

新疆西天山尼勒克二叠纪火山岩的地球化学特征及构造意义*

叶海敏 叶现韬 张传林

YE HaiMin, YE XianTao and ZHANG ChuanLin

南京地质矿产研究所, 南京 210016

Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210016, China

2013-05-10 收稿, 2013-08-22 改回.

Ye HM, Ye XT and Zhang CL. 2013. Geochemistry and geodynamic implications of Nileke Permian volcanic rocks in Western Tianshan, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10):3389–3401

Abstract The terrestrial Nileke Permian volcanic rocks outcrop at the most western section of the Awulale Late Paleozoic volcanic belt. In this contribution, we reported petrography, elemental and Sr-Nd isotope compositions of the Nileke Permian basaltic rocks in aiming to have a better understanding its geodynamic implications. The Nileke volcanic strata could be divided into two series, i. e., the Wulang series (lower) and the Hamisite seires (upper) and the diverse rock types include basalts, andesites, trachytes and rhyolites. In geochemistry, the upper Hamisite seires exhibit shoshonitic signatures such as having high K_2O (2.81% ~ 3.91%), Sr ($>1000 \times 10^{-6}$), total REE ($>200 \times 10^{-6}$) contents, high $(La/Yb)_N$ (9.7 ~ 11.7) but low Nb/La ratios (most <0.2) and shows. The lower Wulang series could be divided into two sub-groups: sub-group one contains the lowest SiO_2 , low Sr ($<500 \times 10^{-6}$), total REE ($50 \times 10^{-6} < \Sigma REE < 80 \times 10^{-6}$) and low $(La/Yb)_N$ (1.6 ~ 2.2) but the highest MgO and relatively higher Nb/La ratios (>0.35). These features are comparable with those of E-MORB, suggesting that they could be derived from high-degree partial melting in a decompressing process. Sub-group two has a wide range of geochemical compositions straddling between the Hamisite seires and the sub-group one. The Nileke Permian volcanic rocks have intensive depleted Sr-Nd isotopic compositions similar with those of MORB, indicating that they were derived from the time-integrated depleted mantle sources. However, their significant depletion in Nb-Ta, intensive differentiation and enrichment in LILE argue that the Permian basaltic rocks in Nileke area were derived from a recently metasomatized depleted lithospheric mantle sources. Additionally, our study reveals that their chemical signatures were constrained by partial melting degree and crystal fractionation process. In combination with regional geology and previous studies, the Nileke Permian volcanic rocks could be genetically related to the Permian Tarim mantle plume.

Key words Nileke, Western Tianshan; Permian volcanic rocks; Geochemistry; Tectonic implications

摘要 尼勒克二叠纪火山岩位于伊犁盆地北缘阿吾拉勒山西段,该地区发育一套完整的陆相二叠纪地层。本文对该区二叠纪中下统哈米斯特组和乌郎组火山岩进行了系统的岩相学、岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素研究。尼勒克火山岩岩石类型多样,有玄武岩、安山岩、粗面岩、流纹岩等,地球化学特征复杂。上火山岩哈米斯特组火山岩具有典型的钾玄岩特征,高 K_2O (2.81% ~ 3.91%)、Sr ($>1000 \times 10^{-6}$)、稀土 ($\Sigma REE > 200 \times 10^{-6}$) 和 $(La/Yb)_N$ 比值 (9.7 ~ 11.7), 低 Nb/La 比值 (大多 <0.2)。下火山岩乌郎组可分为二组,一组具最低 SiO_2 , 最高 MgO, 较低 Sr ($<500 \times 10^{-6}$)、稀土 ($50 \times 10^{-6} < \Sigma REE < 80 \times 10^{-6}$) 和 $(La/Yb)_N$ 比值 (1.6 ~ 2.2), 相对较高的 Nb/La 比值 (>0.35), 类似富集型洋中脊 (E-MORB) 特征, 暗示其岩浆是浅部源区高程度部分熔融的产物; 另一组火山岩有着相对较大的变化, 总体特征介于哈米斯特组与第一组火山岩两者之间。尼勒克火山岩有高度亏损的 Sr-Nd 同位素组成, 类似 MORB, 表明它们源自长期亏损的地幔源区。然而, 火山岩高度亏损的 Nb-Ta、分异且富集大离子亲石元素的特征暗示, 地幔源区受到近期俯冲带流体的交代作用, 并受部分熔融程度及结晶分异作用的控制, 是不同批次岩浆作用在不同演化阶段的产物。尼勒克大规模玄武质火山岩的形成可能和塔里木二叠纪地幔柱活动有关。

* 本文受 973 项目 (2011CB808903) 资助。

第一作者简介: 叶海敏, 女, 1973 年生, 副研究员, 岩石学专业, E-mail: yhaimin@sina.com

关键词 西天山尼勒克;二叠纪火山岩;地球化学;构造意义
中图法分类号 P588.14

1 引言

中亚造山带是位于西伯利亚板块和塔里木-中朝板块之间的巨型造山带,发育了大量的二叠纪不同类型的火成岩,主要岩石类型包括大面积分布的玄武岩、基性岩墙、花岗岩(主要为A型)、超镁铁-镁铁杂岩及双峰式侵入杂岩等。对于中亚造山带二叠纪不同类型的火成岩形成的构造背景,绝大多数地质学家认为是造山后加厚山根的垮塌引起的伸展作用(Zhou *et al.*, 2006; 王式洸等, 1994; 夏祖春等, 2005; Han *et al.*, 1997; Jahn, 2004),导致幔源玄武岩浆喷发和侵入形成超镁铁-镁铁杂岩、基性岩墙及玄武岩,而玄武岩浆的底侵,使“年轻的”基性下地壳发生重熔,形成了大量的花岗岩(A型为主)。而近几年另一个观点逐渐兴起,认为这一时期的岩浆活动是二叠纪塔里木地幔柱作用(Zhou *et al.*, 2004, 2009; Zhang *et al.*, 2008, 2010a, b; Zhang and Zou, 2013a, b; Pirajno *et al.*, 2008, 2009; Borisenko *et al.*, 2006; Mao *et al.*, 2008; Polyakov *et al.*, 2008; Tian *et al.*, 2010),塔里木及中亚造山带两个地区共同构造了一个面积达到50万

平方千米的大火成岩省,形成两个重要岩浆活动峰期,分别是290Ma和275Ma。最近笔者对中亚造山带西缘的二叠纪尼勒克火山岩进行了较系统的岩石学、岩石化学和同位素地球化学研究,旨在揭示尼勒克火山岩的成岩机制和构造背景,为探讨二叠纪中亚造山带岩浆岩的地幔源区及与塔里木大火成岩省的成因关系提供科学依据。

2 区域地质概况

尼勒克火山岩位于伊犁盆地北缘阿吾拉勒山西段。该地区的地质构造与矿产等基础地质研究程度较高,二叠纪地层在该区分布面积最广,地层出露齐全,接触关系清楚,全部五个组的层型剖面均在该区内,是西天山研究二叠纪地层不可多得的经典地区(图1)。下统主要为一套陆相火山熔岩、火山碎屑岩,夹陆源碎屑岩;中统岩性杂,下部为陆源碎屑岩夹少量碳酸盐岩,中部为陆源碎屑岩、基性火山熔岩及火山碎屑岩,上部为陆源碎屑岩夹碳酸盐岩,局部偶夹煤线;上统主要为陆源粗碎屑岩。尼勒克二叠纪火山岩主要产在早二叠世乌郎组和中二叠世哈米斯特组中,出露于尼勒克县幅中

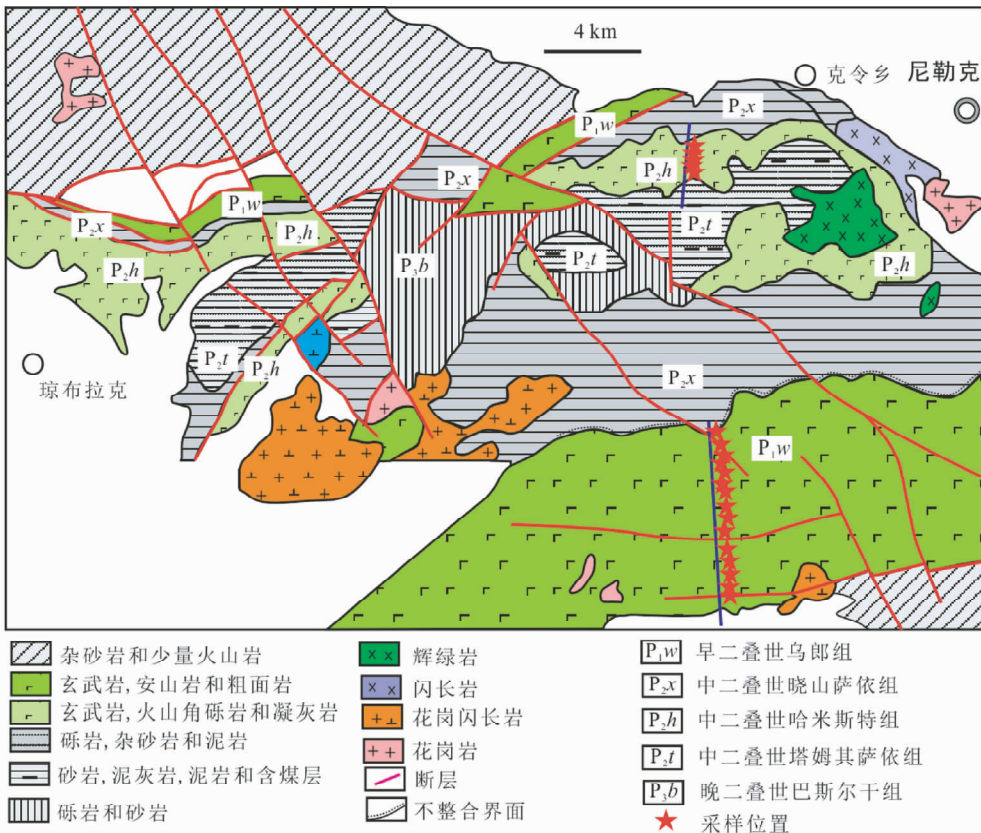


图1 新疆尼勒克地区地质图

Fig. 1 Geological map of Nileke, Xinjiang

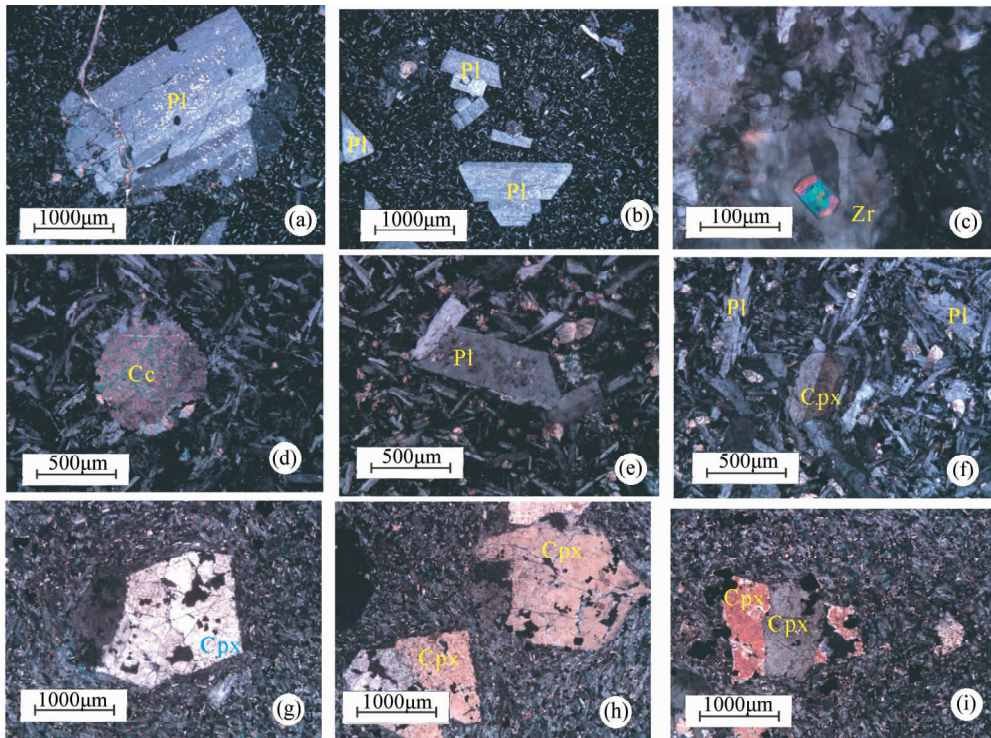


图2 尼勒克二叠纪火山岩显微岩相学特征

(a, b, e)-玄武岩中板状斜长石(Pl)斑晶;(c)-玄武岩中的锆石(Zr);(d)-玄武岩中的气孔被方解石(Cc)充填;(f)-玄武岩中斜长石与单斜辉石(Cpx)共生;(g-i)-玄武岩中自形半自形单斜辉石斑晶

Fig. 2 Microphotographs showing petrologic characteristics of the Nileke Permian volcanic rocks

(a, b, e)-tabular plagioclase phenocrysts of basalt; (c)-zircon of basalt; (d)-blowhole filled with calcites of basalt; (f)-clinopyroxenes together with plagioclases of basalt; (g-i)-euhedral/semi-euhedral clinopyroxene phenocrysts of basalt

部的翁格尔阔拉加勒-罗热萨依和尼勒克县幅南部、喇嘛昭幅北部的喀纳特巴依萨依-哈木巴尔汗巴斯陶,琼布拉克幅中部的琼布拉克-阿阔普乔克和南部的巴亚勒什特阔拉,总体呈近东西向或北东向展布,东、西两个方向延伸至区外,测区内出露面积264km²,哈密斯特组火山岩厚近200m,乌郎组火山岩厚度超过2600m。

乌郎组火山岩相类型较多,有涌流相、喷溢相、碎屑流相、空落相、爆溢相、次火山岩相、火山通道相、喷发-沉积相。哈密斯特组火山岩相,主要为喷溢相、碎屑流相和喷发-沉积相。主要岩石类型有:玄武岩、安山岩、粗面岩、流纹岩、熔结凝灰岩、火山角砾岩等。

(1) 熔岩类

玄武岩:包括橄榄玄武岩、拉斑玄武岩。在乌郎喷发旋回和哈密斯特喷发旋回中均有出露。新鲜岩石呈黑色、灰黑色,风化后为灰绿色,主要矿物成分为斜长石、辉石、橄榄石等。岩石具斑状结构,杏仁构造。斜长石构成斑晶。基质由斜长石、辉石、磁铁矿等组成(图2)。岩石蛇纹石化。安山岩:包括粗安岩、安山岩、安山玢岩。在乌郎喷发旋回广泛见及。岩石为灰绿色、紫红色,主要矿物成分为斜长石、普通角闪石、磁铁矿等。岩石具斑状结构、基质玻晶交织结构,杏仁状构造。斜长石和普通角闪石构成斑晶。基质由斜长石、磁铁矿等组成。岩石绿泥石化较普遍。粗面岩:在乌郎喷发旋

回广泛见及。颜色为紫红、紫灰色,主要矿物成分为斜长石、辉石、磁铁矿等。岩石具斑状结构、基质玻晶交织结构,杏仁状构造。斜长石和辉石构成斑晶。基质由斜长石、磁铁矿等组成。流纹岩:在乌郎喷发旋回出露。颜色为灰色、灰紫色,岩石具斑状结构、基质霏细-隐晶结构,杏仁状构造。歪长石、斜长石组成斑晶,基质为隐晶质。副矿物有磁铁矿、锆石、磷灰石等。

(2) 火山碎屑岩类

熔结凝灰岩:属火山灰流相产物,在乌郎旋回和哈密斯特旋回中均有出露。岩石一般呈灰紫、浅紫红色,具熔结凝灰结构、块状构造。不同岩石中有强熔结和弱熔结之分,碎屑组分由晶屑、岩屑、玻屑组成。常见岩性有流纹质熔结凝灰岩、粗安质熔结凝灰岩和晶屑-玻屑熔结凝灰岩,过渡岩石类型有熔结角砾凝灰岩。火山角砾岩:在乌郎旋回和哈密斯特旋回中均有出露。岩石一般呈灰紫、浅紫红色,具火山角砾结构,无定向构造。角砾呈棱角状,角砾60%,砾径2~12mm,成分为安山岩;岩屑16%,棱角状,成分为安山岩;晶屑3%,主要由斜长石和辉石组成;玻屑、火山尘已脱玻化。

3 分析方法

岩石的主量元素、微量元素在中国科学院广州地球化学

表1 二叠纪尼勒克火山岩的主量(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析数据表Table 1 Major element (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) compositions of the Permian Nileke volcanic rocks

样品号	WT03-1	WT03-2	WT03-3	WT03-4	WT03-5	WT03-6	WT03-7	WT04-2	WT04-5	WT04-7
岩性	哈米斯特组玄武岩									
SiO ₂	47.72	51.58	51.71	49.87	51.36	51.56	51.79	62.91	51.11	51.18
TiO ₂	1.48	1.50	1.56	1.51	1.55	1.55	1.55	0.77	1.57	1.53
Al ₂ O ₃	15.56	15.20	15.85	15.63	15.76	15.95	15.72	16.87	15.81	15.66
Fe ₂ O ₃	9.71	10.49	10.41	10.21	10.62	10.75	10.58	5.45	10.70	10.35
MnO	0.21	0.12	0.23	0.22	0.19	0.18	0.15	0.02	0.14	0.14
CaO	9.30	6.89	7.77	8.23	7.61	8.05	7.18	5.25	6.99	7.95
MgO	3.97	4.23	4.05	3.99	4.17	3.88	4.11	1.94	3.91	3.92
K ₂ O	3.21	3.91	3.10	3.11	2.94	2.81	3.39	1.41	3.73	3.48
Na ₂ O	2.97	3.20	3.36	3.49	3.60	3.45	3.45	4.24	3.35	3.22
P ₂ O ₅	0.53	0.60	0.66	0.63	0.65	0.64	0.64	0.33	0.65	0.65
LOI	5.47	2.18	1.15	3.02	1.38	1.02	1.30	0.69	1.88	1.78
Total	100.12	99.90	99.84	99.92	99.83	99.84	99.85	99.87	99.85	99.84
Mg [#]	57	57	56	56	56	54	56	54	55	55
La	30.92	33.71	40.09	39.88	41.09	40.44	40.66	12.97	41.80	40.90
Ce	73.21	80.18	97.81	97.21	99.83	99.24	98.68	31.20	101.2	99.66
Pr	9.93	11.03	13.61	13.53	13.90	13.71	13.75	4.40	14.50	14.24
Nd	41.94	46.49	58.26	57.42	59.07	58.48	58.30	20.06	61.81	61.09
Sm	7.85	8.62	10.57	10.36	10.66	10.58	10.49	4.95	10.92	10.70
Eu	2.35	2.48	3.00	2.87	2.93	2.95	2.95	1.55	3.01	2.95
Gd	6.56	7.09	8.33	8.07	8.45	8.35	8.44	5.08	8.60	8.44
Tb	0.91	0.93	1.13	1.10	1.13	1.11	1.13	0.89	1.13	1.11
Dy	4.75	4.62	5.78	5.44	5.60	5.49	5.60	5.75	5.69	5.47
Ho	0.91	0.85	1.09	1.02	1.04	1.03	1.06	1.25	1.08	1.04
Er	2.50	2.29	3.00	2.81	2.82	2.81	2.90	3.56	2.91	2.80
Tm	0.37	0.34	0.45	0.42	0.43	0.42	0.44	0.53	0.42	0.40
Yb	2.28	2.06	2.79	2.56	2.59	2.56	2.64	3.39	2.69	2.59
Lu	0.34	0.31	0.42	0.38	0.40	0.40	0.39	0.54	0.40	0.39
Rb	116.5	170.6	81.14	58.96	63.49	61.55	89.53	50.35	85.79	79.55
Ga	20.43	20.89	20.72	19.52	20.70	20.12	19.90	17.84	20.27	21.26
V	227.5	230.1	227.0	222.7	222.6	219.1	219.9	28.52	225.9	223.5
Cr	116.2	127.0	78.84	77.63	75.56	62.97	67.76	28.86	69.99	71.20
Ni	66.32	58.77	38.96	33.88	35.99	35.80	37.09	2.62	37.25	36.84
Sc	23.14	22.56	23.06	21.99	22.52	21.69	22.17	17.54	22.15	21.94
Sr	1157	1627	1915	1992	1979	1904	1892	472	2330	1974
Ba	1153	937	1037	1077	977	1010	1115	286	1166	1099
Th	3.29	3.41	4.18	3.96	4.14	3.95	3.99	2.13	4.17	4.19
U	0.76	0.79	0.94	1.01	0.93	0.89	0.93	0.84	0.97	1.08
Ta	0.33	0.31	0.31	0.30	0.30	0.29	0.30	0.27	0.30	0.31
Nb	5.86	5.60	5.32	5.21	5.35	5.18	5.27	3.71	5.40	5.46
Zr	149.4	151.4	183.2	180.2	186.5	177.4	178.7	99.79	184.2	184.1
Hf	3.77	3.87	4.66	4.60	4.77	4.49	4.59	2.94	4.68	4.70
Y	23.73	23.61	29.52	27.46	27.96	27.41	28.07	31.71	27.64	26.58
样品号	WT04-21	WT09-1	WT09-2	WT09-3	WT09-5	WT09-6	WT09-7	WT010-1	WT010-2	WT010-3
岩性	乌郎组玄武岩									
SiO ₂	51.04	50.89	50.91	49.73	52.48	50.95	53.16	48.09	47.79	48.84
TiO ₂	1.53	1.31	1.29	1.40	1.35	1.25	1.25	1.24	1.27	1.62
Al ₂ O ₃	15.83	16.22	15.95	16.92	15.65	16.53	15.64	17.59	17.99	14.60
Fe ₂ O ₃	10.50	10.38	10.30	12.22	9.97	9.99	10.87	10.21	10.34	10.29
MnO	0.23	0.42	0.39	0.66	0.16	0.16	0.18	0.32	0.50	0.51
CaO	7.40	5.03	5.43	2.83	5.92	9.05	4.62	8.40	6.03	6.60
MgO	4.30	5.70	5.62	5.01	4.88	5.65	4.49	6.63	6.89	4.68
K ₂ O	3.59	1.92	1.70	1.47	0.90	1.26	0.89	1.59	2.43	1.49

续表 1

Continued Table 1

样品号	WT04-21	WT09-1	WT09-2	WT09-3	WT09-5	WT09-6	WT09-7	WT010-1	WT010-2	WT010-3
岩性	乌郎组玄武岩									
Na ₂ O	3.14	4.42	4.66	5.43	5.44	2.60	5.90	2.67	3.00	3.39
P ₂ O ₅	0.65	0.56	0.56	0.60	0.60	0.22	0.54	0.21	0.22	0.64
LOI	1.63	3.09	3.11	3.66	2.57	2.21	2.34	2.96	3.48	7.72
Total	99.85	99.92	99.92	99.94	99.90	99.88	99.88	99.91	99.93	100.38
Mg [#]	57	64	64	57	62	65	58	68	69	60
La	41.59	29.80	27.71	27.88	30.58	14.51	31.90	6.94	5.51	32.45
Ce	101.5	65.12	63.25	65.56	69.31	33.35	68.31	17.75	14.24	71.23
Pr	14.48	8.51	8.31	8.65	9.04	4.76	8.77	2.70	2.26	9.45
Nd	61.81	34.04	34.00	35.01	37.26	21.04	34.38	12.94	11.38	38.52
Sm	10.86	6.55	6.52	6.92	7.47	4.98	6.41	3.52	3.36	7.26
Eu	3.02	1.73	1.78	1.72	2.11	1.70	1.78	1.24	1.25	1.99
Gd	8.42	5.94	5.89	6.18	6.74	5.05	5.84	3.66	3.60	6.60
Tb	1.13	0.88	0.88	0.92	0.97	0.88	0.88	0.68	0.68	0.99
Dy	5.65	5.02	4.92	5.25	5.51	5.53	4.94	4.31	4.38	5.54
Ho	1.05	0.99	0.99	1.05	1.10	1.19	0.99	0.91	0.92	1.13
Er	2.86	2.78	2.70	2.86	3.00	3.27	2.74	2.44	2.55	3.06
Tm	0.42	0.40	0.40	0.42	0.44	0.50	0.39	0.38	0.39	0.43
Yb	2.69	2.52	2.47	2.62	2.78	3.17	2.52	2.31	2.42	2.82
Lu	0.39	0.40	0.38	0.40	0.43	0.49	0.37	0.36	0.37	0.42
Rb	75.06	70.66	62.85	53.85	30.22	40.00	28.35	86.44	197.1	72.51
Ga	20.86	18.08	19.20	28.40	18.65	17.53	18.40	17.32	17.11	17.67
V	213.4	221.9	217.5	225.9	228.1	201.3	209.3	253.9	249.2	219.6
Cr	68.33	96.69	91.10	104.3	68.20	110.5	54.85	164.1	169.6	70.99
Ni	34.40	42.38	38.80	43.13	26.22	86.40	31.79	71.56	70.06	18.66
Sc	21.64	27.73	27.23	28.32	27.93	29.30	25.53	34.32	34.30	26.14
Sr	2131	451.7	351.8	252.1	311.3	292.6	232.7	394.4	462.1	96.50
Ba	1173	492.6	496.8	507.9	297.9	271.4	183.1	388.8	599.5	184.7
Th	4.22	2.63	2.57	2.77	3.25	2.75	2.93	0.70	0.70	3.70
U	0.93	0.81	0.78	0.92	1.03	0.85	1.00	0.24	0.27	0.99
Ta	0.31	0.56	0.54	0.59	0.60	0.34	0.55	0.19	0.19	0.58
Nb	5.34	9.40	9.24	10.00	10.13	4.58	9.15	2.44	2.51	9.44
Zr	181.8	211.6	209.2	225.7	231.9	198.2	204.7	96.71	98.82	220.4
Hf	4.65	4.78	4.63	5.05	5.17	4.54	4.52	2.47	2.51	5.15
Y	27.19	25.32	25.01	26.43	28.32	28.90	25.27	23.42	23.87	28.18
样品号	WT010-6	WT010-7	WT011-1	WT011-2	WT011-3	ZK03	WT012-1	WT012-2-1	WT012-2-2	
岩性	乌郎组玄武岩									
SiO ₂	67.42	67.92	54.93	57.67	50.74	54.91	47.45	54.14	56.47	
TiO ₂	0.44	0.43	1.06	1.16	1.18	1.06	1.98	1.20	2.04	
Al ₂ O ₃	15.77	15.55	14.43	14.58	15.83	15.28	18.15	16.63	14.66	
Fe ₂ O ₃	3.75	3.86	10.74	9.87	10.99	9.79	12.17	9.81	8.89	
MnO	0.11	0.09	0.54	0.30	0.63	0.48	1.32	0.70	0.35	
CaO	2.84	1.58	3.63	5.34	4.79	5.32	2.75	3.08	5.89	
MgO	1.02	1.06	4.74	2.81	5.34	3.44	5.97	2.45	3.04	
K ₂ O	3.37	3.45	3.75	3.63	3.57	3.93	0.32	4.93	3.27	
Na ₂ O	3.91	4.67	2.93	2.69	3.25	2.51	5.20	3.57	2.54	
P ₂ O ₅	0.18	0.18	0.37	0.48	0.42	0.37	0.31	0.50	0.92	
LOI	1.08	1.09	2.79	1.33	3.15	2.85	4.32	2.90	1.82	
Total	99.88	99.88	99.91	99.86	99.91	99.95	99.94	99.90	99.89	
Mg [#]	47	47	59	48	62	54	62	45	53	
La	24.72	17.64	12.17	20.79	15.57	16.21	6.96	18.72	21.60	
Ce	49.61	37.15	30.21	49.02	37.79	36.77	20.67	44.21	52.62	
Pr	5.98	4.78	4.31	6.65	5.27	5.01	3.48	5.91	7.67	

续表 1

Continued Table 1

样品号	WT010-6	WT010-7	WT011-1	WT011-2	WT011-3	ZK03	WT012-1	WT012-2-1	WT012-2-2
岩性	乌郎组玄武岩								
Nd	22.66	19.03	19.26	28.94	23.60	21.73	17.22	25.41	35.25
Sm	4.08	3.85	4.82	6.78	5.77	5.10	5.05	6.11	8.27
Eu	1.17	1.01	1.02	1.55	1.25	1.24	1.33	1.24	4.91
Gd	3.81	3.56	4.83	6.58	5.67	5.01	5.19	6.12	8.31
Tb	0.57	0.56	0.85	1.13	0.98	0.86	1.00	1.10	1.36
Dy	3.30	3.41	5.43	7.07	6.23	5.25	6.39	6.99	8.17
Ho	0.71	0.74	1.17	1.48	1.32	1.12	1.35	1.52	1.72
Er	2.08	2.14	3.35	4.15	3.70	3.09	3.62	4.22	4.65
Tm	0.33	0.34	0.51	0.65	0.59	0.48	0.52	0.67	0.67
Yb	2.25	2.33	3.28	4.07	3.68	3.01	3.22	4.13	4.21
Lu	0.38	0.37	0.50	0.61	0.56	0.47	0.49	0.62	0.64
Rb	103.4	108.4	188.2	188.7	191.4	186.0	13.70	232.8	85.68
Ga	15.24	14.54	14.51	16.68	16.34	16.18	25.28	19.53	17.45
V	42.48	45.59	244.0	203.9	268.1	267.2	234.5	214.8	99.53
Cr	28.37	36.90	74.77	48.06	81.26	86.08	315.70	51.42	24.52
Ni	2.25	2.59	22.00	13.64	25.22	21.60	211.7	12.65	5.09
Sc	10.34	9.97	30.77	29.55	32.97	32.54	36.02	30.07	27.71
Sr	302.6	147.5	234.9	289.4	310.4	285.1	337.7	294.7	365.8
Ba	513.9	498.6	500.8	428.8	499.8	506.8	143.6	1177	1831
Th	6.35	4.74	8.47	11.00	9.66	8.45	0.47	11.51	5.91
U	1.18	1.21	2.47	3.30	3.08	2.66	0.34	3.36	1.80
Ta	0.45	0.42	0.44	0.57	0.49	0.45	0.33	0.60	0.52
Nb	5.35	5.22	6.16	8.06	6.94	6.26	4.32	8.28	6.55
Zr	128.1	127.9	176.0	229.9	200.3	177.4	149.1	242.4	207.5
Hf	3.47	3.48	4.84	6.28	5.41	4.82	3.49	6.47	5.21
Y	19.14	20.05	31.82	39.12	35.30	29.94	36.48	42.73	41.72

表 2 新疆西天山尼勒克火山岩的 Sm-Nd 同位素分析数据表

Table 2 Sm-Nd isotopic compositions of the Permian Nileke volcanic rocks

岩性	样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}$	$\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}$ (2σ)	$\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_i$	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}$	$\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}$ (2σ)	$\left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
哈米斯特组	wt03-2	170.6	1627	0.3033	0.70560(5)	0.70439	8.62	46.49	0.112097	0.512692(9)	0.512487	4.08
	wt09-6	40	292.6	0.3954	0.70543(3)	0.70385	4.98	21.04	0.142965	0.512846(3)	0.512584	5.98
	wt10-1	86.44	394.4	0.6341	0.70680(4)	0.70427	3.52	12.94	0.164465	0.512893(4)	0.512592	6.13
乌郎组	wt10-2	197.1	462.1	1.2343	0.70944(2)	0.70452	3.36	11.38	0.17851	0.512888(4)	0.512561	5.53
	wt10-3	72.51	96.5	2.1751	0.71307(5)	0.70440	7.26	38.52	0.113945	0.512681(9)	0.512472	3.80
	wt10-6	103.4	302.6	0.9887	0.70794(8)	0.70400	4.08	22.66	0.108855	0.512725(8)	0.512525	4.84
	wt11-2	188.7	289.4	1.8873	0.71184(6)	0.70432	6.78	28.94	0.141641	0.512805(4)	0.512545	5.23
	wt11-3	191.4	310.4	1.7834	0.70429(5)	0.69718	5.77	23.60	0.147816	0.512813(6)	0.512542	5.17
	wt12-1	13.7	337.7	0.1173	0.70524(8)	0.70477	5.05	17.22	0.177308	0.512951(5)	0.512626	6.80

Note: Isotopic results normalized to $^{86}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.1194$ and $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$. NBS 987 average Sr standard = 0.71025 ± 1 and Jndi-1 Nd standard = 0.51212 ± 1.1 in this study. Initial isotope ratios and epsilon values calculated at 280Ma, using present day bulk Earth-CHUR values of $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0.07809$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7045$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.19667$, and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$

研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。样品处理时尽量选取新鲜的样品,去除风化面,手工破碎至 1~5mm,然后依次用 5% 硝酸和 5% 盐酸在超声波清洗仪中清洗,以去除杏仁体及碳酸盐化的影响,烘干后粉碎至 200 目用于主量元素、微量元素和同位素分析。岩石样品的主量元素分析是用 Rigaku 100e 型 X 射线荧光光谱仪 (XRF) 分析,分析精度优于 1%~5%,具体的流程见 Li *et al.* (2009)。微量元素分

析则采用 Perkin-Elmer Sciex Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS),称取约 40mg 样品粉末于 bomb 中,加入 HNO_3 和 HF 溶样。内部标准溶液采用元素 Rh 来监控计数信号漂移。使用 USGS 标准 W-2 和 G-2 及国内标准 GSR-I、GSR-2 和 GSR-3 来校正所测样品的元素含量。分析精度为 2%~5%,具体的流程见刘颖等 (1996)。同位素比值的测定在宜昌地质矿产研究所完成,采用多接收电感耦合等离子体

质谱 (MC-ICPMS) 分析。Sr 同位素以国际标准 NBS987 和实验室标准 Sr-GIG 进行监控, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 标准化, 详细分析方法见韦刚健等 (2002)。Nd 同位素以国际标准 JNdi-1 和实验室标准 Nd-GIG 进行监控, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 标准化, 详见梁细荣等 (2003)。Sr、Nd 同位素分析精度好于 0.002%。

4 地球化学特征

4.1 主量元素

野外共采集哈密斯特组火山岩 11 件, 乌郎组火山岩 18 件, 其全岩主量、微量元素分析结果见表 1, Sm-Nd 同位素分析结果见表 2。

哈密斯特组火山岩的主量元素有较小的变化范围, 在全碱- SiO_2 (TAS) 图上 (图 3a), 投影点多数落在碱性粗面玄武岩和玄武质粗面安山岩的范围, WT04-2 样品落入亚碱性英安岩范围; 乌郎组火山岩则跨骑在碱性岩与亚碱性岩之间, 样品多数集中在 (粗面) 玄武岩到 (粗岩) 安山岩的范围, 两个样品落入流纹岩范围。考虑到蚀变过程中 K、Na 等碱金属元素较活泼, 用 TAS 图解判别岩石类型可能会产生偏差, 因此, 我们选择一些在蚀变过程中不活泼的元素 (Ti、Zr、Y、Nb) 来做进一步的判别。在 Zr/TiO_2 -Nb/Y 判别图上 (图 3b), 样品均落入亚碱性岩范围。

哈密斯特组火山岩 SiO_2 含量主要集中在 47.72% ~ 51.71%, 具有低 TiO_2 (1.48% ~ 1.57%), 高 K_2O (2.81% ~ 3.91%), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值 (0.81 ~ 1.22) 和 Al_2O_3 (15.20% ~ 15.95%) 的特征 (图 3a、图 4 及表 1), 在 K_2O - SiO_2 图上 (图 3c), 多数投影点落入典型的钾玄岩系列范围内, 除一个酸性岩 WT04-2 落入钙碱性系列范围; 在主量元素哈克图解中 (图 4), 除却样品 WT04-2, 哈密斯特组火山岩基性端元随着 SiO_2 含量升高 CaO 有明显降低以外, 其它元素数据较为集中没有太大变化, 反映出仅经历了弱的单斜辉石或斜长石的分离结晶作用。乌郎组火山岩相对于哈密斯特组火山岩有着较大的变化范围 (图 3a、图 4), 在 K_2O - SiO_2 图上表现较为复杂 (图 3c), 基性火山岩介于高钾钙碱性与钙碱性系列之间, 中基性岩落入钾玄岩系列, 酸性岩则位于高钾钙碱性系列。乌郎组火山岩随着 SiO_2 含量升高, 多数样品的 MgO、 TiO_2 、CaO、 Al_2O_3 、FeO、MnO、 P_2O_5 含量均呈明显的下降趋势, 表现出单斜辉石、磷灰石和钛铁矿等矿物的分离结晶作用。无论是哈密斯特组火山岩还是乌郎组火山岩, 其酸性端元与基性端元之间存在着 >10% 的 SiO_2 含量的间断 (图 3a), 且它们在 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 和 Sr 等与 SiO_2 的演化关系上呈现不连续的分布趋势 (图 4), 反映出两组火山岩分别存在着几组不同的岩浆演化系列。

4.2 稀土、微量元素

哈密斯特组和乌郎组火山岩具有相似的稀土元素组成,

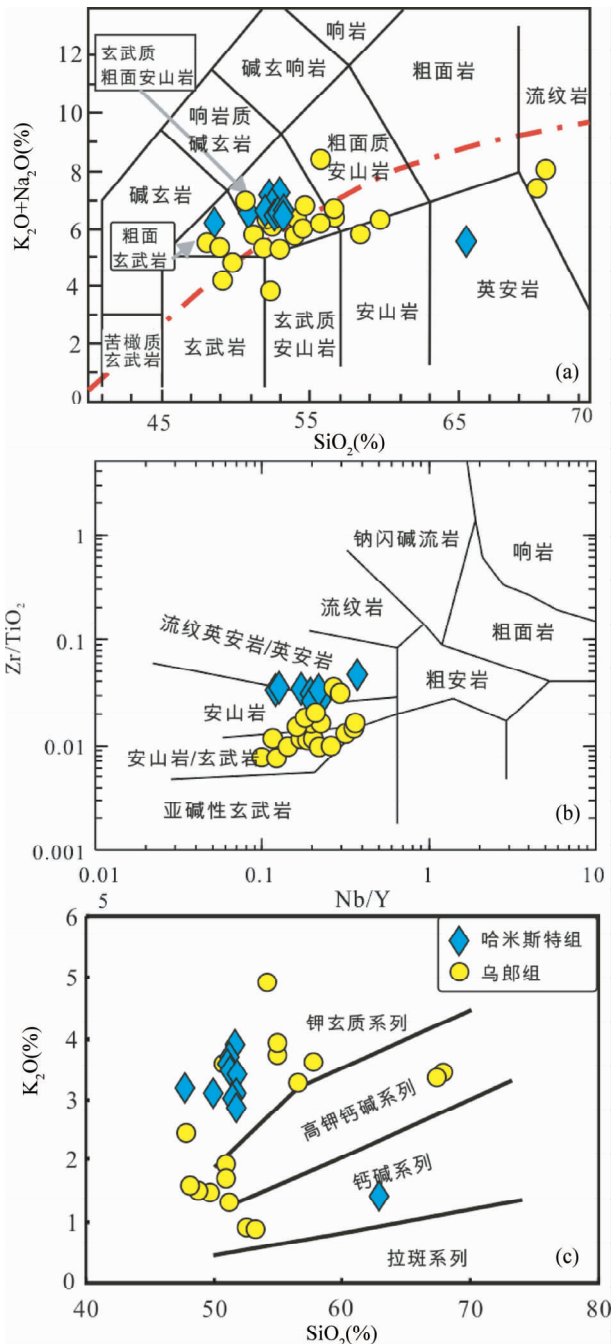


图 3 二叠纪尼勒克火山岩岩石分类判别图

Fig. 3 Classification of types and series of the Nileke Permian volcanic rocks

大多数表现出轻稀土元素富集, 哈密斯特组稀土总量与轻、重稀土分异富集程度明显高于乌郎组 (图 5a, b)。哈密斯特组稀土总量集中在 $184.8 \times 10^{-6} \sim 256.2 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 9.7 \sim 11.7$, 酸性样品 WT04-2 有着这组最低的稀土总量 (96.1×10^{-6}) 与 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值 (2.7) (图 5a), 没有明显 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.91 \sim 0.97$); 乌郎组 $\Sigma\text{REE} = 53.1 \times 10^{-6} \sim 181.9 \times 10^{-6}$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.6 \sim 9.1$, 从 Eu 正异常到 Eu 负异

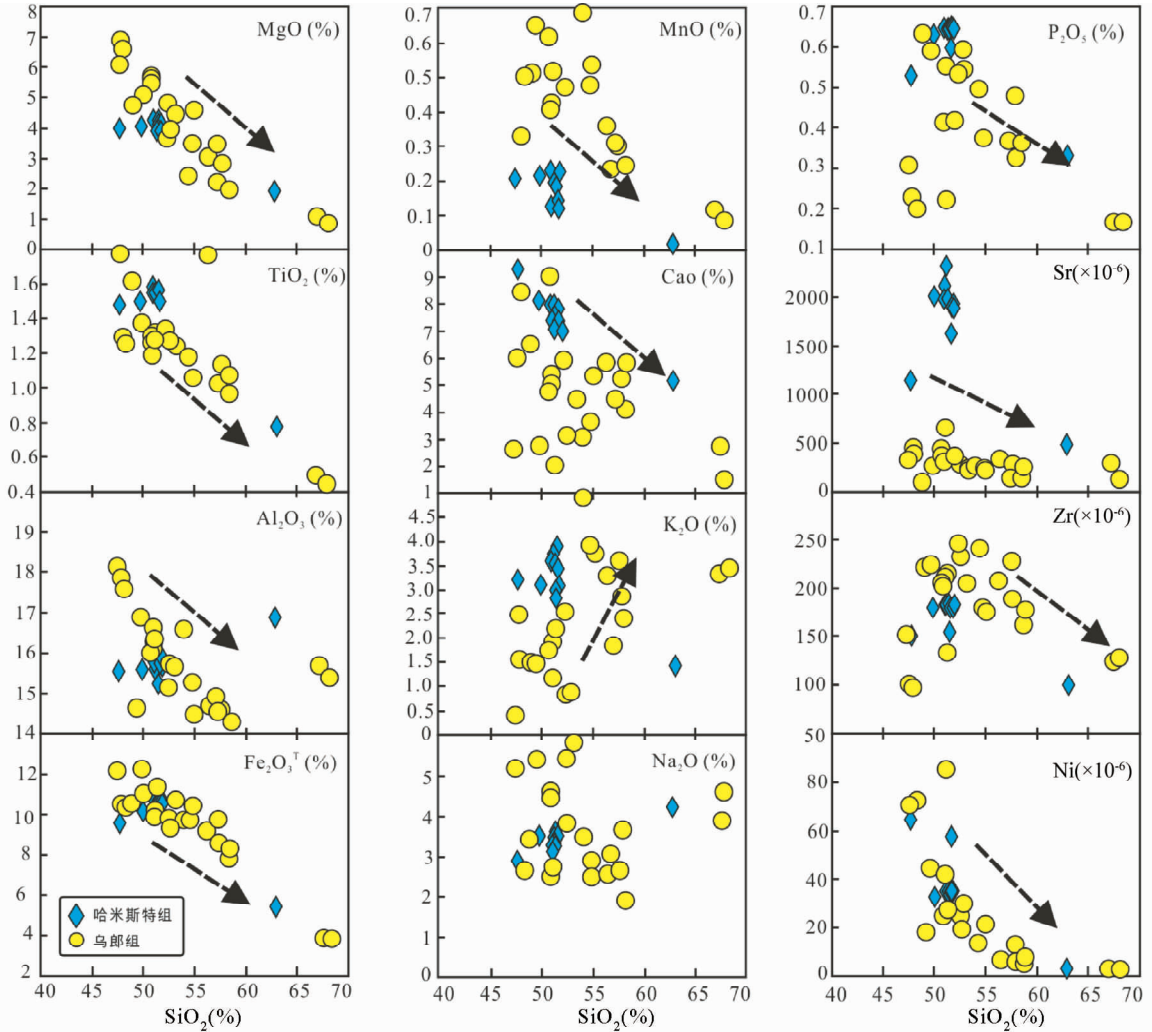


图4 二叠纪尼勒克火山岩岩石哈克图

Fig.4 Harker diagram of the Nileke Permian volcanic rocks

常($Eu/Eu^* = 0.61 \sim 1.79$),表明存在斜长石的结晶分异和堆晶作用(图5a和5b),其中三个样品WT010-1,WT010-2和WT012-1稀土总量明显低于其它样品,在稀土配分图中(图5b)展现出近似的配分曲线($\Sigma REE = 53.3 \times 10^{-6} \sim 76.5 \times 10^{-6}$; $(La/Yb)_N = 1.6 \sim 2.2$; $Eu/Eu^* = 0.79 \sim 1.09$),类似富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)。

在微量元素原始地幔标准化图中(图5c, d),哈米斯特组火山岩大离子亲石元素Rb、Ba、Th、K和Sr富集($1157 \times 10^{-6} \sim 2330 \times 10^{-6}$, WT04-2 = 472×10^{-6}),高场强元素Nb、Ta、Zr、Hf、Ti和重稀土亏损,强烈的Nb-Ta相对于La亏损($Nb/La = 0.13 \sim 0.19$, WT04-2 = 0.28)暗示岩浆曾遭受强烈地壳混染或俯冲流体交代作用;乌郎组火山岩的蛛网图类似于哈米斯特组火山岩,多数表现出富集大离子亲石元素和亏损高场强元素,但Sr元素的含量($96 \times 10^{-6} \sim 462 \times 10^{-6}$)与Nb-Ta的亏损程度($Nb/La = 0.22 \sim 0.62$)明显低于哈米斯特组火山岩。

4.3 Sr-Nd 同位素组成

西天山二叠纪尼勒克火山岩Sr-Nd同位素组成见图6。从图中可以看出,一个哈米斯特火山岩和八个乌郎组火山岩有着类似的Sr-Nd同位素组成,均具有高的Nd初始值和低的Sr初始值($\epsilon_{Nd}(t) = 3.8 \sim 6.8$; $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = 0.69718 \sim 0.70477$),数据投影到洋岛玄武岩(OIB)的上部,接近洋中脊玄武岩(MORB),比西天山其它地区玄武岩的Sr-Nd同位素组成更加亏损,表明它们来自同位素组成长期亏损的地幔源区。

5 讨论

5.1 岩石成因

下火山岩乌郎组的岩石类型、主量和微量元素有着相对较宽的变化范围,岩石从玄武岩到安山岩,从钙碱性到钾玄

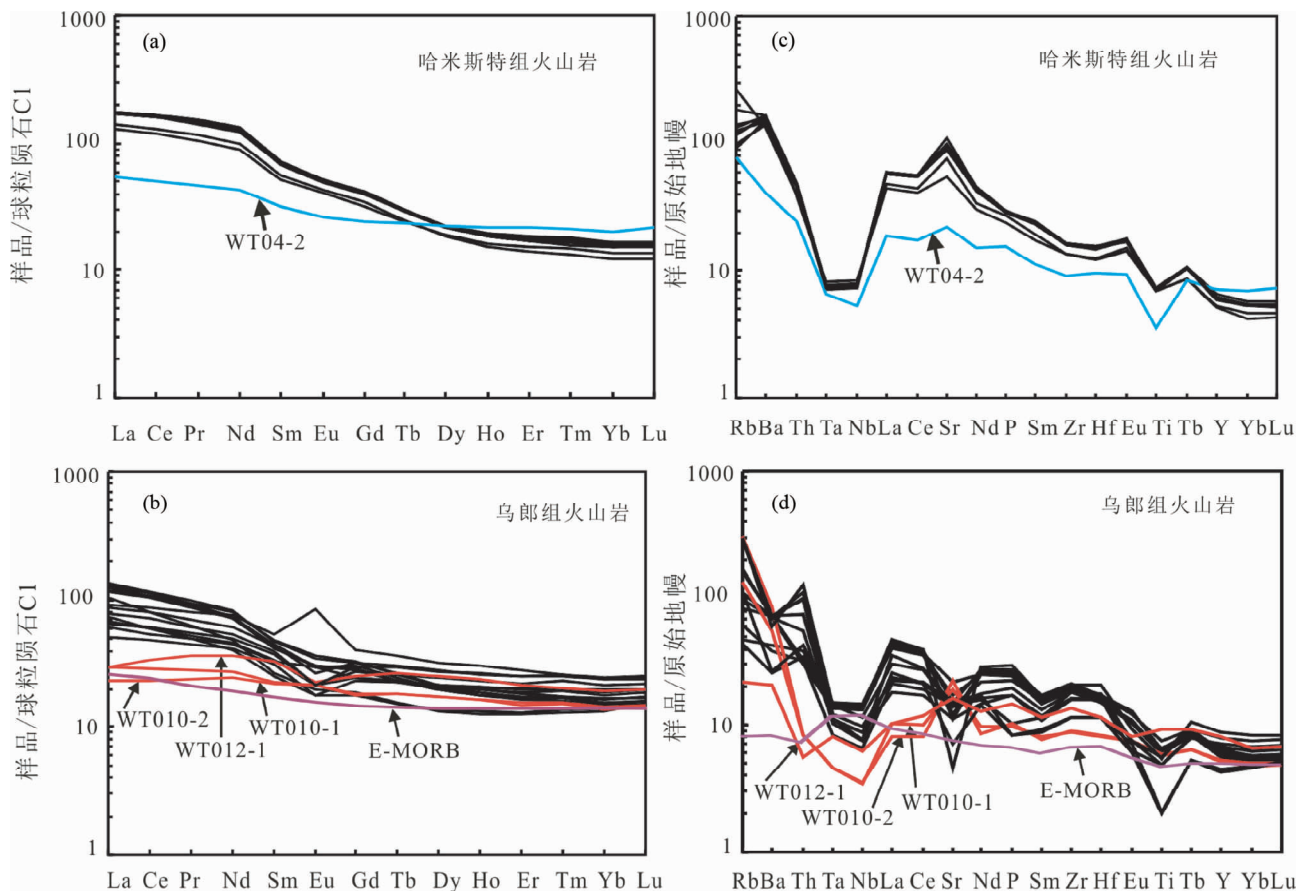


图5 二叠纪尼勒克火山岩稀土、微量元素模式配分图

Fig.5 REE distribution patterns and trace element spider diagrams of the Nileke Permian volcanic rocks

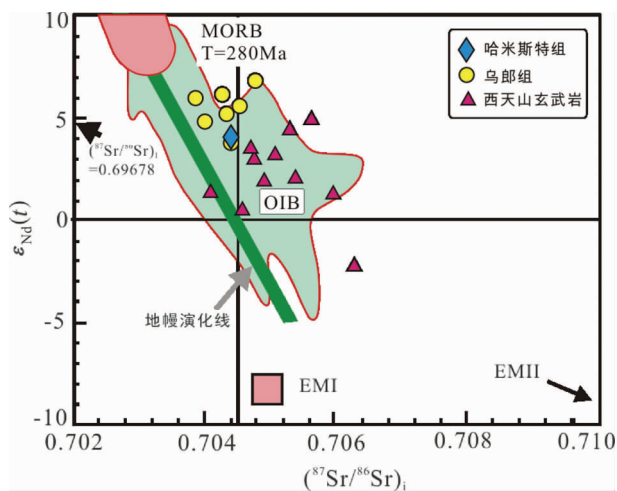


图6 二叠纪尼勒克火山岩 Sr-Nd 同位素组成 (MORB、OIB、EMI 和 EMII 地幔端员据 Zindler and Hart, 1986)

Fig.6 Sr-Nd isotopic composition diagram of the Nileke Permian volcanic rocks (after Zindler and Hart, 1986)

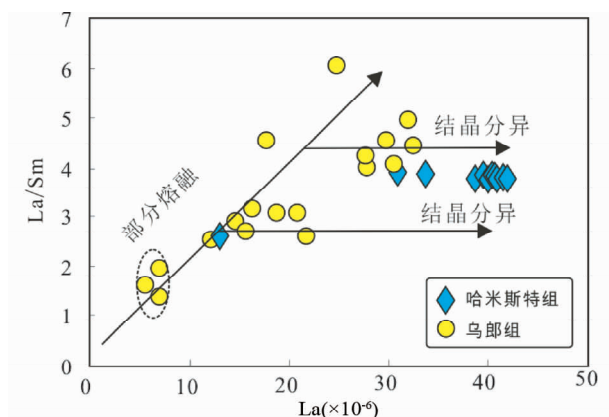


图7 尼勒克二叠纪火山岩 La 对 La/Sm 图

虚线圈中是三个类 E-MORB 样品: WT010-1, WT010-2 和 WT012-1

Fig.7 La vs. La/Sm of the Nileke Permian volcanic rocks

质(图 3a,b),Eu 从正异常到负异常(图 5a),La/Sm 比值随着 La 含量的升高而升高(图 7),是受到部分熔融程度与结

晶分异作用的控制。然而这些变化并不影响它们的同位素组成,它们有着相似的类 OIB 的亏损 Sr-Nd 同位素组成,指示它们来自相同的地幔源区,是不同批次岩浆产物。在乌郎组火山岩中,我们注意到有三个样品(WT010-1, WT010-2 和

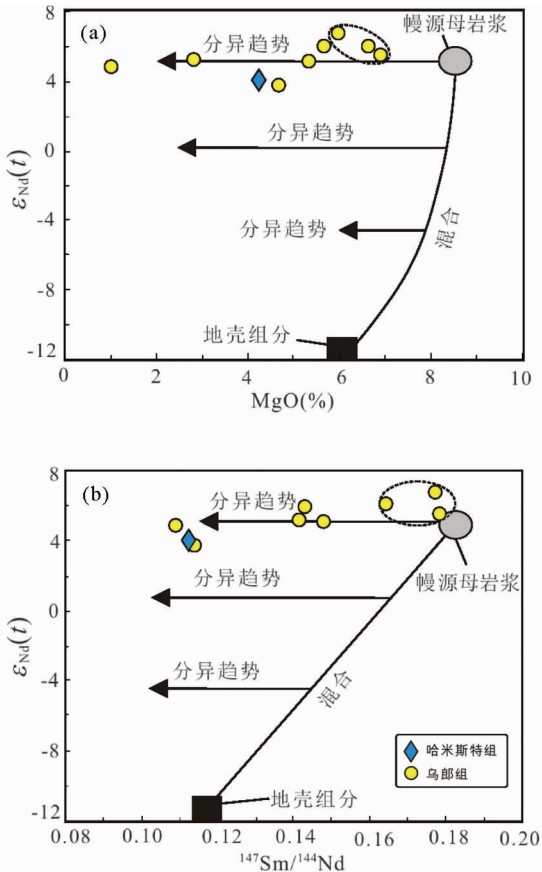


图8 尼勒克二叠纪火山岩 MgO 和 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 对 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图

虚线圈中是三个类 E-MORB 样品: WT010-1, WT010-2 和 WT012-1

Fig. 8 MgO and $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ vs. $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram of the Nileke Permian volcanic rocks

WT012-1)有所不同,这三个样品有最低 SiO_2 含量(47.5% ~ 48.1%)、最高 MgO 含量(5.97% ~ 6.89%)、低 Sr ($< 500 \times 10^{-6}$)、稀土($50 \times 10^{-6} < \sum\text{REE} < 80 \times 10^{-6}$)和 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值(1.6 ~ 2.2),相对较高的 Nb/La 比值(> 0.35),类似富集型洋中脊(E-MORB)特征。这三个样品低硅高镁,较高 Cr、Ni 含量(分别是 164.1×10^{-6} ~ 315.7×10^{-6} 和 70.1×10^{-6} ~ 211.7×10^{-6})和 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值,以及没有明显 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.79 \sim 1.09$),显示这三个样品最接近原始岩浆(图8),没有经历强烈的结晶分异作用和堆晶作用。与下火山岩相反,上火山岩哈密斯特组主量和微量元素有着窄的变化范围,有着相似的配分模式,反映它们是来自同一批次岩浆,没有强烈的结晶分异作用。哈密斯特火山岩具有典型的钾玄岩特征,高 K_2O (2.81% ~ 3.91%),高 Sr ($> 1000 \times 10^{-6}$)、稀土($\sum\text{REE} > 200 \times 10^{-6}$)和 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 比值(9.7 ~ 11.7)。

图9是根据 Arth (1976) 批式熔融公式计算的尖晶石二辉橄榄岩熔融形成熔体的不相容元素 Zr/Sm, Hf/Sm 和 Nb/

Y 比值,来自华南的尖晶石二辉橄榄岩包体(Nu9607)假设为地幔源区。图中1%,5%和10%代表熔融程度,Zr/Sm, Hf/Sm 和 Nb/Y 比值随着部分熔融程度的降低而升高,同时图中也展示了含石榴石地幔橄榄岩元素比值的变化趋势。尼勒克火山岩的数据点都投到了岩石圈地幔尖晶石二辉橄榄岩熔融趋势线周围,乌郎组三个类 E-MORB 样品接近源区,显示有着高程度部分熔融($> 10\%$),类似拉张背景减压熔融形成的 E-MORB 玄武岩,其它样品随着比值升高反映熔融程度降低,哈密斯特组火山岩相对更靠近含石榴石地幔岩变化趋势线,暗示着其源区更深些。Dy/Yb 比值也是诊断源区特征的重要地球化学指标,如果部分熔融发生在含石榴石地幔源区,其熔体的 Dy/Yb > 2.5 ; 如果熔融作用发生在尖晶石地幔源区,其熔体的 Dy/Yb < 1.5 (Jiang *et al.*, 2009)。上火山岩哈密斯特组的 Dy/Yb 变化范围为 2.07 ~ 2.24 (WT04-2 = 1.7),下火山岩乌郎组变化范围为 1.46 ~ 2.0,验证了两组火山岩均源自岩石圈地幔尖晶石二辉橄榄岩,哈密斯特组源区相对较深的结论。

尼勒克两组玄武质火山岩有着明显的 Nb-Ta 亏损,乌郎组 Nb/La 比值变化相对较大(0.22 ~ 0.62),哈密斯特组 Nb/La 比值低且稳定(大多 < 0.2),Nb-Ta 亏损既可解释为岩浆曾遭受强烈地壳混染,也可解释为源区受到俯冲流体交代作用。然而,二组火山岩随着 MgO 含量和 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值的升高,其 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值高且稳定(图8),表明岩浆未曾遭受明显的地壳混染,因此 Nb-Ta 亏损是其源区特征,暗示火山岩源自与俯冲作用有关的富钾和 LILE 交代地幔。尼勒克两组火山岩富集的微量元素特征与亏损的 Sr-Nd 同位素特征矛盾地并存,暗示着与俯冲相关的交代作用发生在近期,交代作用仅导致了微量元素的富集,但对需要时间积累的放射性 Sr-Nd 同位素并未产生影响,仍然保持着原有的亏损特征。

5.2 构造背景

尼勒克二叠纪玄武岩属于陆相,如在玄武岩夹层中出现陆相植物化石(宋志瑞等,2005)。因此,它们不可能形成于岛弧构造背景。另外,所有样品的 Ti/V 值均大于 20(图10),与岛弧玄武岩形成显著差异,和伸展背景下的玄武岩一致(如 MORB 及 BAB 等)。有多种情况可能出现板内伸展,如岩石圈拆沉、造山后板片拆沉、地幔柱引起的大陆裂解等。然而,从本质上说,地壳演化最终的一级地球动力学背景只有板块构造和地幔柱(Xu, 2001; Xu *et al.*, 2004, 2007, 2008)。乌郎组火山岩中三个样品类似 E-MORB 地球化学特征给了我们明确的构造提示,在早期研究中,E-MORB 又被称为 P-MORB 或“plume-ridge”。许多 E-MORB 与热点或地幔柱有着紧密的成因联系,例如冰岛(Schilling, 1973),还有一些 E-MORB 被认为是形成在地幔柱物质进入软流圈的通道(Schilling *et al.*, 1985)。因此我们认为尼勒克火山岩的形成与地幔柱的有着密切的成因联系。

西天山作为西伯利亚板块与塔里木板块俯冲、碰撞、拼

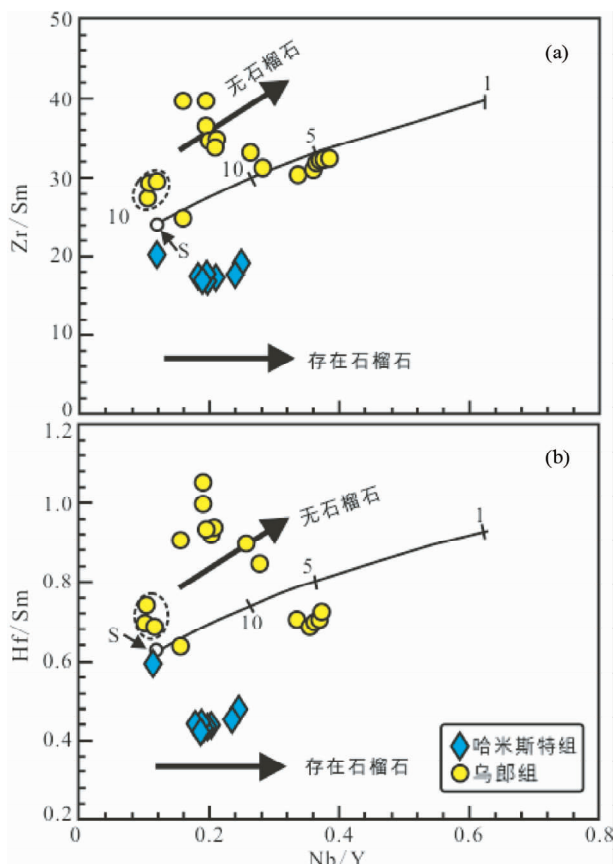


图9 尼勒克二叠纪火山岩 Nb/Y-Zr/Sm (a) 和 Nb/Y-Hf/Sm (b) 图

图中曲线是根据 Arth (1976) 批式熔融公式计算的尖晶石二辉橄榄岩不同程度部分熔融形成熔体不相容元素比值的演化趋势线, 来自华南的尖晶石二辉橄榄岩包体 (Nu9607) 假设为地幔源区 (S); 1%, 5% 和 10% 分别代表不同熔融程度; 虚线圈中是三个类 E-MORB 样品; WT010-1, WT010-2 和 WT012-1

Fig. 9 Nb/Y-Zr/Sm (a) and Nb/Y-Hf/Sm (b) diagram of the Nileke Permian volcanic rocks

合最终地带, 其构造环境存在不同看法, 特别是古亚洲洋最终关闭时间。有学者认为新疆北部在晚石炭世-二叠纪仍然可能还存在活动陆缘, 古亚洲洋南部的最终闭合的时间可能在三叠纪 (Xiao *et al.*, 2003; 肖文交等, 2006; Tang *et al.*, 2010, 2012; Zhang *et al.*, 2007)。但近年来发表的中亚西段蛇绿岩测年资料并不支持塔里木与天山是在三叠纪才拼合到一起的。另外, 早些时候认为西天山地区的蓝片岩及榴辉岩等高压变质岩形成时代在 220Ma 左右 (如 Zhang *et al.*, 2007), 但最新的研究表明, 220Ma 的年龄代表了一期区域性的热事件, 而高压变质岩的发生高压变质的时间在 320Ma 左右, 再次证明天山地区的板块俯冲碰撞不可能持续到三叠纪 (Gao *et al.*, 2009)。

中亚造山带二叠纪分布了大量具有板内玄武岩特征的基性岩类 (玄武岩、基性岩墙群和超镁铁-镁铁杂岩 (例如, 吴

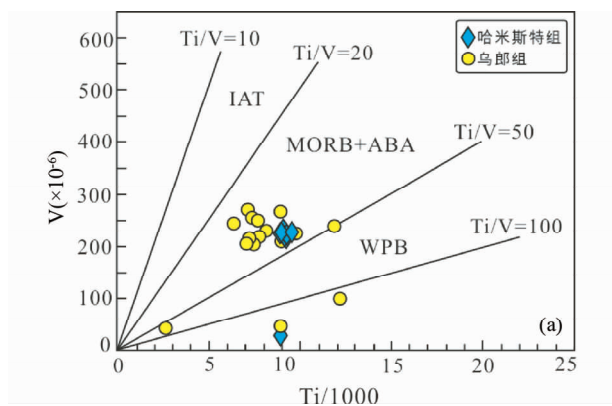


图10 尼勒克二叠纪火山岩 Ti/1000-V 图

Fig. 10 Ti/1000 vs. V diagram of the Nileke Permian volcanic rocks

华等, 2005; 李锦轶等, 2006), 在数量上远远大于花岗岩质岩石, 尤其是西天山地区, 二叠纪玄武岩总厚度在千米以上, 而在东天山的土哈盆地和三塘湖盆地, 也分布了大量的二叠纪玄武岩。在塔里木及中亚造山带西段, 前人提出的板片折沉模式可以很好地解释石炭纪晚期 (尤其是 320 ~ 290Ma) 大规模非造山花岗岩成因, 恰恰在这一时期缺少大规模的玄武岩 (王式洸等, 1994; 夏祖春等, 2005; Han *et al.*, 1997; Jahn, 2004)。这种情况和华南地区大规模中生代花岗岩相似 (含有少量的玄武岩及基性岩墙), 可能也和俯冲板片的折沉有关, 但无法解释二叠纪大规模的玄武岩形成。综合上述表明, 地幔柱模式可以很好解释塔里木及中亚造山带二叠纪大火成岩省。我们注意到这些玄武岩在地球化学特征上与塔里木同时代二叠纪玄武岩有显著差别 (Zhang *et al.*, 2010a), 可能反映了它们来自不同地幔源区, 即塔里木二叠纪玄武岩来自长期富集的岩石圈地幔, 而中亚造山带西段二叠纪玄武岩主要来自近期被交代的亏损岩石圈地幔 (张传林等, 2010; Zhang and Zou, 2013a)。

6 结论

(1) 尼勒克二叠纪火山岩位于伊犁盆地北缘阿吾拉勒山西段, 属于陆相二叠纪地层, 由中下统哈密斯特组和乌郎组火山岩组成, 岩石类型多样, 有玄武岩、安山岩、粗面岩、流纹岩等, 但基性岩为主, 出露面积大, 达到 264km², 哈密斯特组火山岩厚近 200m, 乌郎组火山岩厚度超过 2600m。

(2) 尼勒克火山岩, 地球化学特征复杂。上火山岩哈密斯特组火山岩具有典型的钾玄武岩特征, 高 K₂O (2.81% ~ 3.91%), Sr (> 1000 × 10⁻⁶), 稀土 (ΣREE > 200 × 10⁻⁶) 和 (La/Yb)_N 比值 (9.7 ~ 11.7), 低 Nb/La 比值 (大多 < 0.2)。下火山岩乌郎组火山岩可分为二组, 一组具最低 SiO₂, 最高 MgO, 较低 Sr (< 500 × 10⁻⁶), 稀土 (50 × 10⁻⁶ < ΣREE < 80 × 10⁻⁶) 和 (La/Yb)_N 比值 (1.6 ~ 2.2), 相对较高

的 Nb/La 比值 (>0.35), 类似富集型洋中脊 (E-MORB) 特征, 暗示其岩浆是浅部源区高程度部分熔融的产物; 另一组火山岩有着相对较大的变化, 总体特征介于哈米斯特组与第一组火山岩两者之间。

(3) 尼勒克火山岩有高度亏损的 Sr-Nd 同位素组成, 类似 MORB, 表明它们源自长期亏损的地幔源区。然而, 火山岩高度亏损的 Nb-Ta、分异且富集大离子亲石元素的特征暗示, 地幔源区受到近期俯冲带流体的交代作用, 并受部分熔融程度及结晶分异作用的控制, 是不同批次岩浆作用在不同演化阶段的产物。尼勒克大规模玄武质火山岩的形成可能由塔里木二叠纪地幔柱引发。

致谢 感谢广州地球化学研究所王焰研究员对本研究的指导; 感谢审稿人和编辑同志的建议和帮助。

References

Arth JG. 1976. Behavior of trace elements during magmatic processes; A summary of theoretical models and their applications. *Journal of Research of the US Geological Survey*, 4(1): 41–47

Borisenko AS, Sotnikov VI, Izokh AE, Polyakov GV and Obolensky AA. 2006. Permo-Triassic mineralization in Asia and its relation to plume magmatism. *Russian Geology and Geophysics*, 47: 166–182

Gao J, Long LL, Klemd R, Qian Q, Liu DY, Xiong XM, Su W, Liu W, Wang YT and Yang FQ. 2009. Tectonic evolution of the South Tianshan Orogen and adjacent regions, NW China; Geochemical and age constraints of granitoid rocks. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1221–1238

Han BF, Wang SG, Jahn BM, Hong DW, Kagami H and Sun YL. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from north Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138(3–4): 135–159

Jahn BM. 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 599–603

Jiang YH, Jiang SY, Dai BZ, Liao SY, Zhao KD and Ling HF. 2009. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Human Province, Southeast China; Implications for a continental arc to rifting. *Lithos*, 107(3–4): 185–204

Li JY, Song B, Wang KZ, Li YP, Sun GH and Qi DY. 2006. Permian mafic-ultramafic complexes on the southern margin of the Tu-Ha Basin, East Tianshan Mountains; Geological records of vertical crustal growth in Central Asia. *Acta Geologica Sinica*, 27(5): 424–446 (in Chinese with English abstract)

Li XH, Liu Y, Li QL, Guo CH and Chamberlain KR. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(4): 1525–2027

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)

Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552–558 (in Chinese with English abstract)

Mao JW, Pirajno F, Zhang ZH, Chai FM, Wu H, Chen SP, Cheng LS, Yang MJ and Zhang CQ. 2008. A review of the Cu-Ni sulphide deposits in the Chinese Tianshan and Altay orogens (Xinjiang Autonomous Region, NW China): Principal characteristics and ore-forming processes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2–4): 184

–203

Pirajno F, Mao JW, Zhang ZC, Zhang ZH and Chai FM. 2008. The association of mafic-ultramafic intrusions and A-type magmatism in the Tian Shan and Altay orogens, NW China; Implications for geodynamic evolution and potential for the discovery of new ore deposits. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(2–4): 165–183

Pirajno F, Ernst RE, Borisenko AS, Fedoseev G and Naumov EA. 2009. Intraplate magmatism in Central Asia and China and associated metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 35(2): 114–136

Polyakov GV, Izokh AE and Borisenko AS. 2008. Permian ultramafic-mafic magmatism and accompanying Cu-Ni mineralization in the Gobi-Tien Shan belt as a result of the Tarim plume activity. *Russian Geology and Geophysics*, 49(7): 455–467

Schilling JG. 1973. Iceland mantle plume; Geochemical study of Reykjanes Ridge. *Nature*, 242(5400): 565–571

Schilling JG, Thompson G, Kingsley R and Humphris S. 1985. Hotspot-migrating ridge interaction in the South Atlantic. *Nature*, 313(5999): 187–191

Song ZR, Xiao XL, Luo CL, Wu MR, Ling LH and Cheng CH. 2005. New advances in the study of Permian stratigraphy at Nileke in the Yinin Basin, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 23(4): 334–338 (in Chinese with English abstract)

Tang GJ, Wang Q, Wyman DA, Li ZX, Zhao ZH, Jia XH and Jiang ZQ. 2010. Ridge subduction and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt; Evidence from Late Carboniferous adakites and high-Mg diorites in the western Junggar region, northern Xinjiang (West China). *Chemical Geology*, 277(3–4): 281–300

Tang GJ, Wang Q, Wyman DA, Li ZX, Xu YG and Zhao ZH. 2012. Recycling oceanic crust for continental crustal growth: Sr-Nd-Hf isotope evidence from granitoids in the western Junggar region, NW China. *Lithos*, 128–131: 73–83

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

Wang SG, Han BF, Hong DW, Xu BL and Sun YY. 1994. Geochemistry and tectonic significance of alkali granites along Ulungur River, Xinjiang. *Chinese Journal of Geology*, 28(4): 373–382 (in Chinese with English abstract)

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)

Wu H, Li HQ, Mo XH, Chen FW, Lu YF, Mei YP and Deng G. 2005. Age of the Baishiqu mafic-ultramafic complex, Hami, Xinjiang and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 79(4): 498–502 (in Chinese with English abstract)

Xia ZC, Xu XY, Xia LQ, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2005. Geochemistry of the Carboniferous-Permian post-collisional granitic rocks from Tianshan. *Northwestern Geology*, 38(1): 1–14 (in Chinese with English abstract)

Xiao WJ, Windley BF, Hao J and Zhai MG. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China; Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6): 1069–1088

Xiao WJ, Windley BF, Yan QR, Qin KZ, Chen HL, Yuan C, Sun M, Li JL and Sun S. 2006. SHRIMP zircon age of the Aermantai ophiolite in the North Xinjiang Area, China and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 32–37 (in Chinese with English abstract)

Xu YG. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China; Evidence, timing and mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9): 747–757

Xu YG, He B, Chung SL, Menzies MA and Frey FA. 2004. Geologic, geochemical, and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province. *Geology*, 32(10): 917–920

Xu YG and He B. 2007. Thick, high-velocity crust in the Emeishan large

- igneous province, southwestern China; Evidence for crustal growth by magmatic underplating or intraplating. In: Foulger G and Jurdy D (eds.). *The Origins of Melting Anomalies. Plates, Plumes, and Planetary Processes*. Geological Society of America Special Publication, 430: 841 – 858
- Xu YG, Luo ZY, Huang XL, He B, Xiao L, Xie LW and Shi YR. 2008. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(13): 3084 – 3104
- 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): 269 – 287
- Zhang CL, Li ZX, Li XH, Xu YG, Zhou G and Ye HM. 2010a. A Permian large igneous province in Tarim and Central Asian orogenic belt, NW China: Results of a ca. 275Ma mantle plume? *GSA Bulletin*, 122: 2020 – 2040
- Zhang CL, Xu YG, Li ZX, Wang HY and Ye HM. 2010b. Diverse Permian magmatism in the Tarim Block, NW China: Genetically linked to the Permian Tarim mantle plume? *Lithos*, 119(3 – 4): 537 – 552
- Zhang CL, Zhou G, Wang HY, Dong YG and Ding RF. 2010. 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. *Geological Bulletin of China*, 29(6): 779 – 794 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CL and Zou HB. 2013a. 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. *Lithos*, 174: 15 – 27
- Zhang CL and Zou HB. 2013b. Permian A-type granites in Tarim and western part of Central Asian Orogenic Belt (CAOB): Genetically related to a common Permian mantle plume? *Lithos*, 172 – 173: 47 – 60
- Zhang LF, Ai YL, Li XP, Rubatto D, Song B, Williams S, Song SG, Ellis D and Liou JG. 2007. Triassic collision of western Tianshan orogenic belt, China: Evidence from SHRIMP U-Pb dating of zircon from HP/UHP eclogitic rocks. *Lithos*, 96(1 – 2): 266 – 280
- Zhou DW, Liu YQ, Xin XJ, Hao JR, Dong YP and Ouyang ZJ. 2006. Tracing and reconstruction of the Palaeo tectonic background of the Permian basalts in Tuha and Sangtanghu Basins, NW China. *Science in China (Series D)*, 26: 143 – 153
- Zhou MF, Leshner CM, Yang ZX, Li JW and Sun M. 2004. Geochemistry and petrogenesis of 270Ma 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. *Chemical Geology*, 209(3 – 4): 233 – 257
- 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
- Zindler A and Hart SR. 1986. *Chemical Geodynamics. Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14(1): 493 – 571

附中文参考文献

- 李锦轶, 宋彪, 王克卓, 李亚萍, 孙桂华, 齐得义. 2006. 东天山吐哈盆地南缘二叠纪幔源岩浆杂岩: 中亚地区陆壳垂向生长的地质记录. *地球学报*, 27(5): 424 – 446
- 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
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. *地球化学*, 25(6): 552 – 558
- 宋志瑞, 肖晓林, 罗春林, 吴明仁, 凌联海, 程春华. 2005. 新疆伊宁盆地尼勒克地区二叠纪地层研究新进展. *新疆地质*, 23(4): 334 – 338
- 王式洸, 韩宝福, 洪大卫, 许保良, 孙亚芸. 1994. 新疆乌伦古河碱性花岗岩的地球化学及其构造意义. *地质科学*, 28(4): 373 – 382
- 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
- 吴华, 李华芹, 莫新华, 陈富文, 路远发, 梅玉萍, 邓岗. 2005. 新疆哈密白石泉铜镍矿区基性-超基性岩的形成时代及其地质意义. *地质学报*, 79(4): 489 – 502
- 夏祖春, 徐学义, 夏林圻, 李向民, 马中平, 王立社. 2005. 天山石炭-二叠纪后碰撞花岗岩质岩石地球化学研究. *西北地质*, 38(1): 1 – 14
- 肖文交, Windley BF, 阎全人, 秦克章, 陈汉林, 袁超, 孙敏, 李继亮, 孙枢. 2006. 北疆地区阿尔曼太蛇绿岩锆石 SHRIMP 年龄及其大地构造意义. *地质学报*, 80(1): 32 – 37
- 张传林, 周刚, 王洪燕, 董永观, 丁汝福. 2010. 塔里木和中亚造山带西段二叠纪大火成岩省的两类地幔源区. *地质通报*, 29(6): 779 – 794