006a) 根据⁴⁰Ar/³⁹Ar法获得的塔西南达木斯棋盘组玄武岩年龄为290.1±3.5Ma,厉子龙等(2008)根据K-Ar法获得同一剖面棋盘组玄武岩的K-Ar年龄为289.6±5.6Ma;但是,这些⁴⁰Ar/³⁹Ar或K-Ar年龄的误差很大,并且达木斯棋盘组玄武岩的⁴⁰Ar/³⁹Ar表观年龄随着温度的升高而逐步降低(Yang *et al.*, 2006a)因没有形成很好的

坪而被质疑(Wei *et al.*, 2014)。另外,目前有关塔西南玄武岩的地球化学性质研究也较弱,与柯坪一带玄武岩的研究结果无法对比。本文将对塔西南阿克陶县其木干村附近棋盘组玄武岩进行全岩的主量、微量元素和Sr-Nd-Hf同位素分析,限定其源区性质,通过玄武岩顶、底砂岩的碎屑锆石 U-Pb 年代学研究来限定玄武岩的喷发时代,并结合现有资料为塔里木大火成岩省的时空演化提供有用信息。

2 区域地质背景和样品特征

塔里木盆地被周缘环形的山链所包围,北缘为天山弧形山链,南缘为昆仑山-阿尔金山弧形山链(图1)。塔里木盆地南缘经历了古生代-早中生代复杂的俯冲/拼贴过程。古特提斯洋在早古生代开始北向俯冲,塔里木盆地南缘处于弧后盆地环境,至泥盆纪弧后盆地消亡,昆仑山造山带南、北两侧实现拼合;石炭纪-三叠纪期间,古特提斯洋持续向北俯冲,南昆仑山造山带形成了规模宏大的火山弧,北昆仑造山带处于弧后裂隙环境,晚三叠世-早侏罗世,西昆仑造山带与羌塘地块实现对接,古特提斯洋最终消亡(Wang, 2004)。因此,早古生代以来塔里木盆地西南部以碳酸盐台地相沉积为主,早石炭纪经历了最大海侵,晚二叠世开始海水退出塔西南地区,整个地区上升为古陆,沉积相转变为碎屑岩台地相(庄锡进等,2002)。

本文研究的二叠纪玄武岩产于塔里木盆地西南缘残留的二叠系下统棋盘组地层之中,剖面位于阿克陶县其木干村西南10km。棋盘组下伏石炭系上统塔哈奇组,主要组成为灰色-灰黑色生物碎屑岩、白云质灰岩、泥晶灰岩夹少量灰褐色砂岩、粉砂岩(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1989^①)。在岩性上可以与柯坪地区康克林组对比(张师本,2003)。棋盘组下部发育灰色生物碎屑灰岩夹粉砂岩、泥质砂岩,上部发育灰绿色砂岩、粉砂岩夹灰岩及两层玄武岩。棋盘组被达里约尔组覆盖,后者主要由杂色细粒岩屑砂岩、钙质粉砂岩不均匀互层,夹少量薄层泥灰岩(新疆维吾尔自治区地质矿产局,1989)。

其木干棋盘组玄武岩的地表露头遭受较强的风化作用,所有样品均经受一定程度的蚀变作用,部分矿物发生了绿泥石化、蛇纹石化、皂石化、泥化或碳酸盐化等,其中橄榄石小晶体(<0.1mm)均已蚀变,辉石和斜长石晶体为部分蚀变。整个剖面的岩石结构变化较大,部分样品为相对粗粒的辉绿结构,部分样品为间粒结构、填间结构或间隐结构;少数样品还呈现斑状结构,斑晶主要为斜长石和少量辉石,基质均为填间结构。本文选取了玄武岩下伏细砂岩(QMG1106)和上部达里约尔组底部细砂岩(QMG1112),期望通过砂岩中最年轻的一组碎屑锆石的U-Pb年龄来制约玄武岩的喷发时代。

① 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1989. 克孜勒幅地质图(比例尺1:200000)

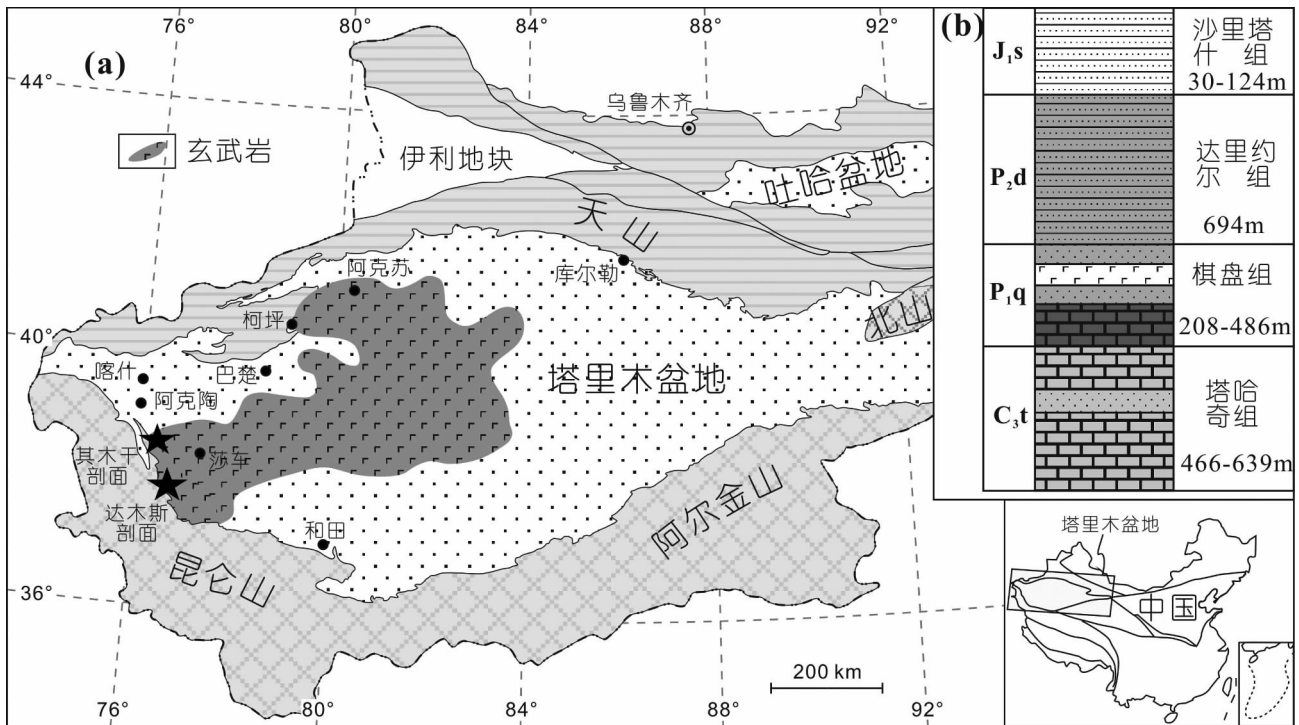


图1 塔里木盆地地质简图及早二叠世玄武岩的分布范围(a 据 Yang *et al.*, 2007) 和其木干剖面晚古生代-中生代地层柱状图(b)

图(a)中黑色星号为塔西南二叠纪玄武岩剖面位置,灰色区域为早二叠世玄武岩的分布范围

Fig. 1 Simplified geological map of the Tarim basin and the distribution of the Early Permian basalt (a, modified after Yang *et al.*, 2007) and the Late Paleozoic to Early Mesozoic strata of the Qimugan section (b)

In figure (a), red stars are the locations outcropping Early Permian basalts in the southwestern Tarim basin, the gray region distributes the field of Early Permian basalts

3 分析方法

全岩主量、微量元素、Sr-Nd-Hf 同位素和碎屑锆石的 U-Pb 年龄均在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。主量元素在 Rigaku ZSX100e 仪器上完成,大多数主量元素的分析精度在 1%~5%,详细的分析方法见 Li *et al.* (2006)。微量元素在 PE Elan6000 ICP-MS 上完成,分析精度通常优于 5%,详细的分析方法见 Li *et al.* (1997)。Sr-Nd-Hf 同位素分析在 Neptune MC-ICP-MS 仪器上进行,详细的分析方法见韦刚健等 (2002) 和梁细荣等 (2003)。测得的 $^{143}\text{Nd}/^{147}\text{Nd}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$, $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 和 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.7325$ 标准化。测试过程中, Sr 同位素标样 NIST SRM987 得到 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710251 \pm 11$, Nd 同位素标样 Shin Etsu JNdi-1 得到 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512108 \pm 6$, Hf 同位素标样 JMC475 得到 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.2821543 \pm 10$, 分别接近于其参考值 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.71026$ (Woodhead and Herget, 2001), $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512115$ (Tanaka *et al.*, 2000) 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.282151$ (Woodhead and Herget, 2005)。

碎屑锆石 U-Pb 年龄在配有 193nm 激光的 Agilent 7500a ICP-MS 仪器上进行,样品测试过程采用激光能量为 80mJ,束斑直径为 31 μm ,频率为 10Hz,剥蚀时间为 40s。锆石 TEM (年龄 417Ma) 作为标样来标定仪器,以硅酸盐玻璃 NIST610 为标准计算 U、Th、Pb 含量,普通铅校正采用 Andersen *et al.* (2002) 的方法。数据在 Glitter (ver. 4.0) 软件上处理,年龄计算和图谱制作运用 Isoplot 处理,详细的分析技术参照 Yuan *et al.* (2004)。对于小于 1000Ma 的锆石,因为 ^{207}Pb 含量低和普通 Pb 校正具有不确定性,所以 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄误差较大,本文采用更为可靠的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄,对于较老的锆石, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄更能代表锆石的结晶年龄,所以对于大于 1000Ma 的锆石,本文采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄 (Li and Huang, 2013)。

4 分析结果

4.1 碎屑锆石 U-Pb 年代学

其木干棋盘组玄武岩顶、底砂岩碎屑锆石 U-Pb 年代学结果见表 1 和图 2。用于分析的锆石普遍具有较高的 Th/U 比值(0.1~2.4),多数锆石的阴极发光图像具有岩浆振荡环

表1 塔西南其木干玄武岩顶、底部砂岩碎屑锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄分析结果

Table 1 Detrital zircon LA-ICPMS U-Pb dating results of the sandstones underlying and overlying the Qimugan basalts, SW Tarim

Spots	Element ($\times 10^{-6}$)		Th/U	Isotopic ratios						Apparent age (Ma)					
	U	Th		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	
				1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
玄武岩底部样品 QMG1106															
QMG1106-01	367	281	0.8	0.05749	0.00203	0.5977	0.0202	0.0731	0.0011	510	47	476	13	455	7
QMG1106-02	186	122	0.7	0.05415	0.00510	0.5060	0.0464	0.0678	0.0014	377	216	416	31	423	9
QMG1106-03	189	125	0.7	0.05723	0.00307	0.5855	0.0300	0.0720	0.0014	500	77	468	19	448	9
QMG1106-04	685	431	0.6	0.15604	0.00296	7.8548	0.1161	0.3651	0.0043	2413	33	2215	13	2006	21
QMG1106-05	279	302	1.1	0.05690	0.00222	0.5953	0.0222	0.0736	0.0012	488	54	474	14	458	7
QMG1106-06	478	518	1.1	0.05875	0.00190	0.5417	0.0167	0.0649	0.0010	558	42	440	11	405	6
QMG1106-07	821	386	0.5	0.05838	0.00159	0.5369	0.0140	0.0647	0.0009	544	34	436	9	404	5
QMG1106-08	577	455	0.8	0.14257	0.00388	7.1811	0.1693	0.3653	0.0050	2259	48	2134	21	2007	23
QMG1106-09	261	155	0.6	0.05447	0.00244	0.5763	0.0247	0.0744	0.0013	391	65	462	16	463	8
QMG1106-10	287	165	0.6	0.05968	0.00335	0.3871	0.0207	0.0456	0.0010	592	80	332	15	288	6
QMG1106-11	197	70	0.4	0.06526	0.00242	1.2691	0.0449	0.1367	0.0023	783	47	832	20	826	13
QMG1106-12	43	70	1.6	0.12569	0.00419	6.1141	0.1907	0.3421	0.0067	2039	29	1992	27	1897	32
QMG1106-13	192	135	0.7	0.05676	0.00333	0.5222	0.0293	0.0647	0.0014	482	86	427	20	404	8
QMG1106-14	739	274	0.4	0.05441	0.00183	0.4654	0.0150	0.0602	0.0009	388	46	388	10	377	5
QMG1106-15	447	193	0.4	0.06998	0.00275	1.2699	0.0473	0.1276	0.0022	928	48	832	21	774	13
QMG1106-16	303	152	0.5	0.07136	0.00294	1.7254	0.0676	0.1700	0.0031	968	50	1018	25	1012	17
QMG1106-17	218	160	0.7	0.05233	0.00285	0.4563	0.0239	0.0613	0.0012	300	84	382	17	384	7
QMG1106-18	89	66	0.7	0.13534	0.00363	6.4008	0.1599	0.3326	0.0057	2168	22	2032	22	1851	28
QMG1106-19	727	88	0.1	0.09979	0.00159	2.6664	0.0400	0.1879	0.0023	1620	13	1319	11	1110	12
QMG1106-20	133	99	0.7	0.13061	0.00325	7.3035	0.1710	0.3932	0.0064	2106	20	2149	21	2138	30
QMG1106-21	198	104	0.5	0.05210	0.00380	0.3338	0.0233	0.0451	0.0011	290	116	292	18	284	7
QMG1106-22	345	144	0.4	0.12851	0.00209	7.1321	0.1096	0.3902	0.0051	2078	12	2128	14	2124	23
QMG1106-23	911	468	0.5	0.05792	0.00172	0.5152	0.0146	0.0625	0.0009	527	38	422	10	391	5
QMG1106-24	68	44	0.6	0.06361	0.00426	1.1574	0.0740	0.1279	0.0032	729	93	781	35	776	18
QMG1106-25	118	285	2.4	0.06664	0.00347	1.1569	0.0572	0.1221	0.0025	827	68	781	27	742	15
QMG1106-26	388	281	0.7	0.05789	0.00392	0.5857	0.0384	0.0734	0.0013	526	153	468	25	456	8
QMG1106-27	305	65	0.2	0.06410	0.00311	1.1602	0.0536	0.1273	0.0025	745	64	782	25	772	14
QMG1106-28	264	168	0.6	0.05578	0.00237	0.5487	0.0223	0.0692	0.0012	444	61	444	15	431	7
QMG1106-29	131	63	0.5	0.05088	0.00521	0.3263	0.0322	0.0451	0.0014	235	166	287	25	284	8
QMG1106-30	345	27	0.1	0.11622	0.00253	5.1799	0.0910	0.3233	0.0042	1899	40	1849	15	1806	20
QMG1106-31	315	163	0.5	0.05393	0.00313	0.3458	0.0192	0.0451	0.0009	368	89	302	14	284	6
QMG1106-32	471	308	0.7	0.05713	0.00187	0.5553	0.0174	0.0684	0.0010	497	43	448	11	426	6
QMG1106-33	39	35	0.9	0.04958	0.00886	0.3192	0.0554	0.0453	0.0020	175	278	281	43	285	13
QMG1106-34	473	368	0.8	0.05751	0.00246	0.5607	0.0229	0.0686	0.0012	511	60	452	15	427	7
QMG1106-35	98	114	1.2	0.06097	0.00683	0.3667	0.0392	0.0423	0.0015	638	169	317	29	267	9
QMG1106-36	942	916	1.0	0.06402	0.00214	0.4927	0.0156	0.0541	0.0008	742	42	407	11	340	5
QMG1106-37	293	169	0.6	0.05470	0.00380	0.5099	0.0343	0.0676	0.0012	400	160	418	23	422	7
QMG1106-38	440	222	0.5	0.05762	0.00311	0.5477	0.0284	0.0689	0.0011	515	122	443	19	430	6
QMG1106-39	128	71	0.6	0.05697	0.00365	0.5380	0.0330	0.0664	0.0015	490	96	437	22	414	9
QMG1106-40	71	62	0.9	0.12111	0.00491	6.2321	0.2370	0.3618	0.0082	1973	37	2009	33	1991	39
QMG1106-41	561	459	0.8	0.06712	0.00388	0.5787	0.0321	0.0625	0.0010	842	124	464	21	391	6
QMG1106-42	184	74	0.4	0.11788	0.00387	5.8839	0.1814	0.3510	0.0067	1924	29	1959	27	1939	32
QMG1106-43	170	121	0.7	0.04874	0.00557	0.3918	0.0437	0.0583	0.0015	136	247	336	32	365	9
QMG1106-44	466	400	0.9	0.07856	0.00295	1.8731	0.0658	0.1729	0.0023	1161	76	1072	23	1028	12
QMG1106-45	586	538	0.9	0.05313	0.00492	0.3306	0.0299	0.0451	0.0009	335	212	290	23	285	6
QMG1106-46	95	38	0.4	0.07113	0.00387	1.3356	0.0689	0.1320	0.0029	961	70	861	30	799	17
QMG1106-47	45	39	0.9	0.05692	0.00643	0.5307	0.0576	0.0656	0.0023	488	180	432	38	409	14
QMG1106-48	96	54	0.6	0.05545	0.00432	0.5447	0.0407	0.0691	0.0018	430	121	442	27	431	11
QMG1106-49	273	216	0.8	0.06098	0.00257	0.6107	0.0245	0.0704	0.0012	639	57	484	15	439	7
QMG1106-50	629	124	0.2	0.05363	0.00235	0.3430	0.0144	0.0450	0.0008	356	64	299	11	284	5
QMG1106-51	596	470	0.8	0.05954	0.00168	0.5955	0.0160	0.0703	0.0010	587	35	474	10	438	6
QMG1106-52	180	96	0.5	0.05844	0.00502	0.6164	0.0513	0.0765	0.0016	546	194	488	32	475	10

续表 1

Continued Table 1

Spots	Element ($\times 10^{-6}$)		Th/U	Isotopic ratios						Apparent age (Ma)					
	U	Th		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	
				1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
QMG1106-53	62	71	1.1	0.11774	0.00943	3.8314	0.2894	0.2360	0.0063	1922	148	1599	61	1366	33
QMG1106-54	190	105	0.6	0.05944	0.00292	0.6268	0.0293	0.0742	0.0014	583	69	494	18	461	8
QMG1106-55	136	71	0.5	0.11600	0.00435	5.4035	0.1822	0.3379	0.0056	1895	69	1885	29	1876	27
QMG1106-56	509	260	0.5	0.05061	0.00226	0.3239	0.0138	0.0450	0.0008	223	68	285	11	284	5
QMG1106-57	109	145	1.3	0.05947	0.00737	0.7830	0.0952	0.0955	0.0023	584	280	587	54	588	14
QMG1106-58	55	42	0.8	0.15117	0.00568	9.5350	0.3355	0.4436	0.0103	2359	31	2391	32	2367	46
QMG1106-59	236	88	0.4	0.11095	0.00390	4.5598	0.1501	0.2890	0.0055	1815	33	1742	27	1637	28
QMG1106-60	212	142	0.7	0.04605	0.00502	0.2870	0.0305	0.0452	0.0012	220	220	256	24	285	7
QMG1106-61	351	253	0.7	0.07817	0.00169	2.1903	0.0451	0.1971	0.0026	1151	21	1178	14	1160	14
QMG1106-62	98	97	1.0	0.06819	0.00331	1.3800	0.0638	0.1423	0.0029	874	62	880	27	858	16
QMG1106-63	434	60	0.1	0.12084	0.00203	6.1898	0.0986	0.3603	0.0047	1969	13	2003	14	1984	22
QMG1106-64	441	130	0.3	0.06750	0.00273	1.3496	0.0507	0.1450	0.0022	853	86	867	22	873	12
QMG1106-65	637	174	0.3	0.06064	0.00244	0.5436	0.0205	0.0650	0.0009	626	89	441	13	406	6
QMG1106-66	645	402	0.6	0.05658	0.00301	0.5434	0.0278	0.0697	0.0010	475	121	441	18	434	6
QMG1106-67	344	174	0.5	0.05675	0.00220	0.5730	0.0212	0.0710	0.0011	482	53	460	14	442	7
QMG1106-68	200	142	0.7	0.05473	0.00295	0.5046	0.0260	0.0648	0.0013	401	80	415	18	405	8
QMG1106-69	619	260	0.4	0.05441	0.00321	0.3396	0.0193	0.0453	0.0007	388	136	297	15	285	5
QMG1106-70	215	49	0.2	0.08305	0.00289	2.2922	0.0718	0.2002	0.0030	1270	69	1210	22	1176	16
QMG1106-71	439	301	0.7	0.06427	0.00315	1.0976	0.0513	0.1239	0.0018	751	106	752	25	753	10
QMG1106-72	329	229	0.7	0.05049	0.00277	0.3234	0.0170	0.0451	0.0009	218	86	285	13	284	5
QMG1106-73	124	114	0.9	0.06565	0.00437	1.3271	0.0841	0.1422	0.0037	795	90	858	37	857	21
QMG1106-74	183	189	1.0	0.08647	0.00504	2.8909	0.1605	0.2425	0.0043	1349	116	1380	42	1400	22
QMG1106-75	866	351	0.4	0.06211	0.00159	0.6126	0.0150	0.0694	0.0009	678	30	485	9	432	6
QMG1106-76	765	407	0.5	0.05626	0.00248	0.5656	0.0237	0.0729	0.0010	463	100	455	15	454	6
QMG1106-77	312	155	0.5	0.06453	0.00286	0.5248	0.0221	0.0572	0.0010	759	58	428	15	359	6
QMG1106-78	203	110	0.5	0.05699	0.00379	0.3663	0.0233	0.0452	0.0010	491	99	317	17	285	6
QMG1106-79	1561	1981	1.3	0.06930	0.00159	0.3831	0.0083	0.0389	0.0005	908	25	329	6	246	3
QMG1106-80	211	61	0.3	0.16131	0.00356	10.8439	0.2249	0.4727	0.0077	2469	16	2510	19	2496	34
达里约尔组底部样品 QMG1112															
QMG1112-01	65	58	0.9	0.06263	0.00361	0.6111	0.0336	0.0686	0.0015	696	80	484	21	428	9
QMG1112-02	1111	133	0.1	0.05625	0.00574	0.3320	0.0335	0.0428	0.0007	462	232	291	26	270	4
QMG1112-03	260	154	0.6	0.05506	0.00208	0.5128	0.0185	0.0655	0.0011	415	52	420	12	409	6
QMG1112-04	179	99	0.6	0.07545	0.00267	1.9305	0.0629	0.1856	0.0026	1081	73	1092	22	1097	14
QMG1112-05	344	101	0.3	0.05410	0.00156	0.5285	0.0146	0.0687	0.0010	375	37	431	10	428	6
QMG1112-06	333	481	1.4	0.16356	0.00466	10.1867	0.2519	0.4517	0.0064	2493	49	2452	23	2403	28
QMG1112-07	124	73	0.6	0.05504	0.00307	0.5414	0.0289	0.0692	0.0014	414	83	439	19	431	9
QMG1112-08	247	130	0.5	0.05496	0.00200	0.5395	0.0188	0.0691	0.0011	411	50	438	12	430	7
QMG1112-09	193	136	0.7	0.05368	0.00270	0.3871	0.0186	0.0507	0.0010	358	74	332	14	319	6
QMG1112-10	275	333	1.2	0.07058	0.00142	1.3416	0.0258	0.1337	0.0017	945	20	864	11	809	10
QMG1112-11	399	179	0.4	0.05281	0.00270	0.3272	0.0160	0.0449	0.0007	321	119	287	12	283	4
QMG1112-12	521	300	0.6	0.05744	0.00142	0.5702	0.0135	0.0698	0.0009	508	29	458	9	435	6
QMG1112-13	247	111	0.5	0.05981	0.00212	0.5920	0.0200	0.0696	0.0011	597	46	472	13	434	7
QMG1112-14	630	215	0.3	0.05576	0.00237	0.3580	0.0145	0.0452	0.0008	443	59	311	11	285	5
QMG1112-15	337	147	0.4	0.07103	0.00157	1.7214	0.0363	0.1705	0.0023	958	22	1017	14	1015	13
QMG1112-16	982	487	0.5	0.05198	0.00269	0.3105	0.0154	0.0433	0.0006	284	121	275	12	273	4
QMG1112-17	368	453	1.2	0.05673	0.00373	0.5479	0.0350	0.0701	0.0011	481	149	444	23	436	6
QMG1112-18	1007	1081	1.1	0.05818	0.00121	0.6146	0.0122	0.0743	0.0009	537	23	486	8	462	6
QMG1112-19	570	414	0.7	0.05601	0.00127	0.5666	0.0123	0.0711	0.0009	453	26	456	8	443	6
QMG1112-20	196	193	1.0	0.05923	0.00249	0.5846	0.0234	0.0694	0.0012	576	56	467	15	433	7
QMG1112-21	291	162	0.6	0.05432	0.00191	0.5300	0.0179	0.0686	0.0011	384	48	432	12	428	6
QMG1112-22	1278	781	0.6	0.06538	0.00303	0.2650	0.0116	0.0294	0.0004	787	100	239	9	187	3
QMG1112-23	221	115	0.5	0.05556	0.00226	0.5793	0.0226	0.0733	0.0012	435	57	464	15	456	7
QMG1112-24	339	328	1.0	0.19436	0.00450	14.4214	0.2691	0.5382	0.0074	2779	39	2778	18	2776	31
QMG1112-25	353	152	0.4	0.05255	0.00251	0.3772	0.0172	0.0505	0.0009	309	71	325	13	317	6
QMG1112-26	163	157	1.0	0.18083	0.00437	11.5657	0.2293	0.4639	0.0064	2660	41	2570	19	2457	28

续表 1

Continued Table 1

Spots	Element ($\times 10^{-6}$)		Th/U	Isotopic ratios						Apparent age (Ma)					
	U	Th		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	
				1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
QMG1112-27	195	60	0.3	0.05419	0.00231	0.4986	0.0203	0.0647	0.0011	379	61	411	14	404	7
QMG1112-28	100	76	0.8	0.15827	0.00224	10.6237	0.1431	0.4721	0.0062	2437	10	2491	13	2493	27
QMG1112-29	716	145	0.2	0.07923	0.00148	2.0823	0.0309	0.1906	0.0022	1178	38	1143	10	1125	12
QMG1112-30	1088	337	0.3	0.05826	0.00277	0.3388	0.0154	0.0422	0.0006	540	107	296	12	266	4
QMG1112-31	145	111	0.8	0.06731	0.00190	1.3142	0.0354	0.1373	0.0020	847	32	852	16	829	11
QMG1112-32	150	92	0.6	0.05622	0.00250	0.5242	0.0223	0.0656	0.0012	461	63	428	15	409	7
QMG1112-33	104	87	0.8	0.05340	0.00262	0.4954	0.0233	0.0652	0.0012	346	73	409	16	407	7
QMG1112-34	710	694	1.0	0.06350	0.00128	0.6429	0.0123	0.0712	0.0009	725	21	504	8	443	5
QMG1112-35	43	5	0.1	0.05693	0.00594	0.7467	0.0747	0.0922	0.0031	489	162	566	43	569	19
QMG1112-36	196	119	0.6	0.08788	0.00177	3.1294	0.0600	0.2504	0.0034	1380	18	1440	15	1441	17
QMG1112-37	357	232	0.7	0.05757	0.00143	0.5651	0.0135	0.0690	0.0009	513	30	455	9	430	6
QMG1112-38	343	259	0.8	0.05423	0.00212	0.3814	0.0143	0.0495	0.0008	381	55	328	10	311	5
QMG1112-39	144	113	0.8	0.06567	0.00182	1.2984	0.0344	0.1390	0.0020	796	32	845	15	839	11
QMG1112-40	175	91	0.5	0.05477	0.00245	0.5005	0.0214	0.0643	0.0011	403	64	412	14	401	7
QMG1112-41	940	629	0.7	0.05807	0.00340	0.4445	0.0251	0.0555	0.0009	532	132	373	18	348	5
QMG1112-42	237	197	0.8	0.08384	0.00151	2.7098	0.0466	0.2273	0.0029	1289	16	1331	13	1320	15
QMG1112-43	451	262	0.6	0.05592	0.00129	0.5646	0.0125	0.0710	0.0009	449	27	455	8	442	5
QMG1112-44	148	149	1.0	0.05776	0.00219	0.8110	0.0294	0.0987	0.0016	521	51	603	16	607	9
QMG1112-45	329	197	0.6	0.05357	0.00221	0.4541	0.0179	0.0596	0.0010	353	59	380	12	373	6
QMG1112-46	400	91	0.2	0.12772	0.00221	5.9905	0.0766	0.3402	0.0040	2067	31	1974	11	1888	19
QMG1112-47	279	167	0.6	0.11761	0.00270	5.6120	0.1084	0.3461	0.0043	1920	42	1918	17	1916	21
QMG1112-48	270	113	0.4	0.05368	0.00198	0.4709	0.0167	0.0617	0.0010	358	52	392	12	386	6
QMG1112-49	271	214	0.8	0.05674	0.00188	0.5587	0.0177	0.0692	0.0010	481	44	451	12	432	6
QMG1112-50	224	173	0.8	0.06169	0.00222	0.6101	0.0209	0.0695	0.0011	663	46	484	13	433	7
QMG1112-51	360	130	0.4	0.06701	0.00203	1.2781	0.0352	0.1383	0.0017	838	65	836	16	835	10
QMG1112-52	510	221	0.4	0.05829	0.00147	0.5821	0.0140	0.0702	0.0009	541	30	466	9	437	6
QMG1112-53	454	235	0.5	0.05576	0.00138	0.5140	0.0122	0.0648	0.0009	443	30	421	8	405	5
QMG1112-54	139	81	0.6	0.05627	0.00448	0.4968	0.0383	0.0640	0.0013	463	182	410	26	400	8
QMG1112-55	182	85	0.5	0.11214	0.00185	5.3173	0.0833	0.3334	0.0043	1834	13	1872	13	1855	21
QMG1112-56	347	155	0.4	0.06618	0.00134	1.2757	0.0246	0.1355	0.0017	812	21	835	11	819	10
QMG1112-57	384	108	0.3	0.05329	0.00221	0.3432	0.0136	0.0453	0.0008	341	60	300	10	285	5
QMG1112-58	477	232	0.5	0.06177	0.00174	0.6133	0.0165	0.0698	0.0010	666	34	486	10	435	6
QMG1112-59	263	149	0.6	0.05603	0.00345	0.5252	0.0312	0.0680	0.0011	454	141	429	21	424	7
QMG1112-60	276	150	0.5	0.05105	0.00220	0.3742	0.0155	0.0515	0.0009	243	64	323	11	324	5
QMG1112-61	432	389	0.9	0.06676	0.00167	0.6544	0.0155	0.0689	0.0009	830	28	511	10	430	6
QMG1112-62	151	94	0.6	0.07705	0.00201	2.1713	0.0537	0.1981	0.0029	1122	27	1172	17	1165	15
QMG1112-63	327	144	0.4	0.06568	0.00341	1.0467	0.0518	0.1156	0.0018	796	112	727	26	705	11
QMG1112-64	56	42	0.8	0.06480	0.00304	1.2481	0.0558	0.1354	0.0027	768	61	823	25	819	15
QMG1112-65	659	257	0.4	0.05527	0.00119	0.5441	0.0112	0.0692	0.0009	423	25	441	7	431	5
QMG1112-66	1018	601	0.6	0.06361	0.00136	0.6258	0.0128	0.0692	0.0009	729	23	493	8	431	5
QMG1112-67	147	63	0.4	0.05952	0.00537	0.3692	0.0322	0.0450	0.0011	586	203	319	24	284	6
QMG1112-68	175	118	0.7	0.09472	0.00312	3.5624	0.1065	0.2728	0.0037	1522	63	1541	24	1555	19
QMG1112-69	203	85	0.4	0.09135	0.00321	2.9217	0.0939	0.2320	0.0033	1454	69	1388	24	1345	17
QMG1112-70	552	723	1.3	0.07892	0.00309	0.4951	0.0182	0.0441	0.0008	1170	45	408	12	278	5
QMG1112-71	179	54	0.3	0.11402	0.00170	5.5255	0.0783	0.3407	0.0043	1864	11	1905	12	1890	20
QMG1112-72	266	177	0.7	0.07530	0.00138	2.0525	0.0359	0.1917	0.0024	1077	17	1133	12	1130	13
QMG1112-73	58	78	1.3	0.06241	0.00371	1.0903	0.0618	0.1228	0.0028	688	82	749	30	747	16
QMG1112-74	339	142	0.4	0.13594	0.00261	7.5189	0.1131	0.4012	0.0048	2176	34	2175	13	2174	22
QMG1112-75	639	400	0.6	0.05890	0.00190	0.3875	0.0119	0.0463	0.0007	563	42	333	9	292	4
QMG1112-76	270	156	0.6	0.05799	0.00266	0.5716	0.0250	0.0693	0.0013	529	64	459	16	432	8
QMG1112-77	560	360	0.6	0.05281	0.00138	0.5196	0.0130	0.0692	0.0009	321	33	425	9	431	5
QMG1112-78	261	247	0.9	0.07593	0.00190	2.0833	0.0496	0.1929	0.0027	1093	26	1143	16	1137	15
QMG1112-79	477	245	0.5	0.07594	0.00107	2.1072	0.0285	0.1951	0.0023	1093	12	1151	9	1149	12
QMG1112-80	2105	1000	0.5	0.05567	0.00241	0.2423	0.0100	0.0316	0.0004	439	99	220	8	200	3

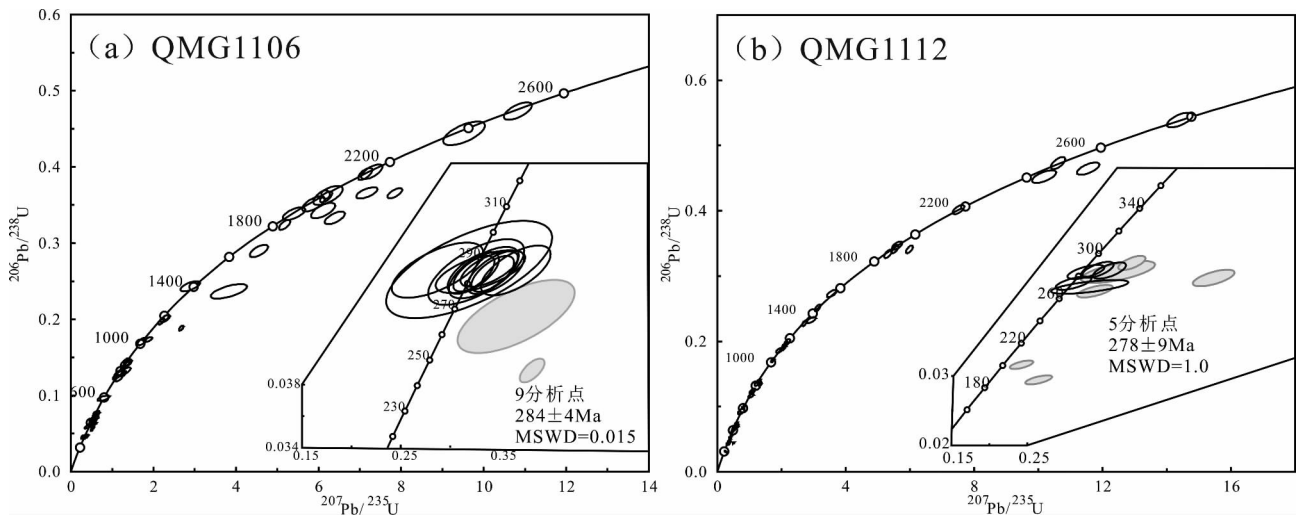


图2 其木干剖面玄武岩顶底砂岩碎屑锆石年龄协和图

(a) 下伏砂岩 QMG1106; (b) 上覆砂岩 QMG1112

Fig. 2 Concordia diagrams for detrital zircon U-Pb geochronology of the sandstones overlying and underlying the Permian basalts of the Qimugan section

(a) -underlying sandstone sample QMG1106; (b) -overlying sandstone sample QMG1112

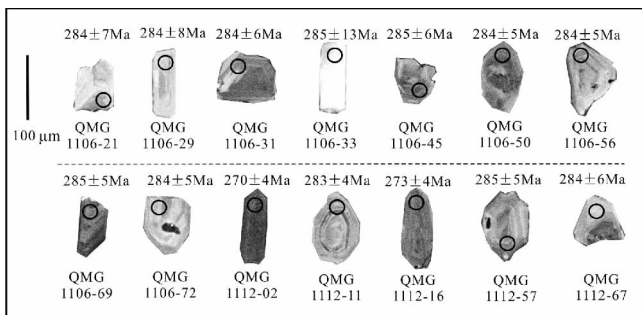


图3 早二叠世锆石阴极发光图像

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of the Early Permian zircons

带或扇形环带(图3),少数较老的锆石发光性较弱,但同样具有岩浆环带,表明用于分析的锆石均为岩浆成因。

底部细砂岩样品(QMG1106)对80颗锆石进行了LA-ICPMS U-Pb年龄分析,除了11颗 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄谐和度小于90%的锆石外,其他69个谐和度大于90%的锆石年龄可以分为6组:284~285Ma(9颗)、365~588Ma(31颗)、742~873Ma(10颗)、968~1349Ma(5颗)、1815~1973Ma(6颗)、2039~2469Ma(8颗)。其中最年轻的一组锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $284 \pm 4\text{Ma}$ (1σ , 9分析点, MSWD = 0.015)。

顶部细砂岩样品(QMG1112)对80颗锆石进行了LA-ICPMS U-Pb年龄分析,有12颗锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄谐和度小于90%,其他68个谐和度大于90%的锆石年龄可分为6组:270~285Ma(5颗)、311~462Ma(33颗)、569~839Ma(10颗)、1015~1522Ma(11颗)、1834~1920Ma

(3颗)、2067~2779Ma(6颗)。其中最年轻的一组锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $278 \pm 9\text{Ma}$ (1σ , 5分析点, MSWD = 1.0)。

4.2 主量和微量元素

其木干二叠纪玄武岩样品的主量和微量元素分析结果见表2。其木干玄武岩样品的 SiO_2 (41.82%~57.07%)、 MgO (1.37%~5.60%)和 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ (8.21%~19.01%)含量变化较大,相对应的 $\text{Mg}^{\#}$ 为23.3~43.9。所有的样品都具有较高的 TiO_2 (2.78%~4.75%)、较低的Cr(25×10^{-6} ~ 54×10^{-6})和Ni(16×10^{-6} ~ 36×10^{-6})。总体上, TiO_2 、 Al_2O_3 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 、Cr和Ni均与 MgO 成正相关关系,而 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 与 MgO 负相关关系(图4)。

稀土元素球粒陨石标准化模式图上(图5a),所有样品具有相似的轻、重稀土配分模式(La/Yb)_N = 7.0~8.6,并具有弱的Eu负异常($\text{Eu}/\text{Eu}^{\circ}$ = 0.82~0.99)。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上(图5b),所有的样品都相对富集Th、U、LREE而显示弱的Nb-Ta负异常。总体上,样品具有与原始地幔相近的(Hf/Sm)_p值(1.0~1.2)和明显较高的(Nd/Zr)_p值(1.3~1.5)(表2)。

另外,所研究样品的 K_2O (0.06%~2.72%)含量较低,且与烧失量(1.99%~7.92%)成负相关关系,说明玄武岩经受了后期的风化蚀变作用影响;在微量元素蛛网图上,Sr的负异常程度变化较大,Rb和Ba含量变化也很大(图5b),均可能与风化蚀变作用影响有关。除Rb和Ba之外的其他微量元素与Nb均具有较好的相关性(如图6),暗示这些元素的相对丰度主要受控于熔融过程或结晶分异过程。根据

表2 其木干玄武岩主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 2 Major (wt%) and trace ($\times 10^{-6}$) elements analysis results of the Qimugan basalts

样品号	QMG 1102a	QMG 1102b	QMG 1103a	QMG 1104a	QMG 1104b	QMG 1104c	QMG 1105a	QMG 1105b	QMG 1105c	QMG 1108a	QMG 1108b	QMG 1109a	QMG 1109b	QMG 1110a	QMG 1110b	QMG 1111b
SiO ₂	48.07	48.09	42.98	41.82	45.65	52.08	44.53	45.92	44.47	47.82	47.69	45.72		50.29	57.07	45.10
TiO ₂	4.46	4.42	4.75	4.60	3.23	2.78	4.21	4.15	4.21	4.49	3.18	4.18		4.30	3.44	4.21
Al ₂ O ₃	13.29	13.29	14.69	14.53	10.87	9.82	13.62	13.27	13.68	13.87	12.30	12.75		13.58	11.73	13.39
Fe ₂ O ₃ ^T	14.98	15.18	18.27	19.01	15.54	9.99	16.56	16.36	16.50	16.61	8.21	16.84		10.84	9.00	15.31
MnO	0.10	0.10	0.17	0.13	0.14	0.12	0.17	0.20	0.18	0.36	0.14	0.21		0.11	0.13	0.22
MgO	4.25	4.28	4.08	5.60	2.02	1.37	4.03	4.00	4.03	3.77	2.50	4.70		3.64	2.53	4.19
CaO	4.63	4.55	4.34	4.32	9.95	11.23	8.93	6.67	8.85	4.36	11.59	6.42		7.40	5.93	8.57
Na ₂ O	3.34	3.33	3.70	3.85	4.14	3.92	2.58	3.00	2.51	2.47	4.39	3.38		3.36	4.54	2.45
K ₂ O	1.49	1.43	1.27	0.06	0.81	0.12	1.86	2.72	1.93	1.77	1.05	1.75		2.23	0.26	2.34
P ₂ O ₅	0.98	1.00	1.01	1.03	0.78	0.69	0.95	0.92	0.95	0.98	0.77	0.91		1.04	0.81	1.01
L. O. I	3.84	3.78	4.21	4.53	6.51	7.61	1.99	2.20	2.10	2.92	7.92	2.56		2.59	3.99	2.61
Total	99.44	99.45	99.47	99.48	99.65	99.74	99.42	99.41	99.42	99.41	99.74	99.42		99.38	99.41	99.41
Sc	28.2	28.2	31.2	30.4	21.6	18.6	29.2	29.5	28.2	28.7	21.0	29.1	25.5	29.7	21.1	28.5
V	291	289	341	313	212	184	294	299	296	300	231	297	277	300	206	295
Cr	35.5	32.4	43.3	44.8	27.6	25.0	41.2	43.9	46.6	41.1	25.7	53.9	43.7	42.6	32.7	43.0
Mn	825	841	1454	1052	1124	975	1479	1722	1468	2940	1134	1747	1540	922	1075	1916
Co	47.0	51.3	46.2	48.9	31.8	18.7	46.5	43.6	42.8	44.9	28.8	45.2	58.9	26.8	47.5	39.3
Ni	27.0	26.0	31.9	31.7	24.3	16.2	29.8	29.2	32.1	28.1	24.5	33.6	36.0	24.8	32.2	26.9
Cu	39.6	39.2	47.5	38.6	48.5	18.1	39.1	41.7	41.4	40.1	38.4	41.6	38.9	43.4	37.4	40.6
Zn	106	110	211	250	118	81	191	171	171	194	71	169	172	157	65.2	174
Ga	21.5	21.6	26.0	30.2	13.0	10.8	25.5	22.6	24.4	23.9	16.2	20.8	24.1	21.2	15.0	23.0
Ge	2.15	2.12	1.52	2.72	1.62	2.30	1.88	1.66	1.89	1.50	2.19	1.48	1.64	1.97	1.69	1.95
Rb	25.5	24.2	18.8	0.9	8.9	3.0	42.8	61.6	39.8	33.2	12.2	35.4	40.1	34.8	2.9	37.9
Sr	196	198	325	49	232	307	464	621	486	328	178	501	483	280	166	306
Y	37.7	38.5	42.0	41.3	31.9	25.6	38.2	38.4	37.4	38.8	32.4	36.7	36.4	41.4	29.8	39.5
Zr	289	287	315	313	231	201	284	279	282	291	222	269	274	306	220	301
Nb	24.2	24.5	27.5	26.5	19.2	16.7	25.7	24.1	24.5	24.8	21.2	23.5	22.7	25.7	20.2	24.9
Cs	0.94	0.88	0.47	0.52	0.17	1.00	1.27	0.68	0.96	0.91	0.25	1.68	2.76	0.46	0.09	1.04
Ba	244	230	444	46	275	3815	598	1050	638	414	139	727	543	563	63	556
La	36.9	37.3	40.3	38.9	32.6	27.9	35.3	35.7	35.4	35.1	28.8	34.0	34.0	41.8	29.5	39.7
Ce	82.5	85.8	90.8	88.5	69.4	62.4	80.4	78.2	78.2	77.0	66.1	76.3	74.9	92.7	65.3	86.8
Pr	10.9	10.9	11.4	11.5	9.3	7.5	10.9	10.4	10.3	10.2	8.7	9.6	10.0	12.0	8.6	11.1
Nd	48.0	49.0	50.6	50.0	40.5	33.1	47.5	46.6	45.1	46.8	38.6	43.2	43.6	52.4	39.0	48.6
Sm	9.8	10.1	10.2	10.2	8.0	6.8	9.6	9.5	9.5	9.7	8.2	8.8	9.2	10.6	7.9	9.9
Eu	3.18	3.17	3.33	3.18	2.56	1.85	2.80	3.02	2.93	2.66	2.56	2.55	2.82	3.35	2.53	3.14
Gd	10.1	10.7	10.3	10.6	8.4	7.0	9.4	9.6	9.7	10.0	8.4	9.3	8.9	11.0	8.0	10.3
Tb	1.44	1.46	1.49	1.48	1.15	0.98	1.41	1.40	1.40	1.43	1.21	1.30	1.38	1.51	1.15	1.42
Dy	8.17	8.18	8.43	8.36	6.62	5.57	7.81	7.67	7.71	8.00	6.93	7.44	7.54	8.71	6.38	7.98
Ho	1.56	1.61	1.64	1.66	1.28	1.06	1.61	1.51	1.50	1.57	1.31	1.44	1.51	1.63	1.26	1.58
Er	4.30	4.20	4.32	4.47	3.44	2.80	3.98	4.14	4.08	4.23	3.39	3.85	3.87	4.41	3.40	4.30
Tm	0.57	0.59	0.61	0.63	0.46	0.39	0.54	0.57	0.56	0.59	0.46	0.54	0.54	0.60	0.47	0.59
Yb	3.57	3.55	3.78	3.76	2.81	2.32	3.43	3.50	3.50	3.58	2.72	3.36	3.34	3.61	2.73	3.60
Lu	0.52	0.53	0.55	0.56	0.43	0.34	0.51	0.51	0.52	0.54	0.41	0.50	0.50	0.53	0.41	0.55
Hf	7.64	7.74	8.27	8.14	6.18	5.35	6.70	7.58	7.26	7.82	6.04	7.03	6.37	7.80	6.10	7.85
Ta	1.64	1.63	1.83	1.80	1.30	1.17	1.53	1.65	1.60	1.73	1.25	1.51	1.43	1.66	1.31	1.66
Pb	5.03	5.30	7.08	34.17	4.98	5.28	4.76	4.83	6.19	7.33	3.95	4.65	6.69	7.91	7.58	5.26
Th	4.62	4.67	4.92	5.66	4.11	3.63	4.00	4.40	4.17	4.61	4.29	3.93	3.97	4.83	4.45	4.75
U	1.28	1.39	1.03	1.12	0.87	0.84	0.89	0.91	0.93	0.96	0.91	0.85	0.87	1.06	1.21	1.04
Eu/Eu*	0.98	0.94	0.99	0.93	0.95	0.82	0.90	0.97	0.93	0.83	0.94	0.86	0.95	0.95	0.97	0.95
(La/Yb) _N	7.4	7.5	7.6	7.4	8.3	8.6	7.4	7.3	7.2	7.0	7.6	7.3	7.3	8.3	7.8	7.9
(Sm/Yb) _N	3.1	3.2	3.0	3.0	3.2	3.2	3.1	3.0	3.0	3.0	3.4	2.9	3.1	3.3	3.2	3.1
(Nd/Zr) _P	1.4	1.4	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.4	1.5	1.3
(Hf/Sm) _P	1.1	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	1.2	1.1	1.2	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1

注: 全铁含量以 Fe₂O₃^T 表示; N 为球粒陨石标准化; P 为原始地幔标准化值

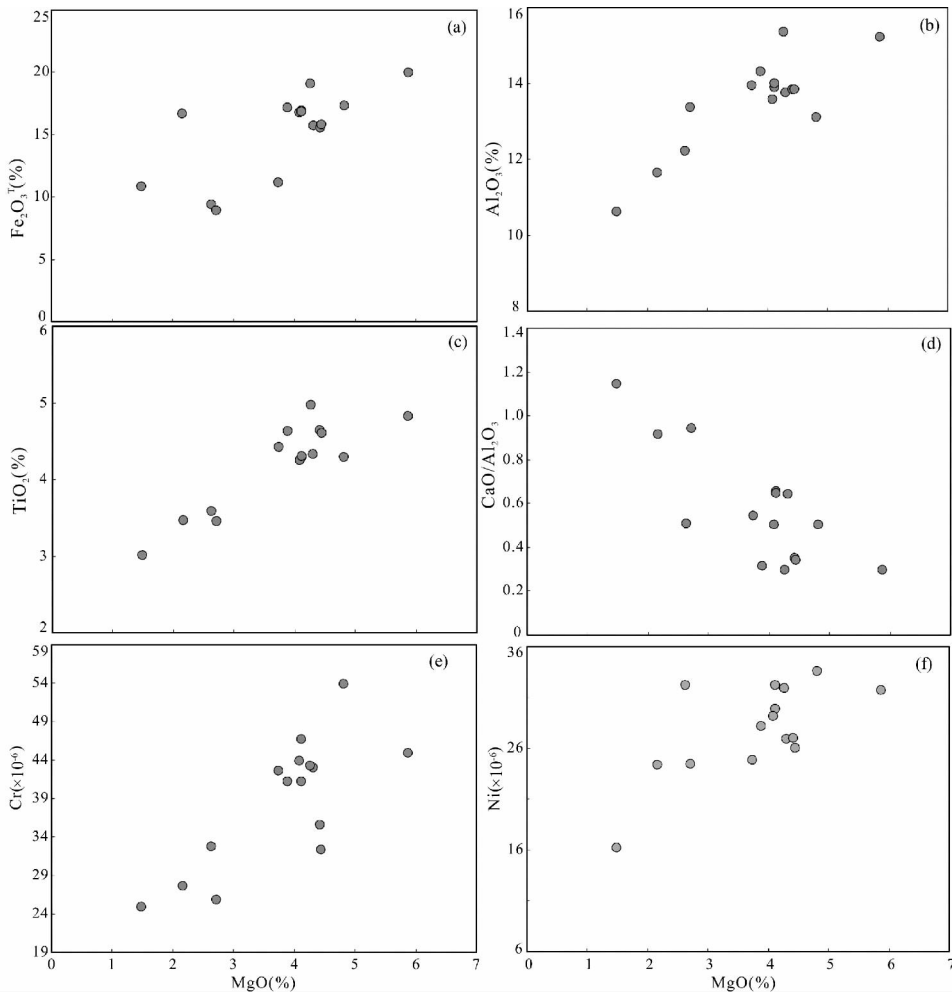


图4 其木干玄武岩 $Fe_2O_3^T$ 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 CaO/Al_2O_3 、Cr、Ni 与 MgO 的协变图

主要元素含量标准化到总量

Fig. 4 Variation diagrams of $Fe_2O_3^T$ vs. MgO (a) , Al_2O_3 vs. MgO (b) , TiO_2 vs. MgO (c) , CaO/Al_2O_3 vs. MgO (d) , Cr vs. MgO (e) and Ni vs. MgO (f) for the Qimugan basalts

The major elements were normalized to total values

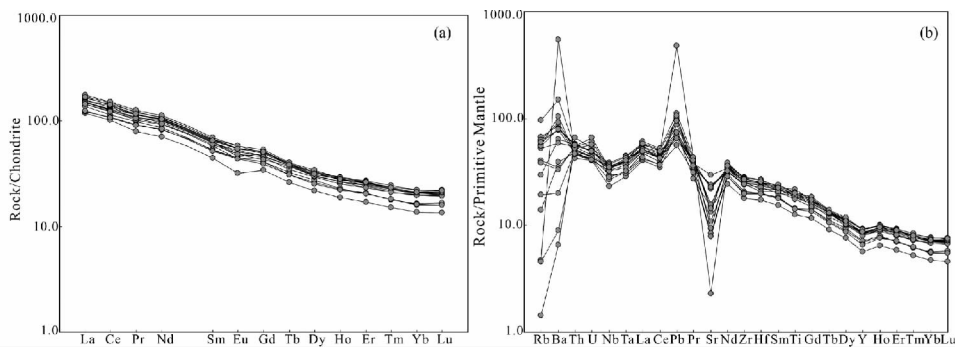


图5 其木干玄武岩的稀土元素配分模式 (a) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图 (b) (球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough , 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized multi-element patterns (b) of the Qimugan basalts (primitive mantle and chondrite values are after Sun and McDonough , 1989)

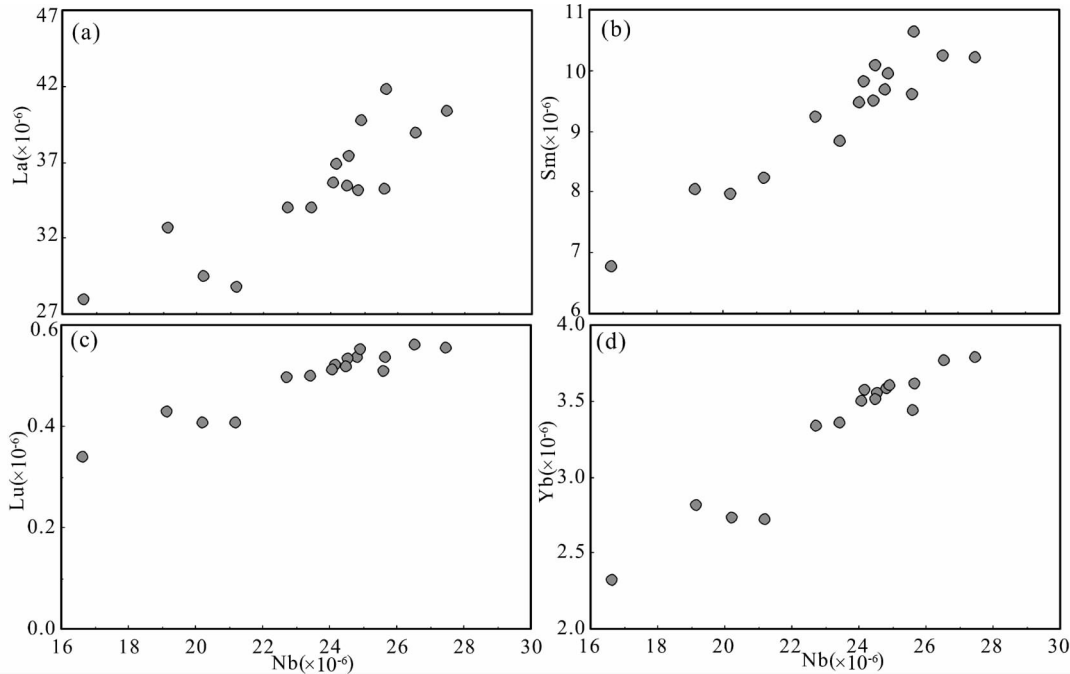


图6 其木干玄武岩 La (a)、Sm (b)、Lu (c) 和 Yb (d) 对 Nb 图解
 Fig. 6 La (a), Sm (b), Lu (c) and Yb (d) vs. Nb diagrams of the Qimugan basalts

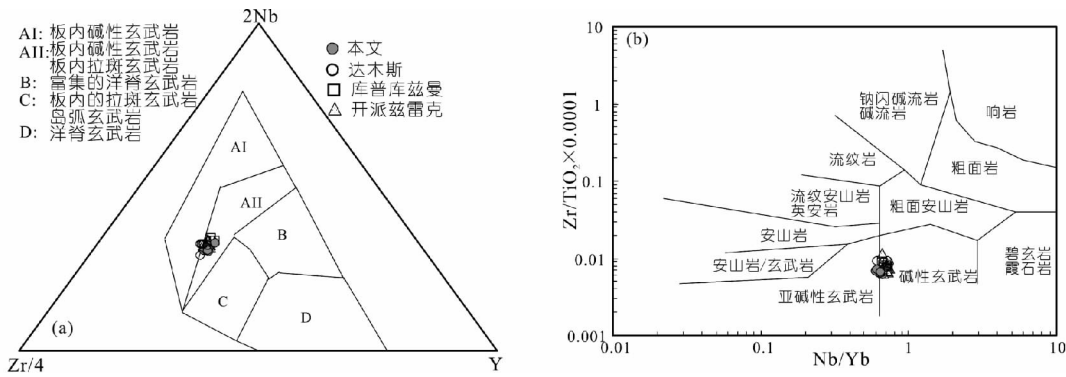


图7 其木干玄武岩 2Nb-Zr/4-Y (a, 据 Meschede, 1986) 和 Zr/TiO₂ × 0.0001-Nb/Yb (b, 据 Winchester and Floyd, 1977) 图解

柯坪玄武岩数据来自于 Yu *et al.* (2011) 和余星 (2009), 达木斯剖面数据来自于 厉子龙等 (2008)

Fig. 7 2Nb-Zr/4-Y (a, after Meschede, 1986) and Zr/TiO₂ × 0.0001-Nb/Yb (b, after Winchester and Floyd, 1977) diagrams of the Qimugan basalts

The Keping basalts are from Yu (2009) and Yu *et al.* (2011); the Damusi basalts are from Li *et al.* (2008)

2Nb-Zr/4-Y (Meschede, 1986) 和 Zr/TiO₂/10000-Nb/Yb 图解 (Winchester and Floyd, 1977), 其木干玄武岩属于板内碱性-亚碱性玄武岩, 与柯坪和达木斯二叠纪玄武岩相似 (图 7)。

4.3 Sr-Nd-Hf 同位素

Sr-Nd-Hf 同位素分析结果见表 3 和图 8。为了方便与塔里木盆地内部的同期玄武岩对比, 同位素初始值按照喷发时代为 290Ma 计算。总体上, 其木干玄武岩显示出相对较高的

(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i (0.7078 ~ 0.7086) 和较低的 ε_{Nd}(t) (-4.8 ~ -3.9) 与 ε_{Hf}(t) 值(-2.4 ~ -1.6), 与柯坪一带的库组和开组玄武岩 (Yu *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2013) 相比较, 其木干玄武岩显示更为富集的特征。

在 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i-ε_{Nd}(t) 相关图上 (图 8a), 其木干玄武岩的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值明显高于典型的 EMI 玄武岩 (Zindler and Hart, 1986); 在 ε_{Nd}(t)-ε_{Hf}(t) 相关图上 (图 8b), 相对于地幔演化线 (Chauvel *et al.*, 2008), 其木干玄武岩具有偏高的 ε_{Hf}(t) 值, 其 ε_{Nd}(t) 与 ε_{Hf}(t) 的趋势线明显偏离地幔演化线,

表3 其木干玄武岩的 Sr-Nd-Hf 同位素组成

Table 3 Sr-Nd-Hf isotopes of the Qimugan basalts

样品号	QMG1102a	QMG1102b	QMG1104a	QMG1105a	QMG1108a	QMG1109a	QMG1110b	QMG1111b
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.3757	0.3550	0.0536	0.2671	0.2927	0.2042	0.0509	0.3587
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.709484	0.709789	0.708860	0.708906	0.709025	0.708782	0.708568	0.709370
2σ	0.000005	0.000006	0.000007	0.000008	0.000005	0.000005	0.000005	0.000006
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.707934	0.708324	0.708638	0.707804	0.707817	0.707939	0.708358	0.707890
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.1237	0.1244	0.1235	0.1223	0.1251	0.1237	0.1233	0.1238
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512261	0.512263	0.512255	0.512282	0.512272	0.512300	0.512253	0.512254
2σ	0.000004	0.000003	0.000004	0.000004	0.000004	0.000005	0.000004	0.000004
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.512027	0.512027	0.512020	0.512050	0.512034	0.512065	0.512019	0.512019
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-4.6	-4.6	-4.8	-4.2	-4.5	-3.9	-4.8	-4.8
$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	0.00944	0.00953	0.00957	0.01055	0.00950	0.00988	0.00927	0.00974
$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	0.282582	0.282584	0.282588	0.282600	0.282596	0.282601	0.282575	0.282583
2σ	0.000003	0.000003	0.000002	0.000003	0.000004	0.000003	0.000003	0.000003
$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	0.282531	0.282532	0.282536	0.282543	0.282544	0.282547	0.282524	0.282530
$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	-2.2	-2.1	-2.0	-1.7	-1.7	-1.6	-2.4	-2.2

注: 样品 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 由全岩微量元素含量计算而得; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算至 $t = 290\text{Ma}$; 原始地幔值采用 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0.0816$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7045$, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0332$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282772$

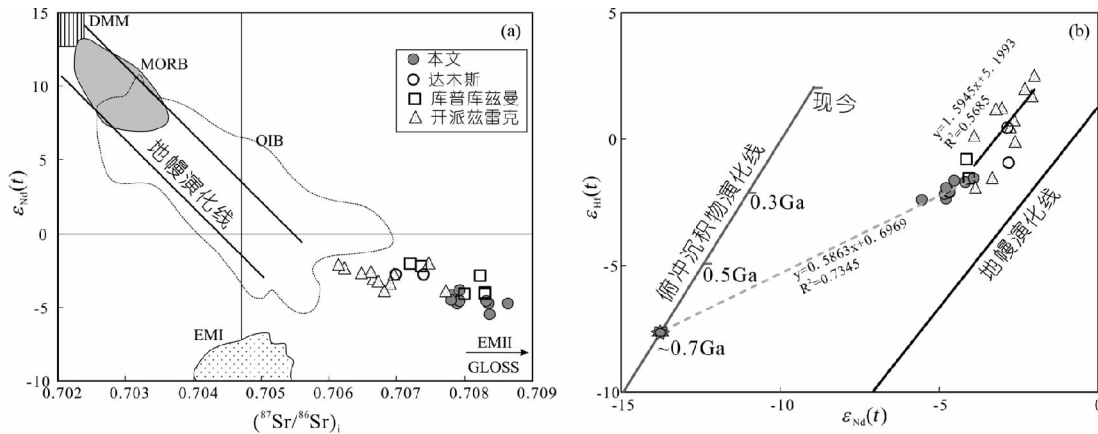


图8 其木干玄武岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (a) 图解和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (b) 图解

柯坪玄武岩数据来自于 Yu *et al.* (2011) 和 Li *et al.* (2012a, b) 达木斯剖面数据来自于 厉子龙等 (2008) 和 Li *et al.* (2012b). 各种地幔褚库的 Sr-Nd 同位素参照 Zindler and Hart (1986), Hf-Nd 地幔-俯冲沉积物演化线参照 Chauvel *et al.* (2008) 计算, 图 (b) 中的虚线为开组和本文样品 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 趋势线

Fig. 8 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (a) and $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ (b) diagrams of the Qimugan basalts

The Keping basalts are from Yu *et al.* (2011) and Li *et al.* (2012a, b) and the Damusi basalts are from Li *et al.* (2008) and Li *et al.* (2012b). The Sr-Nd isotopic composition of the mantle sources are from Zindler and Hart (1986). The Hf-Nd evolution arrays of the mantle and GLOSS are calculated after Chauvel *et al.* (2008). The dotted lines in figure (b) are $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ trend for the basalts from Kaipazileke Formation and this study

与柯坪地区开组玄武岩相比 (Li *et al.*, 2012b) 其木干玄武岩的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 趋势线斜率较小。

5 讨论

5.1 塔西南玄武岩的喷发时限

西昆仑造山带古生代至中生代早期经历了强烈的构造运动 (Wang, 2004) 所以塔西南棋盘组玄武岩的 Ar-Ar 系统

可能已经遭到破坏, 这也可能是达木斯剖面棋盘组玄武岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄不能形成坪的原因 (Yang *et al.*, 2006a; 厉子龙等, 2008)。其木干剖面棋盘组玄武岩还受到了后期的风化蚀变影响, 其 K_2O 含量较低 (0.06% ~ 2.72%) 所以不能采用 K-Ar 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法获得理想的玄武岩形成年龄。

砂岩中最年轻的碎屑锆石 U-Pb 年龄能够有效地限定地层的沉积时代 (Yang *et al.*, 2006b; Dickinson and Gehrels, 2009; Li *et al.*, 2013)。本文对玄武岩之下、最为邻近的粉

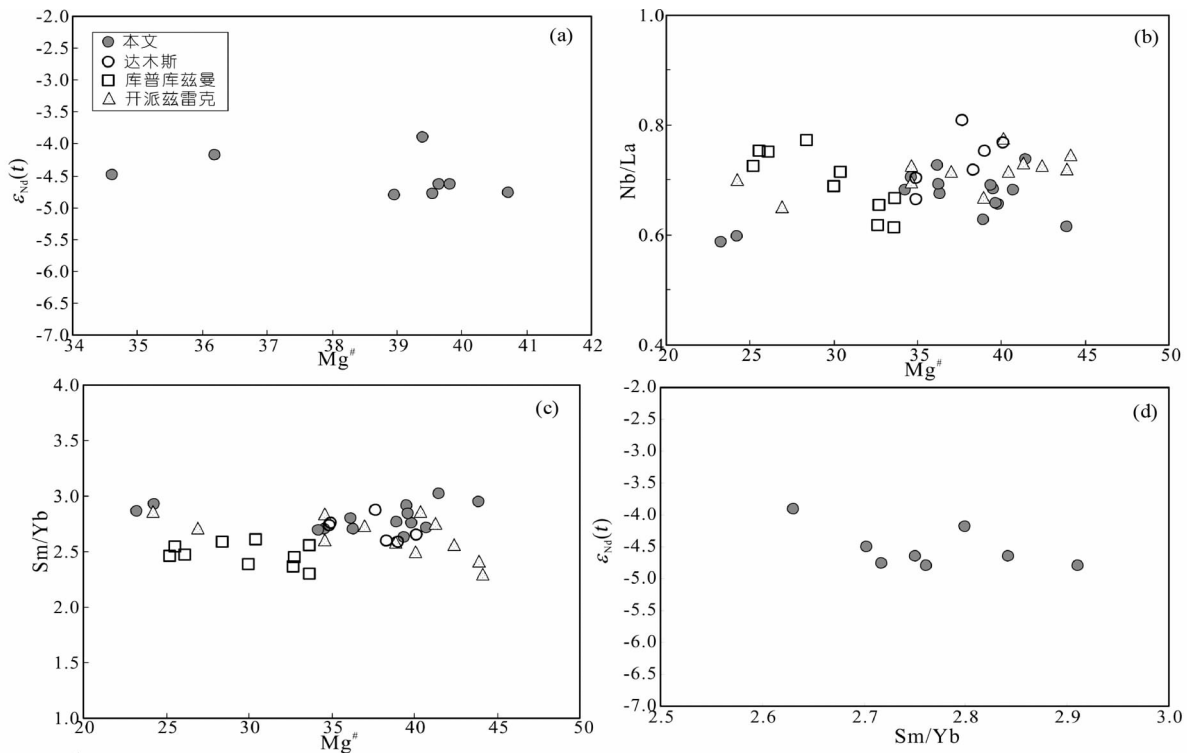


图9 其木干玄武岩 $\epsilon_{Nd}(t)$ (a)、Nb/La (b) 和 Sm/Yb (c) 对 $Mg^\#$ 图解和 $\epsilon_{Nd}(t)$ 对 Sm/Yb 图解 (d)

柯坪玄武岩数据来自于 Yu *et al.* (2011) 和余星(2009), 达木斯剖面数据来自于房子龙等(2008)

Fig. 9 $\epsilon_{Nd}(t)$ (a), Nb/La (b) and Sm/Yb (c) vs. $Mg^\#$ diagrams, and $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. Sm/Yb (d) diagram of the Qimugan basalts. The Keping basalts are from Yu *et al.* (2011) and Yu (2009), and the Damusi basalts are from Li *et al.* (2008)

砂岩 QMG1106 进行碎屑锆石年龄分析, 其中 9 颗最年轻的锆石年龄变化范围较小 (284 ~ 285Ma), 加权平均 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 $284 \pm 4Ma$ (表 1、图 2a)。此外本文还对直接盖于玄武岩之上的达里约尔组最底部的细砂岩 QMG1112 进行了碎屑锆石年龄分析, 其中 5 颗锆石得到最年轻的一组 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄 (270 ~ 285Ma), 其加权平均值为 $278 \pm 9Ma$ (表 1、图 2b)。两个样品中最为年轻的锆石都为自形或是半自形, 具有明显的岩浆振荡环带或是均一的内部结构 (图 3), 表明为岩浆成因。因为达里约尔组与玄武岩之间存在 10m 左右的碎屑沉积岩夹层, 所以样品 QMG1112 中最年轻的一组碎屑锆石年龄应当明显地年轻于玄武岩的喷发时间上限, 而下伏粉砂岩样品 QMG1106 中最年轻的一组碎屑锆石年龄 ($284 \pm 4Ma$) 更接近于玄武岩喷发的起始时限。另外, 样品 QMG1106 中最年轻的一组碎屑锆石的年龄 ($284 \pm 4Ma$) 在误差范围内与柯坪地区的开组玄武岩年龄 (278 ~ 288Ma; 陈汉林等, 1997b; Yang *et al.*, 2006a; Yu *et al.*, 2011; 陈咪咪等, 2010) 一致, 明显地晚于柯坪和塔北的库组玄武岩喷发时间 (~290Ma; Tian *et al.*, 2010; Yu *et al.*, 2011)。

5.2 岩石成因

5.2.1 分离结晶和同化混染

其木干玄武岩样品具有变化范围较大的 SiO_2 、 MgO 、

$Fe_2O_3^T$ 等主量元素含量, 但 La/Yb、Sm/Yb、Lu/Hf、Zr/Nb 等不相容元素比值变化范围很小 (表 2、图 9), 表明其主量元素成分变化不是由部分熔融程度差异造成的, 而主要受控于一系列的结晶分异作用。

样品具有较低的 $Mg^\#$ (23.3 ~ 43.9)、Cr (25×10^{-6} ~ 54×10^{-6}) 和 Ni 含量 (16×10^{-6} ~ 36×10^{-6}), $Fe_2O_3^T$ 和 Ni 均与 MgO 成正相关关系 (图 4a, e), 表明岩石经历了橄榄石的分离结晶, 而 Al_2O_3 和 Cr 均与 MgO (图 4b, f) 成正相关关系, 则表明岩石经历了单斜辉石的分离结晶; TiO_2 与 $Fe_2O_3^T$ 成正相关关系还说明玄武岩还经历钛铁氧化物的分离结晶, Sr 和 Eu ($Eu/Eu^* = 0.82 \sim 0.99$) 负异常特征 (图 5a, b) 显示存在斜长石分离结晶。

其木干玄武岩具有较为稳定的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (-4.8 ~ -3.9) 和 Nb/La 比值 (图 9a, b), 因此不存在明显的地壳混染作用。Sm/Yb 等比值与 $\epsilon_{Nd}(t)$ 、 $Mg^\#$ 之间没有明显的相关性 (图 9c, d), 所以 Sm/Yb 等比值受同化混染和分离结晶作用的影响不大, 因此所研究的玄武岩样品的不相容元素比值和同位素特征可用于制约其地幔源区的性质。

5.2.2 岩石圈地幔富集组来源及其构造意义

其木干玄武岩相对富集 Th、U、LREE, 在微量元素蛛网图上显示弱的 Nb-Ta 负异常 (图 5), 具有较低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ (-4.8 ~ -3.9)、 $\epsilon_{Hf}(t)$ (-2.4 ~ -1.6) 值和较高的

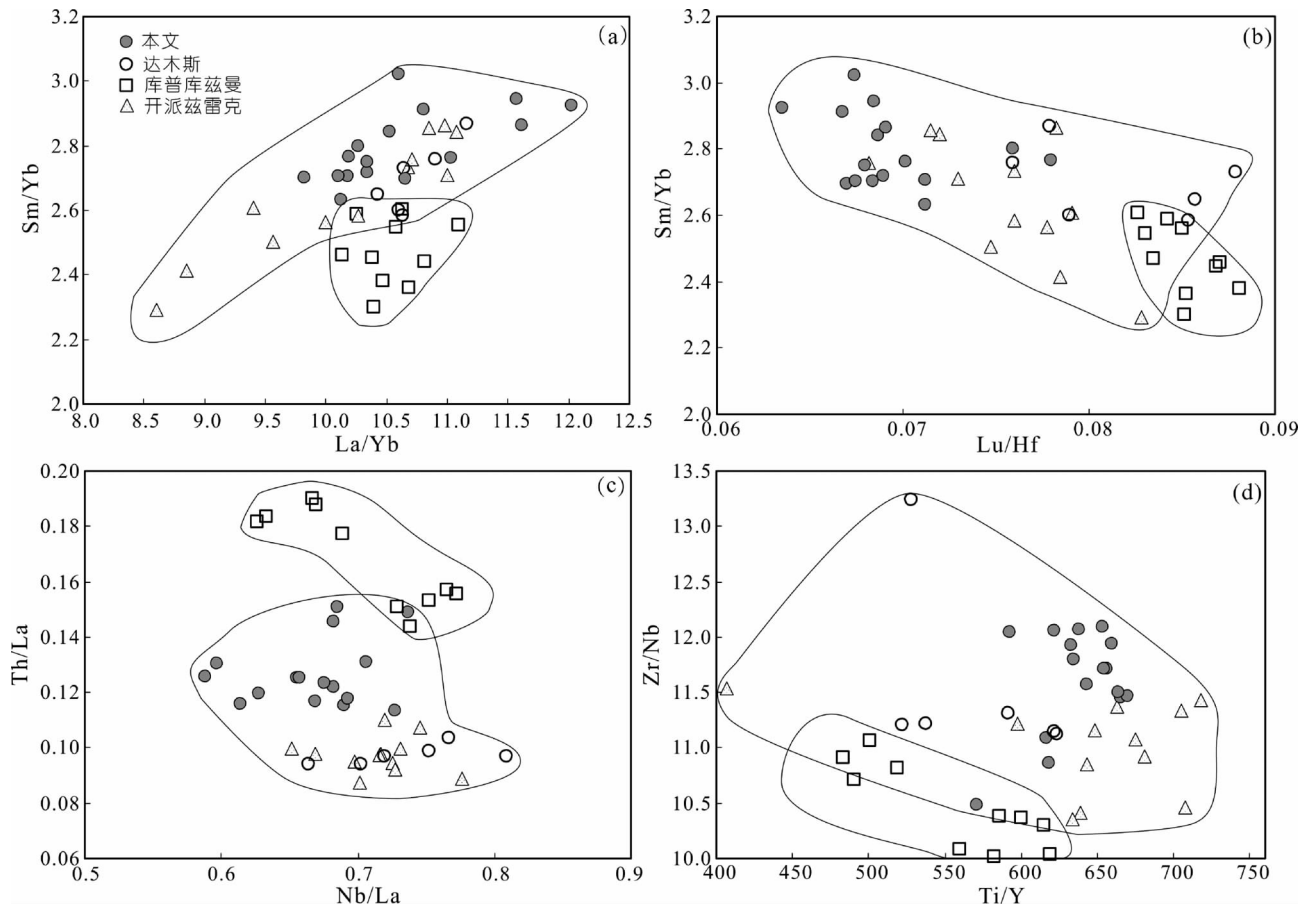


图 10 其木干玄武岩 Sm/Yb-La/Yb (a), Sm/Yb-Lu/Hf (b), Th/La-Nb/La (c) 和 Zr/Nb-Ti/Y (d) 图解

柯坪玄武岩数据来自于 Yu *et al.* (2011) 和余星 (2009), 达木斯剖面数据来自于房子龙等 (2008)

Fig. 10 Sm/Yb-La/Yb (a), Sm/Yb-Lu/Hf (b), Th/La-Nb/La (c) and Zr/Nb-Ti/Y (d) diagrams of the Qimugan basalts

The Keping basalts are from Yu *et al.* (2011) and Yu (2009), and the Damusi basalts are from Li *et al.* (2008)

($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i (0.7078 ~ 0.7086) (图 8) 这些特征与柯坪地区的早二叠世玄武岩 (Yu *et al.*, 2011) 十分相似。其木干玄武岩和柯坪地区的早二叠世玄武岩 (Yu *et al.*, 2011) 均具有板内玄武岩的特征而明显不同于岛弧玄武岩 (图 7), 其富集的 Sr-Nd-Hf 同位素以及弱的 Nb-Ta 负异常特征并非地壳混染作用的结果, 而主要继承自源区, 因此暗示了其可能主要来源于富集的岩石圈地幔 (Turner and Hawkesworth, 1995; Xiao *et al.*, 2004; Wei *et al.*, 2014)。

柯坪地区的开组玄武岩相对于库组玄武岩具有较高的 Sm/Yb、Zr/Nb、Ti/Y 比值和较低的 Lu/Hf、Th/La 比值 (图 10), 反映了开组玄武岩相对于库组玄武岩具有更低的熔融程度。总体上, 塔西南棋盘组玄武岩的上述微量元素比值非常类似于柯坪地区开组玄武岩, 而与库组玄武岩明显不同, 表明其木干玄武岩和形成时代相近的柯坪开组玄武岩的地幔源区可能经历了相似的熔融过程。

低 Nd、高 Sr 的同位素组成特征表明其木干棋盘组玄武岩的地幔源区与 EMII 型地幔源区和远洋沉积物 (GLOSS) 有一定的亲缘性 (Zindler and Hart, 1986; Plank and Langmuir,

1998) (图 8a)。板片俯冲作用可导致岩石圈地幔发生交代富集, 其富集组份可能来源于陆源碎屑沉积物 (Rapp *et al.*, 2008; Wei *et al.*, 2014) 或远洋沉积物 (Plank and Langmuir, 1993; Chauvel *et al.*, 2008)。远洋沉积物在搬运过程中经历了锆石等重矿物的分离, 与陆源沉积物相比将具有较低的 Zr 和 Hf (Plank and Langmuir, 1998)。塔西南棋盘组玄武岩与同时代的柯坪开组玄武岩具有相近于原始地幔值的 Hf/Sm 比值 ($(\text{Hf}/\text{Sm})_p = 1.0 \sim 1.2$), 但是它们的 Nd/Zr 比值 ($(\text{Nd}/\text{Zr})_p = 1.3 \sim 1.5$) (表 2) 明显高于原始地幔值, 表明其源区富集组份与远洋沉积物具有一定的亲缘性。

由于远洋沉积物具有比陆源沉积物更低的 Hf/Lu 比值, 经历一段时间的放射积累, 远洋沉积物将会具有较高的 Hf 同位素比值 (Chauvel *et al.*, 2008), 因此由远洋沉积物交代富集的岩石圈地幔源区将显示出 Hf-Nd 同位素解耦的特征。其木干玄武岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 与 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 趋势线明显地偏离地幔演化线 (图 8b), 与柯坪地区的同期玄武岩 (Li *et al.*, 2012b) 相比, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值及其趋势线斜率更低 (图 8b), 表明其地幔源区存在更多大比例的远洋沉积物来源的富集组份, 可

能与板块周缘遭受了更为强烈的远洋沉积物组分交代有关。

根据其木干玄武岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 与 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 趋势线及俯冲沉积物演化线计算,在岩浆喷发时源区的远洋沉积物组分已经历了 $\sim 0.7\text{Ga}$ 的 Nd-Hf 同位素演化,如果叠加玄武岩的喷发时间 ($\sim 0.3\text{Ga}$) 则塔里木岩石圈地幔中的俯冲沉积物组分年龄为 $\sim 1.0\text{Ga}$ 暗示了其岩石圈地幔的交代富集作用并非形成于古特提斯洋的俯冲过程,而很可能形成于 Rodinia 超大陆聚合期 (Li *et al.*, 2008)。实际上,该时期在塔里木板块周缘出现了强烈的岩浆活动 (Cao *et al.*, 2011; He *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2007), 而从新元古代至石炭纪期间,塔里木板块处于稳定的克拉通演化阶段。至早二叠世期间,地幔柱活动导致了早期富集的岩石圈地幔首先发生部分熔融,形成了塔里木二叠纪大火成岩省 (Zhang *et al.*, 2010; Yu *et al.*, 2011; Wei *et al.*, 2014)。

6 结论

塔西南其木干剖面棋盘组玄武岩的喷发时代在 $\sim 284\text{Ma}$, 与柯坪开组玄武岩喷发时代一致。其木干玄武岩为富集的岩石圈地幔部分熔融产物,并经历了橄榄石、辉石和长石的分离结晶作用,其 Nd-Hf 同位素之间存在解耦,与塔里木盆地岩石圈地幔在 Rodinia 超大陆聚合的板块俯冲过程中受远洋沉积物组分交代富集作用有关。其木干玄武岩相对于柯坪开组玄武岩具有更为富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成,暗示其地幔源区可能经受了更大程度的远洋沉积物组分的富集交代。

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1-2): 59-79
- Cao XF, Lü XB, Liu ST, Zhang P, Gao X, Chen C and Mo YL. 2011. LA-ICP-MS zircon dating, geochemistry, petrogenesis and tectonic implications of the Dapingliang Neoproterozoic granites at Kuluketage block, NW China. *Precambrian Research*, 186(1-4): 205-219
- Chauvel C, Lewin E, Carpentier M, Arndt NT and Marini JC. 2008. Role of recycled oceanic basalt and sediment in generating the Hf-Nd mantle array. *Nature Geoscience*, 1(1): 64-67
- Chen HL, Yang SF, Dong CW, Jia CZ, Wei GQ and Wang ZG. 1997a. Confirmation of permian basite zone in tarim basin and its tectonic significance. *Geochimica*, 26(6): 77-87 (in Chinese with English abstract)
- Chen HL, Yang SF, Dong CW, Zu GQ, Jia CZ, Wei GQ and Wang ZG. 1997b. Geological thermal events in Tarim Basin. *Chinese Science Bulletin*, 42(7): 580-584
- 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 Petrologica Sinica*, 26(2): 559-572 (in Chinese with English abstract)
- Dickinson WR and Gehrels GE. 2009. Use of U-Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: A test against a Colorado Plateau Mesozoic database. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(1-2): 115-125
- He ZY, Zhang ZM, Zong KQ, Wang W and Santosh M. 2012. Neoproterozoic granulites from the northeastern margin of the Tarim Craton: Petrology, zircon U-Pb ages and implications for the Rodinia assembly. *Precambrian Research*, 212-213: 21-33
- Jia CZ. 1997. Tectonic Characteristics and Oil-gas in the Tarim Basin. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese)
- Jiang CY, Zhang PB, Lu DR, Bai KY, Wang YP, Tang SH, Wang JH and Yang C. 2004. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the Kalpin basalts and their Nd, Sr and Pb isotopic compositions. *Geological Review*, 50(5): 492-500 (in Chinese with English abstract)
- Li HY and Huang XL. 2013. Constraints on the paleogeographic evolution of the North China Craton during the Late Triassic-Jurassic. *Journal of Asian Earth Sciences*, 70-71: 308-320
- Li HY, Xu YG, Liu YM, Huang XL and He B. 2013. Detrital zircons reveal no Jurassic plateau in the eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 24(2): 622-634
- Li XH. 1997. Geochemistry of the Longsheng ophiolite from the southern margin of Yangtze Craton, SE China. *Geochemical Journal*, 31(5): 323-337
- Li XH, Li ZX, Wingate MTD, Chung SL, Liu Y, Lin GC and Li WX. 2006. Geochemistry of the 755Ma Mundine Well dyke swarm, northwestern Australia: Part of a Neoproterozoic mantle superplume beneath Rodinia? *Precambrian Research*, 146(1-2): 1-15
- Li YQ, Li ZL, Sun YL, Santosh M, Langmuir CH, Chen HL, Yang SF, Chen ZX and Yu X. 2012a. Platinum-group elements and geochemical characteristics of the Permian continental flood basalts in the Tarim Basin, Northwest China: Implications for the evolution of the Tarim Large Igneous Province. *Chemical Geology*, 328: 278-289
- Li ZL, Yang SF, Chen HL, Langmuir CH, Yu X, Lin XB and Li YQ. 2008. Chronology and geochemistry of Taxdnan basalts from the Tarim basin: Evidence for Permian plume magmatism. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 959-970 (in Chinese with English abstract)
- Li ZL, Chen HL, Song BA, Li YQ, Yang SF and Yu X. 2011. Temporal evolution of the Permian large igneous province in Tarim Basin in northwestern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 917-927
- Li ZL, Li YQ, Chen HL, Santosh M, Yang SF, Xu YG, Langmuir CH, Chen ZX, Yu X and Zou SY. 2012b. Hf isotopic characteristics of the Tarim Permian large igneous province rocks of NW China: Implication for the magmatic source and evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 191-202
- Li ZX, Bogdanova SV, Collins AS, de Waele B, Ernst RE, Fitzsimons ICW, Fuck RA, Gladkochub DP, Jacobs J, Karlstrom KE, Lu S, Natapov LM, Pease V, Pisarevsky SA, Thrane K and Vernikovsky V. 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis. *Precambrian Research*, 160(1-2): 179-210
- Liang XR, Wei GJ, Li XH and Liu Y. 2003. Precise measurement of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd ratios using multiple-collectors inductively coupled plasma-mass spectrometer (MC-ICPMS). *Geochimica*, 32(1): 91-96 (in Chinese with English abstract)
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56(3-4): 207-218
- Plank T and Langmuir CH. 1993. Tracing trace elements from sediment input to volcanic output at subduction zones. *Nature*, 362(6422):

- 739 - 742
- Plank T and Langmuir CH. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology*, 145(3-4): 325 - 394
- Pu RH, Dang XH, Xu J, Guo Q and Yin HJ. 2011. Permian division and correlation and distribution of volcanic rocks of Tarim basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 166 - 180 (in Chinese with English abstract)
- Rapp RP, Irifune T, Shimizu N, Nisshiyama N, Norman MD and Inoue T. 2008. Subduction recycling of continental sediments and the origin of geochemically enriched reservoirs in the deep mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 271(1-4): 14 - 23
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 - 345
- Tanaka T, Togashi S, Kamioka H, Amakawa H, Kagami H, Hamamoto T, Yuhara M, Orihashi Y, Yoneda S, Shimizu H, Kunimaru T, Takahashi K, Yanagi T, Nakano T, Fujimaki H, Shinjo R, Asahara Y, Tanimizu M and Dragusanu C. 2000. JNdi-1: A neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium. *Chemical Geology*, 168(3-4): 279 - 281
- Tian W, Campbell IH, Allen CM, Guan P, Pan WQ, Chen MM, Yu HJ and Zhu WP. 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
- Turner S and Hawkesworth C. 1995. The nature of the sub-continental mantle: Constraints from the major-element composition of continental flood basalts. *Chemical Geology*, 120(3-4): 295 - 314
- Wang ZH. 2004. Tectonic evolution of the western Kunlun orogenic belt, western China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(4): 153 - 161
- Wei GJ, Liang XR, Li XH and Liu Y. 2002. Precise measurement of Sr isotopic composition of liquid and solid base using (LP) MC-ICPMS. *Geochimica*, 31(3): 295 - 299 (in Chinese with English abstract)
- Wei X and Xu YG. 2011. Petrogenesis of Xiaohaizi syenite complex from Bachu area, Tarim. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 2984 - 3004 (in Chinese with English abstract)
- Wei X, Xu YG, Feng YX and Zhao JX. 2014. Plume-lithosphere interaction in the generation of the Tarim large igneous province, NW China: Geochronological and geochemical constraints. *American Journal of Science*, in revision
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325 - 343
- Woodhead JD and Hergt JM. 2001. Strontium, neodymium and lead isotope analyses of NIST glass certified reference materials: SRM 610, 612, 614. *Geostandards Newsletter*, 25(2-3): 261 - 266
- Woodhead JD and Hergt JM. 2005. A preliminary appraisal of seven natural zircon reference materials for in situ Hf isotope determination. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 29(2): 183 - 195
- Xiao L, Xu YG, Mei HJ, Zheng YF, He B and Pirajno F. 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 and Planetary Science Letters*, 228(3-4): 525 - 546
- Yang JH, Wu FY, Shao JA, Wilde SA, Xie LW and Liu XM. 2006b. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3-4): 336 - 352
- Yang SF, Chen HL, Dong CW, Jia CZ and Wang ZG. 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, Li ZL, Chen HL, Chen W and Yu X. 2006a. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of basalts from Tarim Basin, NW China and its implication to a Permian thermal tectonic event. *Journal of Zhejiang University Science A*, 7(Suppl. II): 320 - 324
- Yang SF, Li ZL, Chen HL, Santosh M, Dong CW and Yu X. 2007. Permian bimodal dyke of Tarim Basin, NW China: Geochemical characteristics and tectonic implications. *Gondwana Research*, 12(1-2): 113 - 120
- Yu X. 2009. Magma evolution and deep geological processes of Early Permian Tarim Large Igneous Province. Ph. D. Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese with English summary)
- Yu X, Yang SF, Chen HL, Chen ZQ, Li ZL, Batt GE and Li YQ. 2011. Permian flood basalts from the Tarim Basin, Northwest China: SHRIMP zircon U-Pb dating and geochemical characteristics. *Gondwana Research*, 20(2-3): 485 - 497
- Yuan HL, Gao S, Liu XM, Li HM, Günther D and Wu FY. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353 - 370
- Zhang CL, Li XH, Li ZX, Lu SN, Ye HM and Li HM. 2007. Neoproterozoic ultramafic-mafic-carbonatite complex and granitoids in Qurruqtagh of northeastern Tarim Block, western China: Geochronology, geochemistry and tectonic implications. *Precambrian Research*, 152(3-4): 149 - 169
- 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: 269 - 287
- Zhang CL, Xu YG, Li ZX, Wang HY and Ye HM. 2010. Diverse Permian magmatism in the Tarim Block, NW China: Genetically linked to the Permian Tarim mantle plume? *Lithos*, 119(3-4): 537 - 552
- Zhou MF, Zhao JH, Jiang CY, Gao JF, Wang W and Yang SH. 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(3-4): 583 - 594
- Zhuang XJ, Xiao LX and Yang J. 2002. Sedimentary facies in southwestern region of Tarim basin. *Xinjiang Geology*, 20(S1): 78 - 82 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SB. 2003. A Guide to the Stratigraphic Investigation on the Periphery of the Tarim Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 1 - 280 (in Chinese)
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493 - 571

附中文参考文献

- 陈汉林, 杨树峰, 董传万, 贾承造, 魏国齐, 汪振国. 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(6): 77 - 87
- 陈汉林, 杨树峰, 董传万, 竺国强, 贾承造, 魏国齐, 汪振国. 1997b. 塔里木盆地地质热事件研究. *科学通报*, 42(10): 1096 - 1098

- 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, 张蓬勃, 卢登蓉, 白开寅, 王瑶培, 唐索寒, 王进辉, 杨淳. 2004. 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(5): 492-500
- 厉子龙, 杨树峰, 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
- 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 刘颖. 2003. 利用 MC-ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值. 地球化学, 32(1): 91-96
- 蒲仁海, 党晓红, 许璟, 郭倩, 伊红佳. 2011. 塔里木盆地二叠系划分对比与火山岩分布. 岩石学报, 27(1): 166-180
- 韦刚健, 梁细荣, 李献华, 刘颖. 2002. (LP) MC-ICPMS 方法精确测定液体和固体样品的 Sr 同位素组成. 地球化学, 31(3): 295-299
- 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
- 杨树峰, 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
- 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
- 庄锡进, 肖立新, 杨军. 2002. 塔里木盆地西南沉积相展布特征及演化. 新疆地质, 20(增刊): 78-82
- 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