

新疆北部二叠纪基性岩墙群岩浆作用 及其动力学背景

林 瑶¹, 汤庆艳¹, 张铭杰¹, 焦建刚², 陈思童¹, 虎 啸¹

(1. 兰州大学 地质科学与矿产资源学院, 甘肃 兰州 730000;

2. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘 要:新疆北部西准噶尔、吐哈盆地、东天山、西天山以及塔里木东北缘广泛发育的二叠纪(260~290 Ma)基性岩墙群与塔里木大火成岩省形成时代相近。基性岩墙群主量元素与 MgO 含量具有较好的相关性,富集 Rb、Ba 和 Sr 等大离子亲石元素以及轻稀土元素,亏损 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素,无明显 Eu 异常,与岛弧岩浆特征相似。 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-11.25 \sim 7.86$, 初始 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值为 $0.703 \sim 0.710$ 。西天山基性岩墙群亏损轻稀土元素,塔里木东北缘亏损 Sr。新疆北部二叠纪基性岩墙群岩浆可能起源于富集型软流圈地幔源区,岩浆演化过程中存在不同程度的地壳物质或俯冲交代岩石圈地幔的混染,其中西准噶尔、东天山、西天山和吐哈盆地岩墙经历了板片俯冲流体交代的岩石圈地幔混染,东天山及塔里木东北缘基性岩墙在岩浆演化过程中受到明显的地壳物质混染。新疆北部二叠纪基性岩墙群可能是地幔柱岩浆作用不同演化过程的产物。

关键词:地幔柱;混染;岩浆演化;基性岩墙;二叠纪;新疆

中图分类号:P583;P595

文献标志码:A

Magmatism and Dynamic Settings of Permian Mafic Dyke Swarms in the Northern of Xinjiang

LIN Yao¹, TANG Qing-yan¹, ZHANG Ming-jie¹, JIAO Jian-gang², CHEN Si-tong¹, HU Xiao¹

(1. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Permian (260-290 Ma) mafic dyke swarms in the northern of Xinjiang widely develop in West Junggar, Turpan-Hami Basin, East Tianshan, West Tianshan and the northeast margin of Tarim. The formation age of mafic dyke swarm is similar to that of Tarim large igneous provinces. The correlations between contents of major elements and MgO of mafic dyke swarms are obvious. Mafic dykes are enriched in large ion lithophile elements (Rb, Ba, Sr, etc.) and light rare earth elements (LREE), and depleted in high field strength element (Nb, Ta, Ti, etc.), and there is no obvious Eu anomaly, the characteristics are similar to island arc magma. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values of mafic dykes are $-11.25 \sim 7.86$, and the initial $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ values are $0.703 \sim 0.710$. Mafic dyke swarms in West Tianshan are depleted in LREE, and those in the northeast margin of Tarim are depleted in Sr. The magma of Permian mafic dyke swarm in the northern of

收稿日期:2014-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41372095,41072056,40772058);

中国地质调查局地质大调查项目(1212011121092,12120114044401);

教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120211110023)

作者简介:林 瑶(1988-),男,河北沧州人,理学硕士研究生,E-mail:ylin11@lzu.edu.cn.

通讯作者:汤庆艳(1986-),女,陕西咸阳人,讲师,理学博士,E-mail:tangqy@lzu.edu.cn.

Xinjiang is probably originated from enriched asthenosphere mantle source, and experiences different degrees of contamination of crust materials or metasomatic lithospheric mantle with subduction in the process of magmatic evolution. The dykes in West Junggar, East Tianshan, West Tianshan and Turpan-Hami Basin experience the contamination of lithospheric mantle with metasomatism of fluids from plate subduction; the mafic dykes in East Tianshan and the northeast margin of Tarim experience obvious contamination of crustal materials in the process of magmatic evolution. The Permian mafic dyke swarms in the northern of Xinjiang could be the products of mantle plume magmatism in different processes of evolution.

Key words: mantle plume; contamination; magma evolution; mafic dyke; Permian; Xinjiang

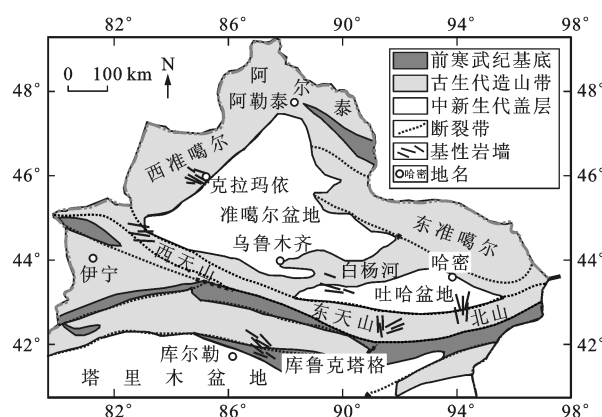
0 引言

基性岩墙群通常形成于大陆伸展背景下,由源自软流圈地幔或岩石圈地幔的玄武质岩浆,经过演化分异或地壳物质混染侵入形成,蕴含丰富的地幔源区和深部动力学信息,对古陆块重建及大陆地壳演化具有重要意义^[1-6]。放射状基性岩墙群的会聚区指示岩浆源的中心位置,是地幔柱的证据之一^[7-13]。新疆北部属于中亚造山带,在早石炭世晚期古天山洋闭合之后^[14-15]直到早二叠世进入碰撞造山期和后碰撞的伸展阶段^[16-17],广泛发育基性岩墙群^[18-29]。笔者总结了新疆北部广泛发育的二叠纪基性岩墙的分布、岩石学特征、形成时代以及地球化学特征,并与同时期的塔里木和峨眉山地幔柱的基性岩墙^[30-31]地球化学特征进行比较,探讨了二叠纪基性岩墙的岩浆作用过程及其动力学背景。

1 岩墙分布、岩石学特征和形成时代

新疆北部发育的二叠纪基性岩墙群的分布受区域构造裂隙的控制,主要出露于西准噶尔、西天山、东天山、吐哈盆地以及塔里木东北缘(图 1)。岩墙走向与区域内的主要断层走向一致,总体走向 NW—SE (280°~350°)、NE—SW (30°~60°),单个岩墙的出露宽度从几厘米至七八米,长度由几米至几十千米不等^[18,20-22,28]。不同区域基性岩墙群的发育程度有一定差别,以位于库鲁克塔格地块核心地带的阔克苏地区最为密集^[21]。

西准噶尔基性岩墙群主要产出早石炭世火山岩-硅质岩和花岗岩之中^[18-19];吐哈盆地基性岩墙群主要侵入于石炭系火山-沉积岩和侵入岩以及前寒武系变质岩^[20,22];西天山地区基性岩墙主要侵入于上石炭统沉积岩和花岗岩以及二叠系玄武岩中^[28];东天山基性岩墙群主要侵入于晚古生代的花岗岩及前寒武纪的变质岩中^[28];塔里木东北缘地区(库鲁



图件引自文献[32],有所修改

图 1 新疆北部二叠纪基性岩墙分布

Fig. 1 Distribution of Permian Mafic Dyke in the Northern of Xinjiang

克塔格地块)基性岩墙群侵入位于二叠纪之前的各类地质体中^[21]。

基性岩墙群岩性主要以辉绿岩为主^[18,20-22,28],岩石呈灰绿—黑绿色,具辉绿结构、块状构造,矿物成分主要为斜长石(体积分数约 50%)和辉石(约 25%),其余为少量的角闪石、磷灰石和磁铁矿等矿物。斜长石自形程度较高,呈柱状,其三角形空隙被他形单斜辉石充填,构成典型的辉绿结构,部分岩墙存在微弱的蚀变,如单斜辉石的绿泥石化。

基性岩墙群的锆石 SHRIMP、LA-ICP-MS U-Pb 年龄和全岩 K-Ar 年龄为 260~290 Ma(表 1),与区内共生的玄武岩、辉长岩、流纹岩、正长岩及塔里木大火成岩省基性岩墙的形成时代基本一致^[33-39]。其中,准噶尔盆地的基性岩墙时代较新,为 260~271.5 Ma,吐哈盆地和西天山的基性岩墙根据地层推测其形成时代可能为二叠世^[22,28]。

2 岩墙地球化学特征

2.1 主量元素

新疆北部二叠纪基性岩墙群全岩化学分析数据

表 1 新疆北部基性岩墙年龄

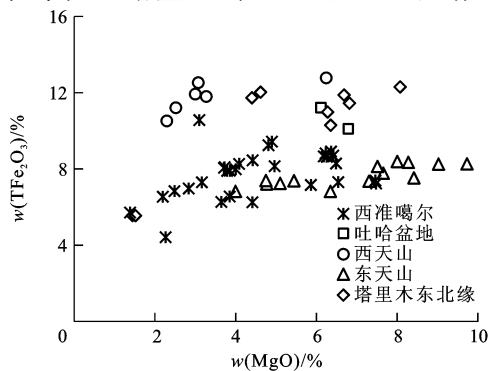
Tab. 1 Ages of Mafic Dykes in the Northern of Xinjiang

构造单元	产地	岩性	形成时代	测年方法	文献来源
准噶尔盆地	克拉玛依	辉绿岩	260~271.5 Ma	全岩 K-Ar	[19]
		辉绿岩	267 Ma	SHRIMP U-Pb	[28]
吐哈盆地	哈密南部	辉绿岩	270~290 Ma		[22]
天山	东天山	辉绿岩	278 Ma	SHRIMP U-Pb	[28]
	西天山	辉绿岩	260~290 Ma		[28]
塔里木北缘	塔里木东北缘	辉绿岩	(287±13)Ma	K-Ar 等时线	[24]
	柯坪塔格	辉绿岩	(272±6)Ma	LA-ICP-MS U-Pb	[39]

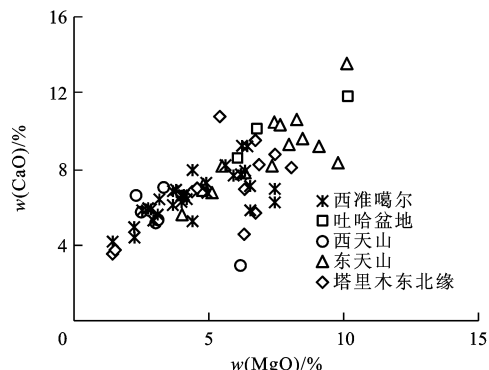
扣除烧失量,进行全铁换算,并将 MgO 与各主量元素含量(质量分数,下同)进行投图(图 2)。不同区域基性岩墙的 $w(\text{MgO})$ 与 $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{CaO})$ 成正相关关系[图 2(a)、(c)], $w(\text{MgO})$ 与 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $w(\text{K}_2\text{O})+w(\text{Na}_2\text{O})$ 成负相关关系[图 2(b)、(d)];主量元素组成变化主要受斜长石和辉石的控制,图 2 揭示西准噶尔、吐哈盆地、东天山、西天山及塔里木东北缘基性岩墙均经历了结晶分异作用。其中, $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量。

2.2 微量元素

西准噶尔、吐哈盆地、东天山、西天山及塔里木

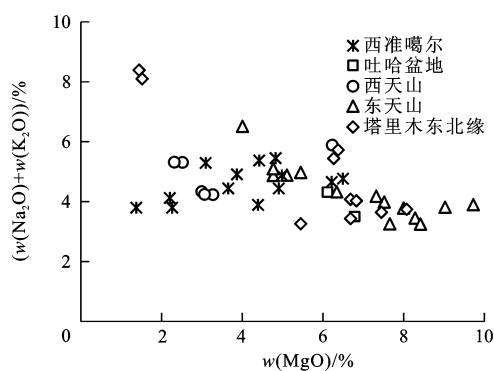


(a) $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ - $w(\text{MgO})$ 图解

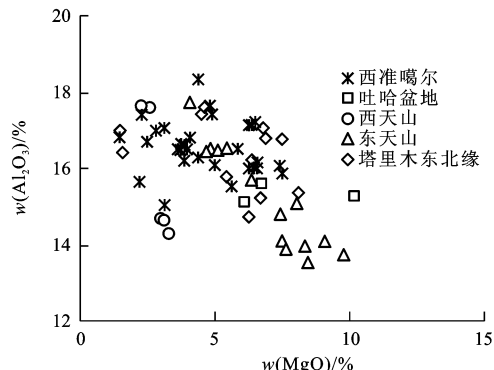


(c) $w(\text{CaO})$ - $w(\text{MgO})$ 图解

新疆北部二叠纪基性岩墙原始地幔标准化微量



(b) $w(\text{Na}_2\text{O})+w(\text{K}_2\text{O})$ - $w(\text{MgO})$ 图解



(d) $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ - $w(\text{MgO})$ 图解

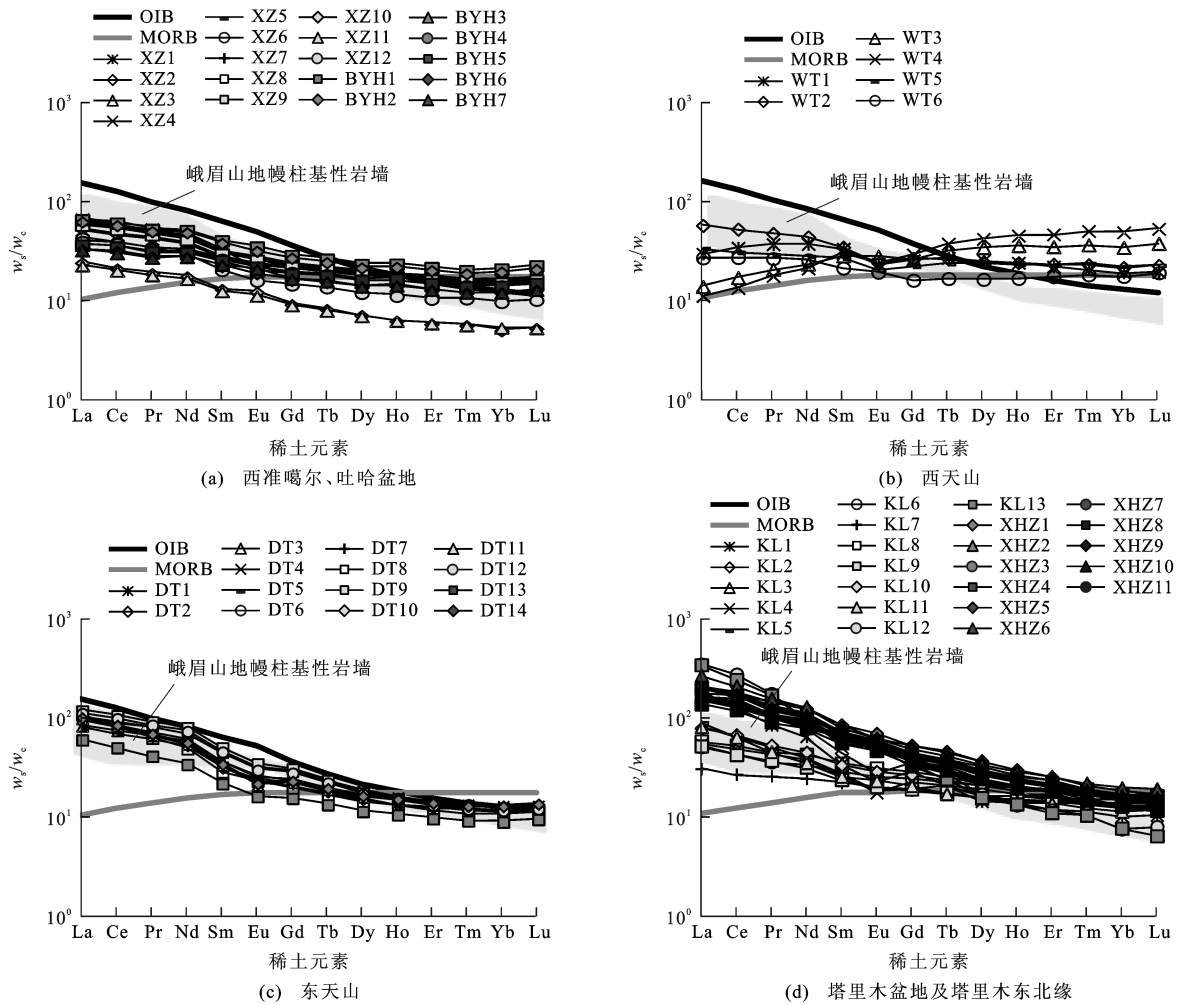
数据引自文献[20]~[22]和[28]

图 2 MgO 与主量元素含量的图解

Fig. 2 Diagrams of Contents of MgO and the Major Elements

东北缘基性岩墙球粒陨石标准化稀土元素配分模式(图 3)总体上表现为轻稀土元素富集型。稀土元素总含量(w_{REE})为 $(37.65\sim338.59)\times10^{-6}$, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $2.58\sim10.25$;轻、重稀土元素含量比值($w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$)为 $2.87\sim8.59$;塔里木东北缘基性岩墙表现出微弱的 Eu 负异常,其余 Eu 异常均在 1 左右,表明基性岩墙早期的岩浆过程中不存在明显的斜长石结晶分离或堆晶现象;上述各区域基性岩墙球粒陨石标准化稀土元素配分模式与洋岛玄武岩(OIB)、塔里木和峨眉山幔柱的基性岩墙相似,表明各区域基性岩墙具有相同的源区。其中, $w(\cdot)_{\text{N}}$ 为元素含量球粒陨石标准化后的值。

西天山的基性岩墙球粒陨石标准化稀土元素配分模式[图 3(b)]与洋岛玄武岩相比,呈现较平坦的配分模式,部分岩墙具有轻稀土元素亏损特征,与洋中脊玄武岩(MORB)相似。 w_{REE} 值为 $(57.35\sim99.15)\times10^{-6}$,轻、重稀土元素分馏不明显, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为 $0.23\sim2.65$, $w_{\text{LREE}}/w_{\text{HREE}}$ 值为 $0.72\sim3.40$;具有较明显的 Eu 负异常($0.79\sim1.03$),暗示岩浆演化过程中存在斜长石的分离结晶作用。



w_s 为样品含量; w_c 为球粒陨石含量; 岩墙数据引自文献[20]、[21]、[28]、[30]和[31]; 球粒陨石、OIB、MORB 数据引自文献[40]; 图例中, 除 OIB 和 MORB 外, 其余均为样品编号, BYH 开头的样品来自吐哈盆地, XZ 开头的样品来自西准噶尔, WT 开头的样品来自西天山, DT 开头的样品来自东天山, XH 开头的样品来自塔里木盆地, KL 开头的样品来自塔里木东北缘

图 3 新疆北部二叠纪基性岩墙球粒陨石标准化稀土元素配分模式

Fig. 3 Chondrite-normalized REE Patterns for Permian Mafic Dykes in the Northern of Xinjiang

元素蛛网图(图 4)表明 Nb、Ta 和 Ti 等高场强元素明显亏损, 与洋岛玄武岩、峨眉山地幔柱及塔里木二叠纪基性岩墙不同, 而与岛弧玄武岩具有相似的蛛网图; 西准噶尔、西天山及吐哈盆地的基性岩墙 Rb、Th 等大离子亲石元素亏损; 塔里木东北缘的基性岩墙具有明显的 Sr 负异常, 且球粒陨石标准化稀土元素配分模式中未表现出明显的 Eu 负异常[图 3(d)], 由于 Sr 的活动性较强, 所以推测塔里木东北缘的基性岩墙可能后期遭受了一定的蚀变作用。

2.3 Sr-Nd 同位素

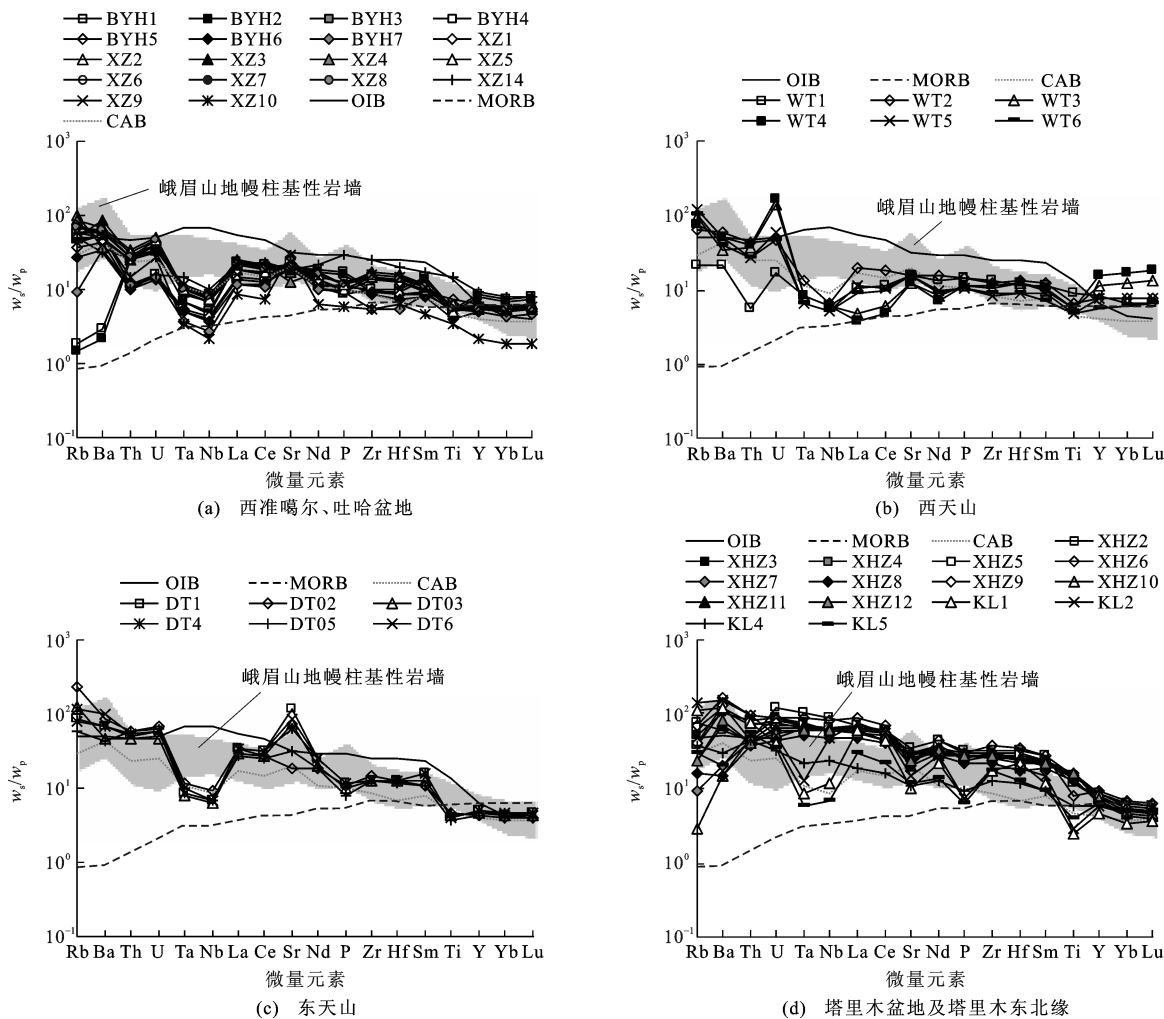
新疆北部二叠纪基性岩墙 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值变化范围较大, 为 $-11.25 \sim 7.86$ [21, 28, 31, 41]; 其初始 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值为 $0.703 \sim 0.710$ 。西准噶尔、吐哈盆地、西天山的基性岩墙具有较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和较低的初始 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值, 落入洋岛玄武岩源区及其附

近区域, 表明其原始岩浆起源于软流圈地幔。东天山与塔里木东北缘的二叠纪基性岩墙群具有较低的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值和较高的初始 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值(图 5)。东天山的基性岩墙初始 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 值变化较大, $\epsilon_{Nd}(t)$ 值变化较小, 可能与蚀变有关。与塔里木盆地内基性岩墙相比 [31], 塔里木东北缘基性岩墙在形成过程中可能遭受了下地壳物质的混染, 且混染程度较高, 达 30% (图 5)。

3 岩浆作用

3.1 源区特征

新疆北部二叠纪基性岩墙具有与洋岛玄武岩相似的球粒陨石标准化稀土元素配分模式, Sr-Nd 同位素组成主要落入洋岛玄武岩源区及附近, 表明基性岩墙的岩浆起源于洋岛玄武岩源区类似的区域。洋岛



w_p 为原始地幔含量;岩墙数据引自文献[20]、[21]、[28]、[30]和[31];原始地幔、OIB 和 MORB 数据引自文献[40];钙碱玄武岩(CAB)数据

引自文献[42];图例中,除 OIB、MORB 和 CAB 外,其余均为样品编号,BYH 开头的样品来自吐哈盆地,XZ 开头的样品来自西准噶尔,

WT 开头的样品来自西天山,DT 开头的样品来自东天山,XH 开头的样品来自塔里木盆地,KL 开头的样品来自塔里木东北缘

图4 新疆北部二叠纪基性岩墙原始地幔标准化微量元素蛛网图

Fig. 4 Primitive Mantle-normalized Trace Element Spider Diagrams for Permian Mafic Dykes in the Northern of Xinjiang

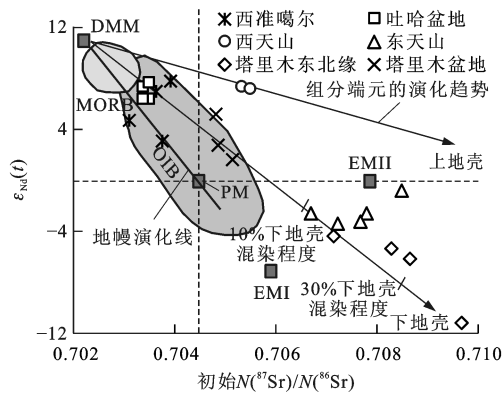
玄武岩源区起源岩浆形成的岩石被认为是板内环境岩石圈之下软流圈地幔部分熔融的结果^[43];西准噶尔、西天山、吐哈盆地、塔里木盆地内部的基性岩墙具有较低的 Sr 初始值(0.703~0.705)和较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(2.0~8.9),揭示软流圈地幔源区特征^[44]。

$w(Zr)/w(Y)$ 、 $w(La)_N/w(Sm)_N$ 值在岩浆演化过程中保持不变^[45],被广泛用于地幔源区性质的判识。东天山、西准噶尔、西天山、吐哈盆地和塔里木东北缘的基性岩墙可能来自石榴子石(体积分数为5%)、角闪石(4%)和金云母(1%)组成的地幔熔融(图6)。东天山和西准噶尔基性岩墙母岩浆起源的熔融程度较低,而西天山的熔融程度相对较高。西天山部分基性岩墙轻稀土元素亏损[图3(b)]可能与源区部分熔融程度较高有关。

3.2 岩浆演化

玄武岩体系中不相容元素 La、Sm 和 Ta 的分配系数相似,地幔部分熔融和分离结晶作用对其含量的影响很小,可指示岩浆源区的环境特征。来自软流圈的地幔柱岩浆 $w(La)/w(Ta)$ 值较低(8~15);大陆岩石圈地幔混染后, $w(La)/w(Ta)$ 值会迅速超过 25, $w(La)/w(Sm)$ 值变化不大;当存在地壳物质的混染后, $w(La)/w(Sm)$ 值会超过 5^[46]。新疆北部二叠纪基性岩墙 $w(La)/w(Ta)$ 值较高(10~80), $w(La)/w(Sm)$ 值大多低于 7(图7),表明基性岩墙岩浆受到岩石圈地幔的混染,东天山和塔里木东北缘的基性岩墙有较明显的地壳物质混染,这与 Sr-Nd 同位素(图5)揭示的信息一致。

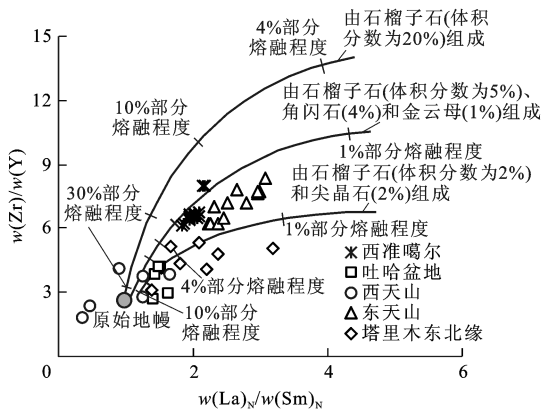
新疆北部二叠纪基性岩墙富集轻稀土元素,大



$\epsilon_{Nd} = [(N(^{143}Nd)/N(^{144}Nd))_i / (N(^{143}Nd)/N(^{144}Nd))_{CHUR} - 1] \times 10^4$, 下标 i 表示初始比值, 下标 CHUR 表示球粒陨石均一源与样品同时的比值; $N(\cdot)/N(\cdot)$ 为同一元素同位素比值, $N(\cdot)$ 为该元素的原子丰度; $\epsilon_{Nd}(t)$ 为年龄 t 对应的 ϵ_{Nd} 值; EM I 为 I 型富集地幔; EM II 为 II 型富集地幔; PM 为原始地幔; DMM 为亏损地幔端元; 数据引自文献[21]、[28]、[31]和[41]; 底图引自文献[41], 有所修改

图 5 $\epsilon_{Nd}(t)$ -初始 $N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)$ 图解

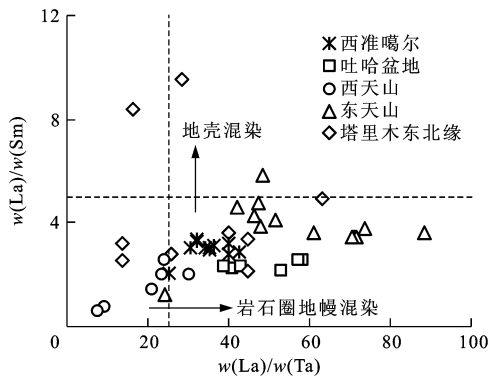
Fig. 5 Diagram of $\epsilon_{Nd}(t)$ -initial $N(^{87}Sr)/N(^{86}Sr)$



数据引自文献[20]、[21]和[28]; 底图引自文献[45]

图 6 $w(Zr)/w(Y)$ - $w(La)/w(Sm)$ 图解

Fig. 6 Diagram of $w(Zr)/w(Y)$ - $w(La)/w(Sm)$



数据引自文献[20]、[21]和[28]

图 7 $w(La)/w(Sm)$ - $w(La)/w(Ta)$ 图解

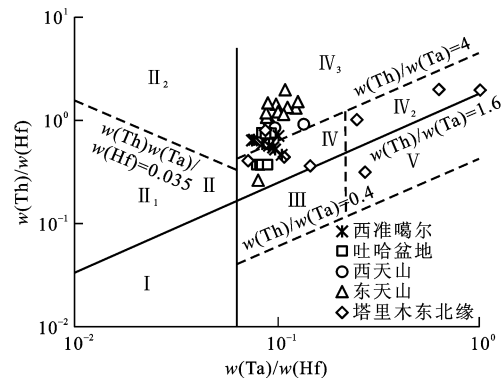
Fig. 7 Diagram of $w(La)/w(Sm)$ - $w(La)/w(Ta)$

离子亲石元素、Th 和 Sr 等适度富集, Nb、Ta 和 Ti 亏损, $w(Nb)/w(La)$ 值 (小于 0.5)、 $w(Nb)/w(U)$ 值 (1.3~21.6) 和 $w(Nb)/w(Th)$ 值 (1.0~9.2) 较低, 具有与俯冲带作用有关的岛弧火山岩相似的微量元素特征^[47]。地壳混染会造成 $w(Nb)/w(La)$ 值、 $w(Nb)/w(U)$ 值和 $w(Nb)/w(Th)$ 值的降低, 因此, 这些类似岛弧特征的微量元素组成有可能是地壳混染造成的。西准噶尔、西天山和吐哈盆地基性岩墙的 Sr-Nd 同位素和 $w(La)/w(Sm)$ - $w(La)/w(Ta)$ 图解特征显示微弱的地壳混染, Nd 同位素具有亏损地幔的特征, 表明岩浆作用过程中有交代作用, 与新疆北部二叠纪基性-超基性岩体的形成过程相似^[48-52]; 塔里木东北缘基性岩墙轻微富集大离子亲石元素 (Rb、Ba), 亏损高场强元素 (Nb、Ta、Ti、P), 具有较高的 $w(La)/w(Nb)$ 值和 $w(Th)/w(Nb)$ 值 (大于 1), $\epsilon_{Nd}(t)$ 值较低, 表明混染程度较高^[44]。综上所述, 新疆北部基性岩墙来源于软流圈地幔的玄武质岩浆经历了微弱的分离结晶和不同程度的被俯冲流体交代过的岩石圈地幔和地壳混染。

3.3 地球动力学背景

耐熔的高场强元素 Th、Ta 和 Hf 的地球化学性质十分相似, 在岩浆演化过程中大致保持同步变化。 $w(Th)/w(Hf)$ 值和 $w(Ta)/w(Hf)$ 值可揭示深部地球化学作用过程以及源区环境和性质^[47]。新疆北部二叠纪基性岩墙全部落入大陆板内环境和地幔柱环境之中 (图 8)。

岩石圈拆沉、造山后板片拆沉及地幔柱作用引



I—板块发散边缘, 正常洋中脊玄武岩; II—板块会聚边缘; II₁—大洋岛弧玄武岩; II₂—陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩; III—大洋板内洋岛、海山玄武岩及过渡型和富集型洋中脊玄武岩; IV—大陆板内; IV₁—陆内裂谷及陆缘拉斑玄武岩; IV₂—陆内裂谷碱性玄武岩; IV₃—大陆拉张带或初始裂谷玄武岩; V—热的地幔柱玄武岩; 数据引自文献[20]~[22]和[28]; 底图引自文献[53]

图 8 $w(Th)/w(Hf)$ - $w(Ta)/w(Hf)$ 图解

Fig. 8 Diagram of $w(Th)/w(Hf)$ - $w(Ta)/w(Hf)$

起的大陆裂解可引发板内岩浆作用。新疆北部石炭纪晚期(集中在290~320 Ma)非造山成因的大量花岗岩可能是由板片拆沉形成的;新疆北部二叠纪大规模玄武岩^[54]无法用板片拆沉和岩石圈拆沉模式解释,二叠纪大范围岩墙群和大规模玄武岩可能是地幔柱作用的产物。

新疆北部二叠纪基性岩墙群最原始动力可能是地幔柱作用。天山古洋盆的关闭时限可能是早石炭世晚期^[14-15,55],同时准噶尔板块与塔里木板块(伊犁—中天山微板块是塔里木板块的北缘)拼合形成统一大陆,进入陆内发展阶段^[15,56]。增厚的陆下地幔根发生拆离和下沉,造成热的软流圈地幔上涌,替代形成地幔柱,并相应地发生减压部分熔融;当地幔柱头撞击岩石圈底部时,岩石圈地幔发生部分熔融,软流圈地幔柱源的熔融体和岩石圈地幔源的熔融体上升并喷发^[43],地壳物质的混染使广泛分布的基性岩墙群在地球化学特征上形成差异。新疆北部基性岩墙群可能是塔里木地幔柱的一个较好的佐证。

4 结 语

(1)新疆北部二叠纪基性岩墙群主要为辉绿岩,富集Rb、Ba和Sr等大离子亲石元素以及轻稀土元素,亏损Nb、Ta和Ti。西准噶尔、西天山和吐哈盆地 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(2.0~8.9)较高;东天山和塔里木东北缘 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(小于0)较低。

(2)基性岩墙母岩浆可能起源于富集型软流圈地幔源区,其中西准噶尔、西天山、东天山和吐哈盆地岩墙经历了板片俯冲流体交代的岩石圈地幔混染,东天山和塔里木东北缘岩墙经历了较为明显的地壳混染。

(3)新疆北部二叠纪基性岩墙群可能是地幔柱岩浆作用不同演化过程的产物。

参考文献:

References:

- [1] HALLS H C, FAHRIG W F. Mafic Dyke Swarms[M]. St. John's: Geological Association of Canada, 1987.
- [2] 董津津, 陈宁华, 厉子龙. 新疆库鲁克塔格地区基性岩墙群几何学与岩浆超压估算[J]. 岩石学报, 2013, 29(10): 3547-3554.
DONG Jin-jin, CHEN Ning-hua, LI Zi-long. Geometry of Mafic Dyke Swarms and Estimation of Magma Overpressures in Kuluktag Region, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(10): 3547-3554.
- [3] 董传万, 闫强, 张登荣, 等. 浙闽沿海晚中生代伸展构造的岩石学标志: 东极岛镁铁质岩墙群[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1195-1203.
DONG Chuan-wan, YAN Qiang, ZHANG Deng-rong, et al. Late Mesozoic Extension in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian Provinces: A Petrologic Indicator from the Dongji Island Mafic Dike Swarms[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(4): 1195-1203.
- [4] HOU G T. Mechanism for Three Types of Mafic Dyke Swarms[J]. Geoscience Frontiers, 2012, 3(2): 217-223.
- [5] 郭晶, 罗照华, 刘晓, 等. 利用宽谱系岩墙群进行靶区定位的数值方法: 以新疆南阿拉套山为例[J]. 中国地质, 2013, 40(2): 423-429.
GUO Jing, LUO Zhao-hua, LIU Xiao, et al. A Quantitative Method for Target Prediction Using the Wide Composition-spectrum Dike Swarms: A Case Study of the South Alataw Mountain in Xinjiang[J]. Geology in China, 2013, 40(2): 423-429.
- [6] 罗照华, 陈必河, 江秀敏, 等. 利用宽谱系岩墙群进行勘查靶区预测的初步尝试: 以南阿拉套山为例[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 1949-1965.
LUO Zhao-hua, CHEN Bi-he, JIANG Xiu-min, et al. A Preliminary Attempt for Targeting Prospecting Districts Using the Wide Composition-spectrum Dike Swarms: An Example of the South Alatao Mountains, Xinjiang, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(7): 1949-1965.
- [7] ERNST R E, BUCHAN K L. Giant Radiating Dyke Swarms: Their Use in Identifying Pre-Mesozoic Large Igneous Provinces and Mantle Plumes[M]// MAHONEY J J, COFFIN M F. Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism. Washington DC: American Geophysical Union, 1997: 297-333.
- [8] ERNST R E, BUCHAN K L. Recognizing Mantle Plumes in the Geological Record[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2003, 31: 469-523.
- [9] 徐义刚, 何斌, 黄小龙, 等. 地幔柱大辩论及如何验证地幔柱假说[J]. 地学前缘, 2007, 14(2): 1-9.
XU Yi-gang, HE Bin, HUANG Xiao-long, et al. The Debate over Mantle Plumes and How to Test the Plume Hypothesis[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(2): 1-9.
- [10] 徐义刚, 王焰, 位荀, 等. 与地幔柱有关的成矿作用及其主控因素[J]. 岩石学报, 2013, 29(10): 3307-3322.
XU Yi-gang, WANG Yan, WEI Xun, et al. Mantle Plume-related Mineralization and Their Principal Controlling Factors[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29

- (10):3307-3322.
- [11] 汤庆艳,张铭杰,余明,等.晚二叠世峨眉山地幔柱岩浆成矿作用[J].岩石矿物学杂志,2013,32(5):680-692.
TANG Qing-yan,ZHANG Ming-jie,YU Ming,et al. The Magmatic Ore-forming System of Late-Permian Emeishan Mantle Plume[J]. Acta Petrologica et Mineralogica,2013,32(5):680-692.
- [12] 李宏博,张招崇,吕林素.峨眉山大火成岩省基性墙群几何学研究及对地幔柱中心的指示意义[J].岩石学报,2010,26(10):3143-3152.
LI Hong-bo,ZHANG Zhao-chong,LU Lin-su. Geometry of the Mafic Dyke Swarms in Emeishan Large Igneous Province: Implications for Mantle Plume[J]. Acta Petrologica Sinica,2010,26(10):3143-3152.
- [13] OLSSON J R,SODERLUND U,HAMILTON M A, et al. A Late Archaean Radiating Dyke Swarm as Possible Clue to the Origin of the Bushveld Complex[J]. Nature Geoscience,2011,4(12):865-869.
- [14] 李永军,杨高学,张天继,等.西天山伊宁地块主褶皱幕鄯善运动的确立及地质意义[J].地球科学进展,2009,24(4):420-427.
LI Yong-jun,YANG Gao-xue,ZHANG Tian-ji,et al. Definition of the Major Fold Episode Shanshan Movement in Yining Massif, Western Tianshan Mountains, and Its Geological Significance[J]. Advances in Earth Science,2009,24(4):420-427.
- [15] 李永军,李注苍,佟丽莉,等.论天山古洋盆关闭的地质时限——来自伊宁地块石炭系的新证据[J].岩石学报,2010,26(10):2905-2912.
LI Yong-jun,LI Zhu-cang,TONG Li-li,et al. Revisit the Constraints on the Closure of the Tianshan Ancient Oceanic Basin: New Evidence from Yining Block of the Carboniferous[J]. Acta Petrologica Sinica,2010,26(10):2905-2912.
- [16] XIA L Q,XU X Y,XIA Z C,et al. Carboniferous Post-collisional Rift Volcanism of the Tianshan Mountains, Northwestern China[J]. Acta Geologica Sinica: English Edition,2003,77(3):338-360.
- [17] XIA L Q,XU X Y,XIA Z C,et al. Petrogenesis of Carboniferous Rift-related Volcanic Rocks in the Tianshan, Northwestern China[J]. GSA Bulletin,2004,116(3/4):419-433.
- [18] 李辛子,韩宝福,李宗怀,等.新疆克拉玛依中基性岩墙群形成力学机制及其构造意义[J].地质论评,2005,51(5):517-522.
LI Xin-zi,HAN Bao-fu,LI Zong-huai,et al. Mechanism of the Karamay Basic-intermediate Dyke Swarm from Xinjiang and Tectonic Implications[J]. Geological Review,2005,51(5):517-522.
- [19] 李辛子,韩宝福,季建清,等.新疆克拉玛依中基性岩墙群的地质地球化学和 K-Ar 年代学[J].地球化学,2004,33(6):574-584.
LI Xin-zi,HAN Bao-fu,JI Jian-qing,et al. Geology, Geochemistry and K-Ar Ages of the Karamay Basic-intermediate Dyke Swarm from Xinjiang, China[J]. Geochimica,2004,33(6):574-584.
- [20] 欧阳征健,周鼎武,林晋炎,等.博格达山白杨河地区中基性岩墙地球化学特征及其地质意义[J].大地构造与成矿学,2006,30(4):495-503.
OUYANG Zheng-jian,ZHOU Ding-wu,LIN Jin-yan,et al. Geochemistry and Geological Implications of the Baiyanghe Basic-intermediate Dyke Swarm in the Bogda Orogenic Belt in Xinjiang, China[J]. Geotectonica et Metallogenia,2006,30(4):495-503.
- [21] 姜常义,姜寒冰,叶书锋,等.新疆库鲁克塔格地区二叠纪脉岩群岩石地球化学特征,Nd、Sr、Pb 同位素组成与岩石成因[J].地质学报,2005,79(6):823-833.
JIANG Chang-yi,JIANG Han-bing,YE Shu-feng,et al. Petrochemical Characteristics, Nd, Sr, Pb Isotopic Compositions and Petrogenesis of Permian Dike Swarm, Kuruktag Region, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica,2005,79(6):823-833.
- [22] 校培喜,黄玉华,王育习,等.新疆哈密南部北山地区基性岩墙群的地质特征及形成构造环境[J].地质通报,2006,25(1/2):189-193.
XIAO Pei-xi,HUANG Yu-hua,WANG Yu-xi,et al. Geological Characteristic and Tectonic Environment of Basic Dike Swarms in the Beishan Area, Southern Hami, Xinjiang, China[J]. Geological Bulletin of China,2006,25(1/2):189-193.
- [23] 陈宁华,董津津,厉子龙,等.新疆北山地区二叠纪地壳伸展量估算:基性岩墙群厚度统计的结果[J].岩石学报,2013,29(10):3540-3546.
CHEN Ning-hua,DONG Jin-jin,LI Zi-long,et al. Permian Crustal Extension of Beishan Area in Xinjiang, NW China: Estimation from the Statistical Thickness of Exposed Mafic Dyke Swarms[J]. Acta Petrologica Sinica,2013,29(10):3540-3546.
- [24] 刘玉琳,张志诚,郭召杰,等.库鲁克塔格基性岩墙群 K-Ar 等时年龄测定及其有关问题讨论[J].高校地质学报,1999,5(1):54-58.
LIU Yu-lin,ZHANG Zhi-cheng,GUO Zhao-jie,et al. K-Ar Isochron Dating of Kuluktag Mafic Dykes, Xinjiang Autonomous Region, and Discussion on Some Related Questions[J]. Geological Journal of China

- Universities, 1999, 5(1): 54-58.
- [25] 李乐, 侯贵廷, 杨彦平, 等. 新疆克拉玛依北西向岩墙群侵位的磁组构证据[J]. 地质学报, 2013, 87(6): 814-822.
- LI Le, HOU Gui-ting, YANG Yan-ping, et al. Magnetic Fabric Evidence for the Emplacement of Karamay NWW Dyke Swarm, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(6): 814-822.
- [26] MAO J W, PIRAJNO F, ZHANG Z H, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of Alkaline Dykes in the Pobei Area, Beishan Rift, Xinjiang Autonomous Region, China: Implications for Tectonic Setting and Mantle Plume Events[J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2012, 86(4): 879-884.
- [27] ZHANG Z H, CHAI F M, WANG T H, et al. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Diabase Dyke Swarms in East Tianshan, Xinjiang, NW China[J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2012, 86(6): 1500-1514.
- [28] ZHANG C L, ZOU H B. Comparison Between the Permian Mafic Dykes in Tarim and the Western Part of Central Asian Orogenic Belt(CAOB), NW China: Implications for Two Mantle Domains of the Permian Tarim Large Igneous Province[J]. Lithos, 2013, 174: 15-27.
- [29] YIN J Y, LONG X P, YUAN C, et al. A Late Carboniferous-Early Permian Slab Window in the West Junggar of NW China: Geochronological and Geochemical Evidence from Mafic to Intermediate Dikes[J]. Lithos, 2013, 175/176: 146-162.
- [30] 李宏博, 张招崇, 吕林素, 等. 四川冕宁基性岩墙的年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质论评, 2012, 58(5): 952-964.
- LI Hong-bo, ZHANG Zhao-chong, LU Lin-su, et al. Geochronology, Geochemistry and Geological Significances of the Permian Basic Dykes in Mianning, Sichuan Province[J]. Geological Review, 2012, 58(5): 952-964.
- [31] ZHOU M F, ZHAO J H, JIANG C Y, et al. OIB-like, Heterogeneous Mantle Sources of Permian Basaltic Magmatism in the Western Tarim Basin, NW China: Implications for a Possible Permian Large Igneous Province[J]. Lithos, 2009, 113(3/4): 583-594.
- [32] 王玉往, 王京彬, 李德东, 等. 新疆北部幔源岩浆矿床的类型、时空分布及成矿谱系[J]. 矿床地质, 2013, 32(2): 223-243.
- WANG Yu-wang, WANG Jing-bin, LI De-dong, et al. ic Lineage of Ore Deposits Related to Mantle-derived Magma in Northern Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2013, 32(2): 223-243.
- [33] CHEN B, JAHN B M. Genesis of Post-collisional Granitoids and Basement Nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr Isotope and Trace Element Evidence[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 23(5): 691-703.
- [34] ZHAO Z H, XIONG X L, WANG Q, et al. Underplating-related Adakites in Xinjiang Tianshan, China[J]. Lithos, 2008, 102(1/2): 374-391.
- [35] ZHOU D W, LIU Y Q, XING X J, et al. Formation of the Permian Basalts and Implications of Geochemical Tracing for Paleo-tectonic Setting and Regional Tectonic Background in the Turpan-Hami and Santanghu Basins, Xinjiang[J]. Science in China: Series D, 2006, 49(6): 584-596.
- [36] ZHOU M F, LESHER C M, YANG Z X, et al. Geochemistry and Petrogenesis of 270 Ma Ni-Cu-(PGE) Sulfide-bearing Mafic Intrusions in the Huangshan District, Eastern Xinjiang, Northwest China: Implications for the Tectonic Evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Chemical Geology, 2004, 209(3/4): 233-257.
- [37] ZHANG C L, LI X H, LI Z X, et al. A Permian Layered Intrusive Complex in the Western Tarim Block, Northwestern China: Product of a Ca. 275 Ma Mantle Plume? [J]. The Journal of Geology, 2008, 116(3): 269-287.
- [38] TIAN W, CAMPBELL I H, ALLEN C M, et al. The Tarim Picrite-basalt-rhyolite Suite, a Permian Flood Basalt from Northwest China with Contrasting Rhyolites Produced by Fractional Crystallization and Anatexis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2010, 160(3): 407-425.
- [39] 李勇, 苏文, 孔屏, 等. 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[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 1097-1107.
- LI Yong, SU Wen, KONG Ping, et al. Zircon U-Pb Ages of the Early Permian Magmatic Rocks in the Tazhong-Bachu Region, Tarim Basin by LA-ICP-MS[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(5): 1097-1107.
- [40] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [41] SUN T, QIAN Z Z, LI C S, et al. Petrogenesis and Economic Potential of the Erhongwa Mafic-ultramafic

- Intrusion in the Central Asian Orogenic Belt, NW China; Constraints from Olivine Chemistry, U-Pb Age and Hf Isotopes of Zircons, and Whole-rock Sr-Nd-Pb Isotopes[J]. *Lithos*, 2013, 182/183: 185-199.
- [42] KELEMEN P B, HANGHOJ K, GREENE A R. One View of the Geochemistry of Subduction-related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust[M] // RUDNICK R L. *The Crust: Treatise on Geochemistry*. London: Elsevier, 2006: 593-659.
- [43] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱[J]. *地质通报*, 2004, 23(9/10): 903-910.
XIA Lin-qi, XIA Zu-chun, XU Xue-yi, et al. Carboniferous Tianshan Igneous Megaprovince and Mantle Plume[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(9/10): 903-910.
- [44] SAUNDERS A D, STOREY M, KENT R W, et al. Consequences of Plume-lithosphere Interactions[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1992, 68: 41-60.
- [45] GURENKO A A, HOERNLE K A, HAUFF F, et al. Major, Trace Element and Nd-Sr-Pb-O-He-Ar Isotope Signatures of Shield Stage Lavas from the Central and Western Canary Islands: Insights into Mantle and Crustal Processes[J]. *Chemical Geology*, 2006, 233(1/2): 75-112.
- [46] LASSITER J C, DEPAOLO D J. Plume/Lithosphere Interaction in the Generation of Continental and Oceanic Flood Basalts; Chemical and Isotopic Constraints[M] // MAHONEY J, COFFIN M F. *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic, and Planetary Flood Volcanism*. Washington DC: American Geophysical Union, 1997: 335-355.
- [47] MCCULLOCH M T, GAMBLE J A. Depleted Source for Volcanic Arc Basalts: Constraints from Basalts of Kenadec-Taupo Volcanic Zone Based on Trace Elements, Isotopes and Subduction Chemical Geodynamics, Continental Magmatism[R]. Socorro: New Mexico Bureau of Geology and Mineral Resources, 1989.
- [48] 傅飘儿, 胡沛青, 张铭杰, 等. 新疆黄山铜镍硫化物矿床成矿岩浆作用过程[J]. *地球化学*, 2009, 38(5): 432-448.
FU Piao-er, HU Pei-qing, ZHANG Ming-jie, et al. Metallogenic Magmatism of Huangshan Cu-Ni Sulfide Deposit in Xinjiang[J]. *Geochimica*, 2009, 38(5): 432-448.
- [49] 贾志永, 张铭杰, 汤中立, 等. 新疆喀拉通克铜镍硫化物矿床成矿岩浆作用过程[J]. *矿床地质*, 2009, 28(5): 673-686.
- JIA Zhi-yong, ZHANG Ming-jie, TANG Zhong-li, et al. Petrogenesis of Kalatongke Cu-Ni Sulfide Deposit in Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(5): 673-686.
- [50] 胡沛青, 任立业, 傅飘儿, 等. 新疆哈密黄山东铜镍硫化物矿床成岩成矿作用[J]. *矿床地质*, 2010, 29(1): 158-168.
HU Pei-qing, REN Li-ye, FU Piao-er, et al. Petrogenetic and Ore-forming Processes of Huangshandong Cu-Ni Sulfide Deposit in Hami, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(1): 158-168.
- [51] FU P E, TANG Q Y, ZHANG M J, et al. Ore Genesis of Kalatongke Cu-Ni Sulfide Deposits, Western China: Constraints from Volatile Chemical and Carbon Isotopic Compositions[J]. *Acta Geologica Sinica: English Edition*, 2012, 86(3): 568-578.
- [52] ZHANG M J, LI C S, FU P E, et al. The Permian Huangshanxi Cu-Ni Deposit in Western China: Intrusive-extrusive Association, Ore Genesis, and Exploration Implications[J]. *Mineralium Deposita*, 2011, 46(2): 153-170.
- [53] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 413-421.
WANG Yun-liang, ZHANG Cheng-jiang, XIU Shu-zhi. Th/Hf-Ta/Hf Identification of Tectonic Setting of Basalts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3): 413-421.
- [54] 张传林, 周刚, 王洪燕, 等. 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[J]. *地质通报*, 2010, 29(6): 779-794.
ZHANG Chuan-lin, ZHOU Gang, WANG Hong-yan, et al. A Review on Two Types of Mantle Domains of the Permian Large Igneous Province in Tarim and the Western Section of Central Asian Orogenic Belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(6): 779-794.
- [55] 朱志新, 董连慧, 王克卓, 等. 西天山造山带构造单元划分与构造演化[J]. *地质通报*, 2013, 32(2/3): 297-306.
ZHU Zhi-xin, DONG Lian-hui, WANG Ke-zhuo, et al. Tectonic Division and Regional Tectonic Evolution of West Tianshan Organic Belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(2/3): 297-306.
- [56] 李锦轶, 王克卓, 李亚萍, 等. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化[J]. *地质通报*, 2006, 25(8): 895-909.
LI Jin-yi, WANG Ke-zhuo, LI Ya-ping, et al. Geomorphological Features, Crustal Composition and Geological Evolution of the Tianshan Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(8): 895-909.