

阿尔金山东段阿克塞蛇绿岩地质地球化学特征及形成时代

王军^{1,2}, 李小强², 梁明宏², 王玉玺^{2,3}, 张兵兵², 潘保田¹

WANG Jun^{1,2}, LI Xiaoqiang², LIANG Minghong², WANG Yuxi^{2,3}, ZHANG Bingbing², PAN Baotian¹

1. 兰州大学资源环境学院西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000;

3. 兰州大学地质科学与矿产资源学院甘肃省西部矿产资源重点实验室, 甘肃 兰州 730000

1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3. Key Laboratory of Mineral Resources in Western China (Gansu Province), School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China

摘要:北阿尔金蛇绿岩带是分布在阿尔金山北缘的一条蛇绿混杂岩带,超基性蛇纹岩岩块、基性岩墙、辉长岩块及基性熔岩组合是该带东段阿克塞蛇绿岩的典型组合形式。地球化学研究结果显示,阿克塞蛇绿岩超基性蛇纹岩以富MgO、贫Al₂O₃、P₂O₅、CaO和K₂O为特征,球粒陨石标准化稀土元素配分曲线表现较平缓,比值接近于1;基性熔岩类中TiO₂为0.86%~1.80%,Al₂O₃为12.00%~14.85%,CaO介于4.89%~19.23%之间,球粒陨石标准化稀土元素配分型式表现为右倾;基性岩墙中TiO₂介于1.08%~2.44%之间,Al₂O₃含量为11.07%~13.26%,Na₂O(1.20%~2.28%)>K₂O(0.80%~1.38%),稀土元素总量介于48.65×10⁻⁶~124.04×10⁻⁶之间,平均92.95×10⁻⁶;轻、重稀土元素比值介于2.22~4.45之间,总体表现为大洋中脊环境,LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄显示,阿克塞蛇绿岩形成于514.6±8.8Ma,为寒武纪,表明在早古生代北阿尔金洋已完全打开,并连通了红柳沟—阿克塞。

关键词:蛇绿岩;阿尔金山东段;地球化学;锆石U-Pb年代学

中图分类号:P595;P597+.3

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2018)04-0559-11

Wang J, Li X Q, Liang M H, Wang Y X, Zhang B B, Pan B T. Age and geochemistry of Aksay ophiolite in East Altun Mountains. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(4):559-569

Abstract: North Altun ophiolite belt is an ophiolite melange zone located on the northern margin of the Altun Mountains. Rock associations of ultrabasic rock blocks, basic dyke swarms, gabbro rock blocks and basic lava composite the representative ophiolite suite located in Aksay of the East Altun Mountains. Geochemical studies of the Aksay ophiolite show that the ultrabasic serpentinite is high in MgO and poor in Al₂O₃, P₂O₅, CaO, K₂O, the chondrite-normalized REE patterns are relatively flat, and the ratio of sample to chondrite is close to 1. Basic lava rock is recognized by content of TiO₂, Al₂O₃, CaO, with the chondrite-normalized REE patterns being relatively right-inclined. Basic dyke swarms are recognized by content of TiO₂, Al₂O₃, with the features of Na₂O higher than K₂O, \sum REE, and \sum LREE/ \sum HREE(2.22~4.45). Geochemical studies indicate that the Aksay ophiolite was formed in a Mid-

收稿日期:2017-07-07;修订日期:2018-02-08

资助项目:中国地质调查局项目《祁连成矿带肃南—大柴旦地区地质矿产调查》(编号:DD20160012)和国家自然科学基金项目《河西走廊北山地区构造变形影响下的地貌演化过程研究》(批准号:41571003)和《祁连山中段山体隆升扩展及其对水系演化的影响》(批准号:41730637)

作者简介:王军(1986-),男,博士,工程师,从事区域地质与构造研究工作。E-mail:wangjunzu@foxmail.com

Ocean Ridges (MOR) environment and was reformed by subsequent Supra-Subduction Zone (SSZ). Geochronologic studies of zircon U-Pb show that the Aksay ophiolite was generated at 514.6 ± 8.8 Ma of Cambrian period.

Key words: ophiolite; East Altun Mountains; geochemistry; zircon U-Pb geochronology

蛇绿岩代表了上地幔和大洋地壳的碎片^[1-2],并在陆陆碰撞和弧陆碰撞、洋脊-海沟作用或俯冲增生事件等过程中卷入到陆缘系统中^[3-5],常沿碰撞型和增生型造山带中的缝合带分布,是拼合的板块或增生地体之间的主要边界^[6]。1972年的彭罗斯会议将蛇绿岩定义为一种类似蛋糕层的“假层序”,从下向上包括构造岩化的橄榄岩、堆晶橄榄岩、由层状辉长岩覆盖的辉石岩、席状玄武质岩墙、火山岩系和沉积盖层,并被解释为主要形成于古洋中脊。随着研究的深入,关于蛇绿岩的定义、形成环境等发生了深刻的变化^[7-8]。Dilek等^[5]对蛇绿岩的新定义为,在特定构造环境中形成的,与不同熔融事件和岩浆分异过程有关的,具备时空联系的超镁铁质长英质岩石的岩套。

阿尔金山地区以发育青藏高原北部边界的巨型走滑断裂系而著称。研究表明,阿尔金山南、北两侧分别发育2条蛇绿岩带^[9-10],即南阿尔金蛇绿岩带和北阿尔金蛇绿岩带。大量研究对分布于阿尔金山南、北两侧的2条蛇绿岩带不同地段的出露特征进行了报道,并对其形成时代、构造环境、构造演化等进行了讨论^[11-20]。北阿尔金蛇绿岩带沿阿尔金山脉北侧出露,从西至东,由米兰红柳沟经阿克塞至肃北半鄂博,走向近东西,全长大于300km,也被称为红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带。翔实的岩石地球化学数据反映,该带既有MORB(洋中脊玄武岩)的背景信息,也有SSZ(俯冲带型)的构造信息^[9,15-16],高精度同位素地质年代学研究表明,该蛇绿岩带形成于早古生代寒武纪^[15,18,21]。由于阿尔金构造带与祁连构造带具有良好的对比性,因此有学者认为阿尔金造山带是被阿尔金断裂错断的祁连构造带的一部分^[11-12],并将北阿尔金蛇绿岩带与北祁连蛇绿岩带进行对比^[10]。出露于当金山北侧的阿克塞蛇绿岩位于阿尔金造山带与祁连造山带的交汇部位,出露的蛇绿岩岩石单元较齐全,对该套蛇绿岩的岩石学及地球化学、年代学研究有助于深刻理解阿尔金造山带与祁连造山带之间的关系,重建造山带演化历史。

1 区域构造背景及地质特征

1.1 区域构造及地质特征

研究区位于多条构造单元汇聚之地,以北阿尔

金和南阿尔金2条蛇绿岩带为界,自北向南依次为敦煌地块、阿尔金地体(阿克塞以东称中祁连地体)和柴达木地块(图1-a)。北阿尔金蛇绿岩带在阿尔金造山带西段称为红柳沟-拉配泉蛇绿岩混杂岩带,在阿尔金山东段阿克塞一带称为阿克塞蛇绿岩。南阿尔金蛇绿岩带在阿尔金造山带西段称为阿帕-茫崖蛇绿混杂岩带,在阿尔金山东段当金山口一带称为当金山口蛇绿岩,过当金山口后逐渐向南东方向偏转,经大道尔基最终与青海拉脊山蛇绿岩带交汇。红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带空间分布严格受阿尔金断裂带控制,呈近东西向延伸,西起新疆-米兰红柳沟-拉配泉一线,向东经阿克塞至肃北一带,全长约360km,各地宽窄各异,在阿尔金中段红柳沟一带宽8~15km,往东逐渐收敛。该蛇绿岩带在区域上主要以透镜状、带状产出于韧性剪切带内,主要由浅变质的火山岩、火山碎屑岩、碎屑岩及少量的碳酸盐岩组成,夹具有蛇绿岩特征的基性-超基性岩块、基性岩墙群、硅质岩及高压变质岩块。在拉配泉附近见玄武岩枕状构造。由于强烈的构造混杂,多数基性-超基性岩以构造透镜体或岩块形式出露,蛇绿岩层序出露不全,区域上罕见完整的蛇绿岩剖面,但在不同部位均能发现组成蛇绿岩的岩石单元^[9,16]。

1.2 蛇绿岩出露地质特征

阿克塞蛇绿岩带西起大鄂博沟沟口,向东延伸至清水沟一带,在小鄂博沟以西出露宽度较窄,为300~500m,小鄂博沟以东至长草沟一带被第四系覆盖,东段半个洼一带的北西-南东向断层作用使其重新出露地表,宽度为3~4km。该蛇绿混杂岩带在研究区与古元古代北大河岩群(Pt.B.)、长城纪桦树沟组(Chh)均为断层接触,北部被晚更新世冲洪积层(Qp₃^{aq})覆盖(图1-b)。阿克塞蛇绿岩主要由超基性蛇纹岩岩块、辉长岩岩块、基性岩墙、基性-中性熔岩及中基性火山岩剪切基质拉配泉岩群(ϵ Lp)组成。

超基性岩呈剪切岩块形式主要出露于西段大鄂博沟沟口及东段清水沟一带断裂带内,呈大小2~4m的透镜体(图版I-a,b),岩性主要为蛇纹岩、辉橄岩及蛇纹石化辉橄岩,局部发生纤闪石化,呈典

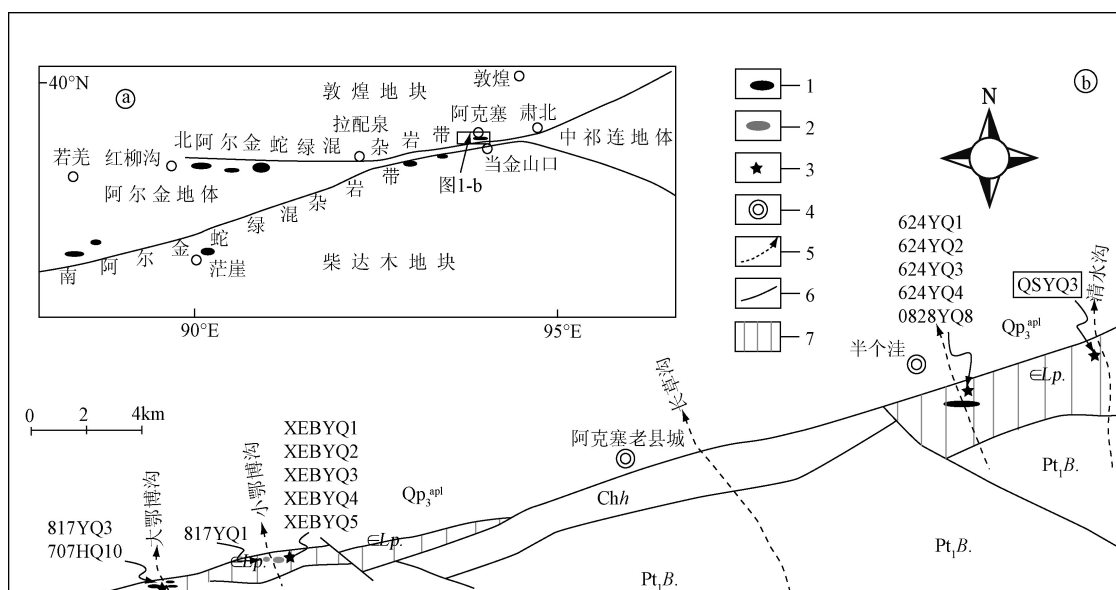


图 1 研究区构造位置(a)和阿克塞蛇绿岩带出露地质概况及采样位置(b)

Fig. 1 Tectonic location of the study area(a) and sampling sites in Aksay ophiolite zone(b)

1—超基性岩块; 2—基性岩块; 3—采样位置; 4—地名; 5—河沟; 6—地质界线; 7—阿克塞蛇绿岩带。

Pt.B.—古元古代北大河岩群; Chh—长城纪桦树沟组; ϵLp —寒武纪拉配泉岩群; Qp_3^{apl} —晚更新世冲洪积层

型的格子状构造。辉长岩块主要出露于小鄂博沟沟口一带,呈大小5~8m的透镜体产出(图版 I -d),岩块普遍发生角闪岩化。

基性岩墙主要见于小鄂博沟沟口及清水沟沟口。小鄂博沟沟口基性岩墙由4~5条宽3~5m的变质辉长辉绿岩组成,呈直立状侵入南华纪蚀变花岗岩中(图版 I -c),基性岩墙普遍发生变质作用,呈角闪岩类。清水沟沟口基性岩墙宽4~6 m,侵入基性熔岩中,岩墙也发生了角闪岩变质作用。

熔岩类主要出露于东段半个洼一带,由于该段整体受构造剪切作用较弱,基本保持了火山岩原始喷发层序,主要由各类玄武岩、枕状熔岩(图版 I -e)、安山岩、玄武质凝灰岩、硅质岩等组成。

剪切基质主要由绿泥片岩、英安岩、凝灰质片岩及部分硅质岩、劈理化岩石组成。由于遭受强烈的构造剪切作用,岩石原始层序已完全改造,代之以透入性劈理构造。该带主要出露于剪切构造较强的西段大鄂博沟—长草沟一带。

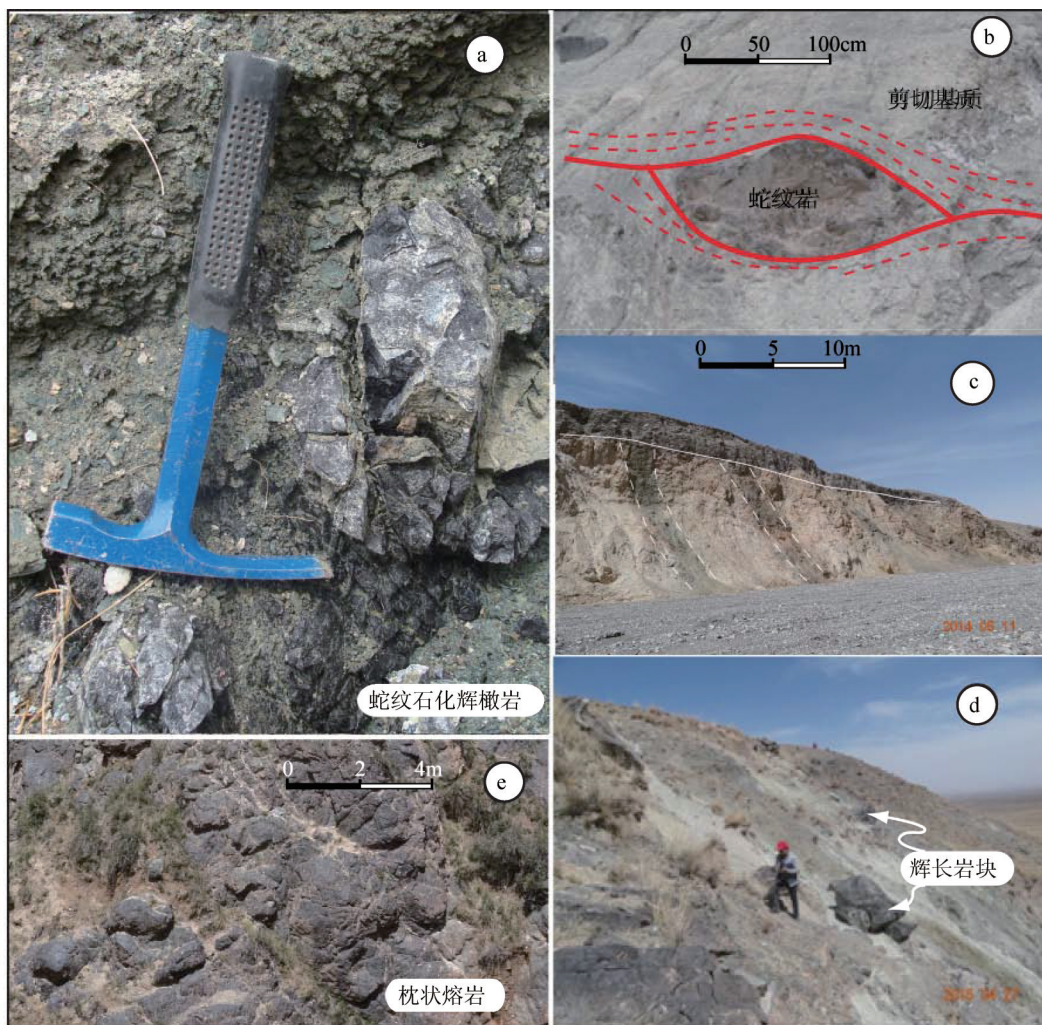
2 岩石地球化学特征

岩石地球化学分析样品采自蛇绿岩不同的岩石组分,其中样品 624YQ1、624YQ2、624YQ3、

624YQ4、QSYQ3 和 0828YQ8 采自半个洼一带玄武质熔岩或枕状熔岩(图 1-b、图版 I -e),样品 817YQ1 采自小鄂博沟沟口辉长岩块(图 1-b、图版 I -d),样品 817YQ3 和 707HQ10(图 1-b、图版 I -a)采自大鄂博沟沟口蛇纹岩岩块,样品 XEBYQ1、XEBYQ2、XEBYQ3、XEBYQ4、XEBYQ5 采自小鄂博沟沟口的基性岩墙(图 1-b、图版 I -c)。

部分测试样品的岩相学特征如图 2 所示,透辉蛇纹岩呈纤维状变晶结构或交代假象结构(图 2-a),矿物组成为胶蛇纹石(56%)+透辉石(40%)+镁质碳酸岩几何体(<3%)。全蛇纹石化辉橄岩呈纤维状变晶结构或网环结构(图 2-b),矿物组成为蛇纹石(91%)+纤闪石等(3%)+镁质碳酸岩集合体(2%)+磁铁矿($\leq 4\%$)。纤维蛇纹石集合体分割的交代网环结构,可能是橄榄石假象,从假象推断原岩主要由橄榄石、辉石组成。辉长岩呈典型辉长结构(图 2-c),矿物组成为斜长石(67%)+单斜辉石(32%)+磁铁矿($\leq 1\%$),单斜辉石近短柱状,弱纤闪石化,斜长石宽板状,可见残缺聚片双晶。枕状玄武岩呈斑状结构、基质间粒间隐结构,块状构造。矿物含量为斑晶普通辉石(10%)+基质斜长石(30%)+基质普通辉石(35%)+基质隐晶质(20%)+

图版 I Plate I



a.阿克塞蛇纹岩带蛇纹石化辉橄岩产出状态;b.超基性岩块与剪切基质关系;
c.基性岩墙;d.辉长岩剪切岩块;e.枕状熔岩产出特征

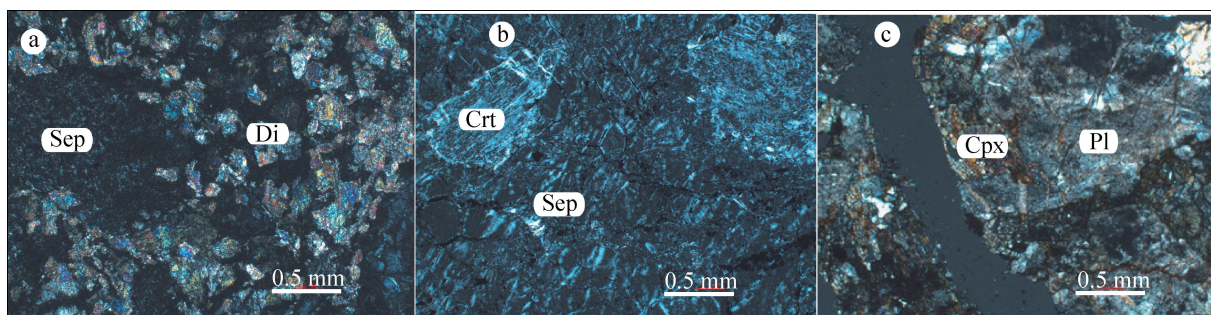


图2 阿克塞蛇纹岩带中超基性岩

Fig. 2 Ultrabasic rock in Aksay ophiolite zone

a—透辉石(Di)呈分散的碎块状,蛇纹石(Sep)则呈连续的筛网状;b—蛇纹石占大部分,少量的蚀变矿物纤蛇纹石(Crt)呈斑状分子左上角;c—单斜辉石(Cpx)与斜长石(Pl)构成典型的辉长结构

表 1 阿克塞蛇绿岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 1 Composition of major, trace and rare earth elements of Aksay ophiolite

样品岩性	枕状熔岩			玄武质熔岩			辉长岩	蛇纹岩	基性岩墙					
样品号	624Y Q1	624YQ 2	624Y Q3	624Y Q4	QSY Q3	0828Y Q8	817Y Q1	817Y Q3	707H10	XEBY Q1	XEBY Q2	XEBY Q3	XEBY Q4	XEBY Q5
Na ₂ O	1.75	4.53	3.53	3.25	4.02	2.84	0.33	0.01	0.04	1.20	1.67	2.16	1.65	2.28
MgO	6.52	4.21	5.26	7.17	4.71	6.15	7.99	39.41	33.62	4.58	5.98	6.26	4.78	5.72
Al ₂ O ₃	10.98	14.85	12.00	14.75	14.65	15.46	13.49	1.55	1.73	11.07	11.72	12.58	12.36	13.26
SiO ₂	45.49	46.67	46.11	47.15	49.03	46.91	45.41	38.77	39.96	45.55	45.29	46.50	47.01	49.84
P ₂ O ₅	0.11	0.23	0.20	0.25	0.31	0.10	0.13	0.01	0.01	0.23	0.15	0.09	0.17	0.15
K ₂ O	0.31	0.32	0.71	1.12	0.37	1.21	0.10	0.02	0.08	1.38	0.88	0.80	0.93	0.88
CaO	19.23	4.89	10.21	7.71	8.53	9.04	13.92	0.26	0.85	6.53	5.06	10.37	6.78	7.51
TiO ₂	0.86	1.80	1.29	1.49	2.00	1.04	1.27	0.03	0.06	2.31	1.84	1.08	2.44	1.89
MnO ₂	0.14	0.22	0.19	0.18	0.12	0.14	0.48	0.10	0.12	0.22	0.19	0.19	0.23	0.20
Fe ₂ O ₃	4.14	4.60	7.49	2.89	3.31	5.71	11.62	7.22	5.23	5.31	4.11	3.51	4.88	4.13
FeO	5.35	10.80	5.00	9.20	5.10	3.17	9.51	1.54	1.86	10.70	9.50	7.90	10.80	9.45
H ₂ O ⁺	3.97	4.54	3.21	3.90	3.41	2.70	2.75	3.42	11.70	4.14	4.16	3.31	3.67	3.31
烧失量	0.82	2.01	3.59	0.61	4.13	5.24	2.87	12.25	13.06	11.55	12.37	7.49	6.58	3.44
La	9.46	23.06	17.51	17.88	26.72	4.22	5.92	0.31	0.86	17.54	14.38	6.23	21.57	17.30
Ce	18.27	41.37	31.33	34.93	52.43	8.88	20.60	22.30	1.57	36.84	30.04	14.00	42.85	35.82
Pr	2.18	4.97	3.94	4.54	6.55	1.58	2.11	0.31	0.19	4.91	3.85	1.83	5.35	4.17
Nd	8.05	17.97	14.49	17.07	23.85	7.98	10.70	0.17	0.74	19.12	14.57	7.89	20.17	15.81
Sm	2.11	4.46	3.56	4.33	5.45	2.58	3.31	0.10	0.16	5.57	3.79	2.64	5.60	4.01
Eu	0.81	1.50	1.25	1.56	1.83	0.94	1.06	0.10	0.05	1.63	1.30	0.95	1.62	1.39
Gd	2.41	4.69	3.74	4.84	4.86	3.47	3.72	0.36	0.16	6.16	4.17	3.38	6.34	4.39
Tb	0.43	0.81	0.63	0.86	0.82	0.65	0.76	0.10	0.03	1.12	0.75	0.65	1.19	0.80
Dy	2.56	4.63	3.55	5.02	4.44	4.44	5.03	0.10	0.22	6.84	4.54	4.19	7.37	4.77
Ho	0.55	0.95	0.70	1.04	0.88	0.96	1.04	0.10	0.05	1.46	0.98	0.91	1.61	1.04
Er	1.56	2.47	1.70	2.81	2.21	2.66	3.05	0.10	0.16	4.24	2.82	2.65	4.61	2.93
Tm	0.23	0.36	0.23	0.40	0.31	0.39	0.55	0.10	0.03	0.65	0.42	0.39	0.68	0.43
Yb	1.60	2.26	1.43	2.63	1.90	2.39	3.20	0.10	0.20	4.37	2.75	2.56	4.44	2.86
Lu	0.27	0.34	0.20	0.39	0.28	0.33	0.48	0.10	0.03	0.66	0.42	0.38	0.64	0.43
Y	13.21	21.76	13.81	24.18	19.93	22.70	26.00	0.70	10.40	31.80	22.60	21.37	37.97	24.15
Zr	69.30	101.40	78.50	96.80	171.00	63.50	71.30	10.00	13.00	142.60	98.70	61.40	129.10	100.50
Nb	9.94	20.63	18.55	17.47	21.00	6.70	4.17	3.00	0.45	10.13	8.12	6.08	9.83	11.12
Hf	2.20	2.50	2.00	2.40	4.60	2.00	2.85	3.89	0.20	3.10	2.40	1.70	2.80	2.70
Ta	0.80	1.49	1.33	1.37	1.39	0.73	0.31	0.10	0.04	0.95	0.76	0.61	0.88	1.09
Ba	63.56	191.10	401.00	932.90	791.60	115.80	358.30	453.30	21.00	203.10	151.00	131.70	188.5	163.70
NiO	291.50	297.20	280.20	95.48	100.60	127.00	25.00	2038.20	1731.0	72.20	66.48	81.00	63.50	67.87
ΣREE	50.49	109.84	84.26	98.30	132.50	41.47	61.53	24.35	4.45	111.11	84.78	48.65	124.04	96.15
LREE	40.88	93.33	72.08	80.31	116.80	26.18	43.70	23.29	3.57	85.61	67.93	33.54	97.16	78.50
HREE	9.61	16.51	12.18	17.99	15.70	15.29	17.83	1.06	0.88	25.50	16.85	15.11	26.88	17.65
LREE/ HREE	4.25	5.65	5.92	4.46	7.44	1.71	2.45	21.97	4.06	3.36	4.03	2.22	3.61	4.45
(La/Yb) _N	4.24	7.32	8.78	4.88	10.09	1.27	1.33	2.22	3.08	2.88	3.75	1.75	3.48	4.34
δEu	1.09	1.00	1.04	1.04	1.06	0.96	0.92	1.43	0.95	0.85	0.99	0.97	0.83	1.01
δCe	0.95	0.90	0.89	0.93	0.94	0.84	1.43	15.94	0.91	0.96	0.97	1.00	0.95	1.00

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素单位为10⁻⁶

磁铁矿(5%)。

样品分析测试单位为湖北省地质实验研究所,测试结果及部分岩石化学参数如表1所示。

2.1 超基性岩类岩石地球化学特征

超基性蛇纹岩主量元素岩石地球化学数据显示,其具有富MgO,贫Al₂O₃、P₂O₅、CaO和TiO₂的特征,其中MgO含量高达33.62%和39.41%,Mg[#]分别为96.2和94.7,SiO₂含量均低于40%,分别为38.77%和39.96%,P₂O₅含量仅为0.01%,Al₂O₃含量为1.55%和1.73%,CaO含量为0.26%和0.85%,K₂O含量分别为0.02%和0.08%,可以发现蛇纹岩样品中的Al₂O₃、CaO和K₂O含量均远小于玄武质熔岩及基性岩样品的含量。烧失量较大(分别为12.25%和13.06%)可能与样品后期遭受的强烈蚀变作用有关。

2个样品稀土元素总量(Σ REE)普遍较低,仅为 4.45×10^{-6} ~ 26.51×10^{-6} ,轻、重稀土元素比值(HREE/LREE)不高,介于4.06~21.97之间。在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线上,样品707HQ10的曲线平缓并略微右倾,样品817YQ3的稀土元素含量不稳定,呈现上下跳跃的形态(图3)。样品(La/Yb)_N值分别为2.22和3.08, δ Eu值分别为1.43和0.95, δ Ce值变化较大,分别为15.94和0.91。从稀土元素球粒陨石标准化分布型式图可以看出,超基性蛇纹岩样品与球粒陨石稀土元素含量比值接近于1,说明该超基性岩源自深部未分异地幔,这与张志诚等^[15]在阿克塞青崖子和吴峻等^[23]在红柳沟一带的研究结果一致。

2.2 熔岩类岩石地球化学特征

阿克塞蛇绿岩带熔岩类以玄武质基性熔岩为主。主量元素SiO₂含量为45.49%~49.03%,平均为

46.89%;烧失量中等,平均为2.73%;TiO₂含量为0.86%~1.80%,平均值为1.41%,含量较高,接近洋中脊玄武岩平均值(1.5%)^[24],明显高于岛弧钙碱性玄武岩(TiO₂=0.98%)^[25]和板内碱性玄武岩(TiO₂=2.9%)^[25],低于洋岛拉斑玄武岩(TiO₂=2.63%)^[26];Al₂O₃含量为10.98%~15.46%,平均值为13.78%,接近太平洋洋中脊拉斑玄武岩(Al₂O₃=14.86%)^[24],低于岛弧拉斑玄武岩(Al₂O₃=16.00%)^[27]和大陆溢流玄武岩(Al₂O₃=17.08%)^[26];CaO介于4.89%~19.23%之间,平均值为9.93%,接近MORB(CaO=11.20%)^[24];Na₂O含量(1.75%~4.53%,平均值为3.32%)>K₂O(0.31%~1.21%,平均值为0.67%),具有高钠、低钾的特征,可能与后期蚀变作用中Na的交代作用有关。稀土元素总量差异不大,含量在 41.47×10^{-6} ~ 132.5×10^{-6} 之间,平均值为 86.14×10^{-6} ;轻、重稀土元素比值介于1.71~7.44之间,(La/Yb)_N值介于1.27~10.09之间,球粒陨石标准化稀土元素配分型式显示右倾特征,表明岩石强烈富集轻稀土元素。 δ Eu值为0.96~1.09,平均值为1.03,无明显的Eu异常,轻稀土元素的富集也表明有较多的稀土元素保留在残余的液相岩浆中,可判断这套基性熔岩经历了部分熔融。 δ Ce值为0.84~0.95,平均值为0.91,为负异常,表明该套基性熔岩遭受了后期表生作用的改造。

另外,在对阿克塞蛇绿岩熔岩类岩石进行地球化学分析时,参考夏林圻等^[28]对火山熔岩的分类方法,根据Ti/Y值将其划分为高Ti/Y(HT, Ti/Y \geq 500)和低Ti/Y(LT, Ti/Y<500)2种岩浆类型,根据Nb/La值,LT熔岩可以进一步划分为LT1(Nb/La>0.8)熔岩和LT2(Nb/La<0.8)熔岩2个亚类^[28]。6个熔岩类样品投图结果见图4-a,样品624YQ2、624YQ3和QSYQ3落入HT(高Ti/Y)范围内,样品624YQ1、624YQ4和828YQ8落入LT1范围内,缺失低Nb/La的LT2类熔岩,说明样品未遭受后期混染。据此分类结果,对所有熔岩样品进行了不同岩石系列判别及构造环境判别图解的投图(图4)。在不相容微量元素原始地幔标准化蛛网图解(图4-b)中,所有样品均表现出与现今E-MORB(富集型洋中脊玄武岩)相似的不相容微量元素配分型式。在Nb/Y-SiO₂(图4-c)和Ta/Yb-Th/Yb(图4-d)岩石系列判别图解中,HT熔岩落入碱性玄武岩区间,LT1熔岩样品落入亚碱性岩石系列区间。在北阿尔金蛇绿岩带的西段拉配泉一带的枕状玄武岩和玄

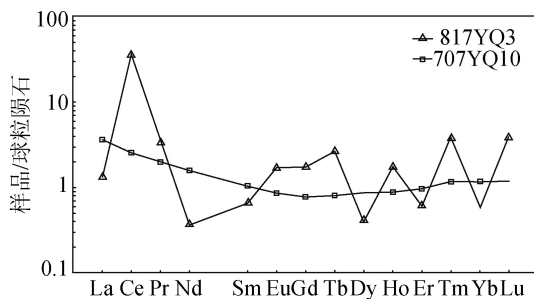


图3 超基性岩球粒陨石标准化稀土元素配分型式(标准化数据据参考文献[22])

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of ultrabasic rock from Aksay ophiolite

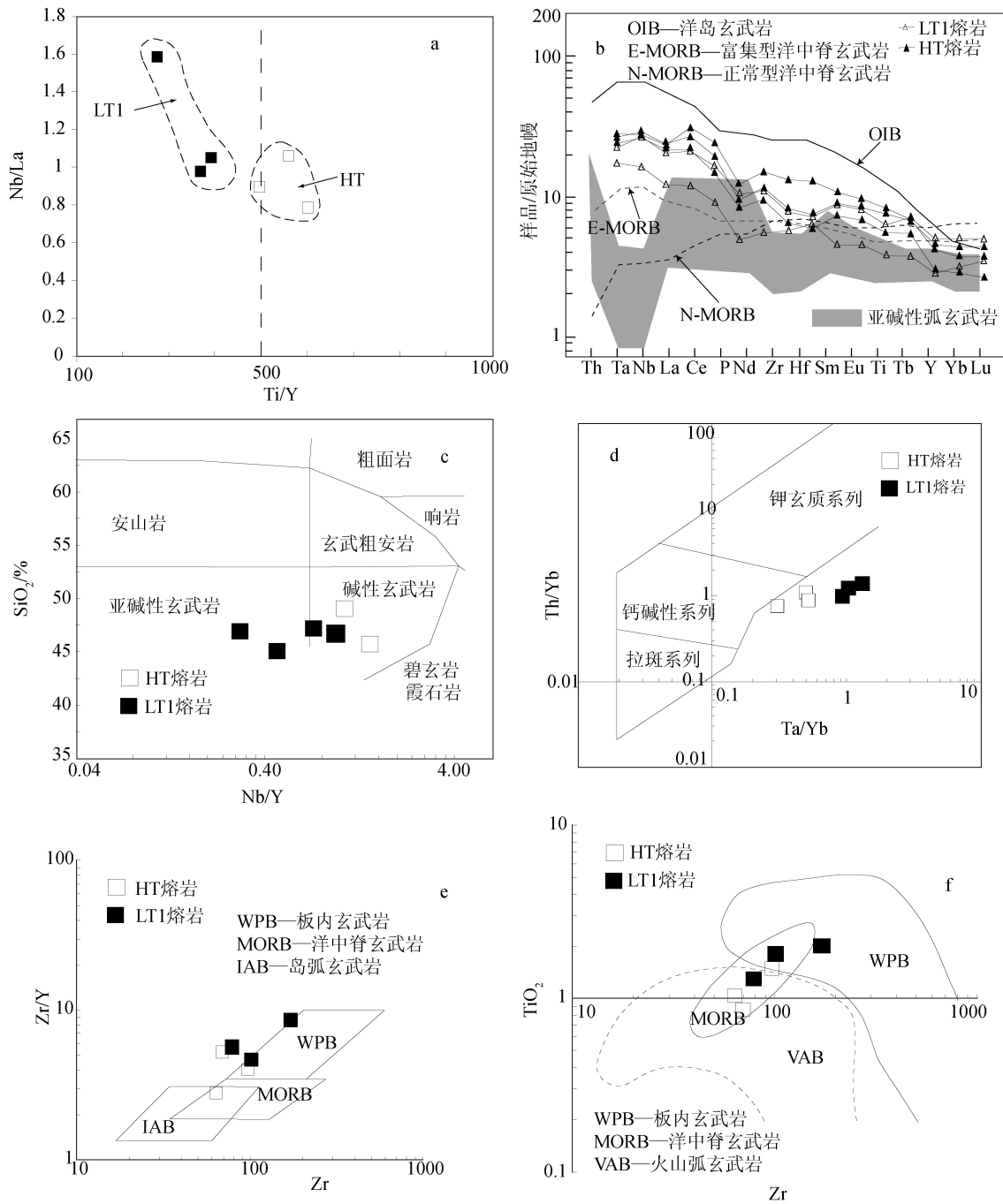


图 4 阿克塞蛇绿岩熔岩类地球化学图解

Fig. 4 Diagrams of Aksay basic lava

a—Ti/Y-Nb/La 图解; b—不相容微量元素原始地幔标准化蛛网图; c—Nb/Y-SiO₂图解;
d—Ta/Yb-Th/Yb 图解; e—Zr-Zr/Y 构造环境判别图解; f—Zr-TiO₂构造环境判别图解

武岩属于亚碱性系列拉斑玄武岩^[23],因此可以认为,阿克塞蛇绿岩中的熔岩类以钙碱性岩石系列为主。在 Zr-Zr/Y 构造环境判别图解(图 4-e)中大部

分样品落入板内玄武岩(WPB)区;在 Zr-TiO₂构造环境判别图解(图 4-f)中,所有样品均落入洋中脊玄武岩区。

综合看,阿克塞蛇绿岩中的基性熔岩元素特征与洋脊玄武岩特征相似,明显区别于岛弧拉斑玄武岩、洋岛拉斑玄武岩。

2.3 辉长岩岩石地球化学特征

阿克塞蛇绿岩中辉长岩样品仅有1个,由分析结果可知,该辉长岩块的SiO₂含量为45.41%,K₂O和Na₂O含量较低,分别为0.1%和0.33%,稀土元素总量为61.53×10⁻⁶,轻、重稀土元素比值为2.45,球粒陨石标准化(La/Yb)_N值为1.33,δEu和δCe值分别为0.92和1.43,表明阿克塞蛇绿岩带辉长岩以富集轻稀土元素为特征。

2.4 基性岩墙岩石地球化学特征

基性岩墙岩石样品的主量元素SiO₂含量为45.29%~49.84%,平均为46.86%,样品除XEBYQ1显示为超基性岩外,其余均显示基性岩地球化学特

征。样品TiO₂含量介于1.08%~2.44%之间,平均值为1.91%,含量较高,与洋脊玄武岩平均值(1.5%)^[24]较接近,高于岛弧钙碱性玄武岩(TiO₂=0.98%)^[25],低于板内碱性玄武岩(TiO₂=2.9%)^[25];Al₂O₃含量为11.07%~13.26%,平均为12.20%,接近太平洋洋中脊拉斑玄武岩(Al₂O₃=14.86%)^[23],低于岛弧拉斑玄武岩(Al₂O₃=16.00%)^[27]和大陆溢流玄武岩(Al₂O₃=17.08%)^[26];Na₂O(含量为1.20%~2.28%,均值为1.79%)>K₂O(含量为0.80%~1.38%,平均值为0.98%),具有高钠、低钾的特征,可能与后期蚀变作用中Na的交代作用有关。

稀土元素总量差异较大,介于48.65×10⁻⁶~124.04×10⁻⁶之间,平均为92.95×10⁻⁶;轻、重稀土元素含量比值(∑LREE/∑HREE)介于2.22~4.45之间,二者明显分异,(La/Yb)_N值介于1.75~4.33之间,

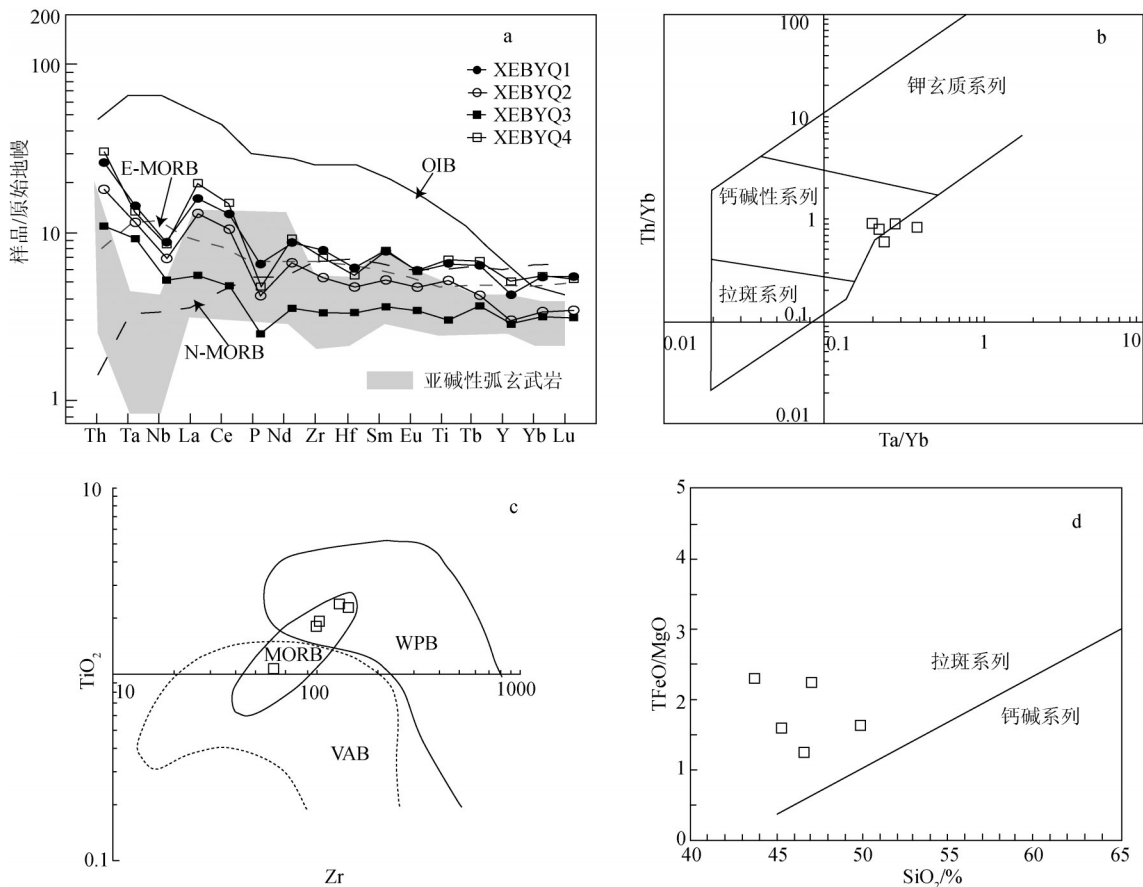


图5 阿克塞蛇绿岩基性岩墙地球化学图解

Fig. 5 Diagrams of Aksay ophiolite basic dyke swarms

a—不相容微量元素原始地幔标准化蛛网图解;b—Ta/Yb—Th/Yb图解;c—Zr—TiO₂构造环境判别图解;
d—SiO₂—TFeO/MgO图解。OIB—洋岛玄武岩;E-MORB—富集型洋中脊玄武岩;
N-MORB—正常型洋中脊玄武岩;WPB—板内玄武岩;VAB—岛弧玄武岩;MORB—洋中脊玄武岩

在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线上具平直略微右倾的特征。以上各稀土元素参数特征均说明,基性岩墙以富集轻稀土元素为特征,与辉长岩类及熔岩类变化趋势一致。 δEu 值为 0.83~1.01,平均值为 0.93,表现为轻微的负 Eu 异常; δCe 值为 0.95~1.00,平均值为 0.98,为轻微亏损,表明样品遭受了后期表生作用的改造。在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 5-a)中,所有样品均表现出与现今 E-MORB 相似的不相容微量元素分配型式,其中 Th 元素表现出强烈的正异常,Nb 相对亏损,说明岩浆演化过程中可能遭受明显的地壳混染作用或源区遭受俯冲组分的强烈改造。在 Ta/Yb-Th/Yb 图解(图 5-b)中,样品均落入钙碱性岩石系列区,在 $\text{SiO}_2\text{-TFeO/MgO}$ 图解(图 5-d)中,所有样品落入拉斑系列区,由于岩浆演化后期阶段的地壳混染等作用可以导致 Th 元素相对富集,因此在利用 Ta/Yb-Th/Yb 图解进行判别时,可能导致投点向 Th 元素含量较大的钙碱性区间移动,据此笔者认为,利用 $\text{SiO}_2\text{-TFeO/MgO}$ 图解判别的拉斑系列更能代表其真实岩浆系列类型,这与杨经绥等^[13]在米兰红柳沟一带对基性岩墙群的研究结果一致。

综合看,阿克塞蛇绿岩带中基性岩墙样品主量元素特征与洋中脊玄武岩特征相似,明显区别于岛弧玄武岩、洋岛拉斑玄武岩,在 $\text{TiO}_2\text{-Zr}$ 构造环境判别图解中所有样品也落入大洋中脊玄武岩区,与基性熔岩类岩石地球化学研究结果一致。

3 锆石 U-Pb 测年

锆石 U-Pb 测年样品采自半个洼附近的玄武质熔岩,锆石的挑选及阴极发光(CL)图像照相由河北廊坊区调实验室完成,锆石 U-Th-Pb 同位素含量测定由南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成,测试方法为激光剥蚀电感耦合等离子体质谱计法(LA-ICP MS)。U-Pb 分馏用澳大利亚锆石标样 GEMOC/GJ-1($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $608.5\pm 1.5\text{Ma}$)校正,采用锆石标样 Mud Tank($732\pm 5\text{Ma}$)作为内标控制分析精度。使用嵌入 Excel 的 ComPbCorr#3-15G 程序进行铅校正,锆石年龄谐和图用 Isoplot 程序(ver2.49)获得。

被测锆石 CL 图像及 U-Pb 年龄谐和图如图 6-a 所示,锆石 U-Pb 测试结果及年龄结果如表 2 所示。如图 6-a 所示,被测锆石最大粒径在 $200\mu\text{m}$ 左右,锆石具窄的特征性岩浆振荡环带及扇形分带,部分锆石出现较宽的增生边,反映后期经历过变质重结晶作用。测试结果如图 6-b 所示。所有测试数据均分布在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}\text{-}^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和线附近,用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄计算得出的年龄加权平均值为 $514.6\pm 8.8\text{Ma}$,时代为寒武纪。

4 讨论

4.1 构造环境

关于北阿尔金山蛇绿岩形成的构造环境,不同学

表 2 阿克塞蛇绿岩组火山岩样品 LA-ICP-MS 锆岩 U-Th-Pb 定年结果
Table 2 LA-ICP-MS zircons U-Th-Pb compositions of Aksay ophiolite basic lava

测定点号	同位素比值						年龄/Ma			
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	比值	$\pm\sigma$	比值	$\pm\sigma$	比值	$\pm\sigma$	年龄	$\pm\sigma$	年龄	$\pm\sigma$
半个洼一带玄武质凝灰岩 928TW4, 采样坐标:北纬 $39^\circ 26' 07''$ 、东经 $94^\circ 25' 36''$										
928tw4-01	0.05772	0.00075	0.68051	0.01004	0.08555	0.00109	527	6	529	6
928tw4-02	0.0569	0.00072	0.6793	0.00981	0.08663	0.0011	526	6	536	7
928tw4-03	0.0584	0.00095	0.65232	0.01136	0.08106	0.00106	510	7	502	6
928tw4-04	0.05765	0.00091	0.64536	0.01107	0.08123	0.00106	506	7	503	6
928tw4-05	0.0571	0.00076	0.66213	0.00999	0.08411	0.00107	516	6	521	6
928tw4-06	0.0571	0.00072	0.63751	0.0089	0.08096	0.00098	501	6	502	6
928tw4-07	0.05722	0.00078	0.65562	0.00973	0.0831	0.00102	512	6	515	6
928tw4-08	0.05707	0.0007	0.65315	0.00901	0.083	0.00101	510	6	514	6
928tw4-09	0.05835	0.00111	0.64027	0.01254	0.07958	0.00104	502	8	494	6
928tw4-10	0.05824	0.00074	0.67808	0.00953	0.08444	0.00103	526	6	523	6
928tw4-11	0.05785	0.00068	0.67962	0.00909	0.0852	0.00103	527	5	527	6

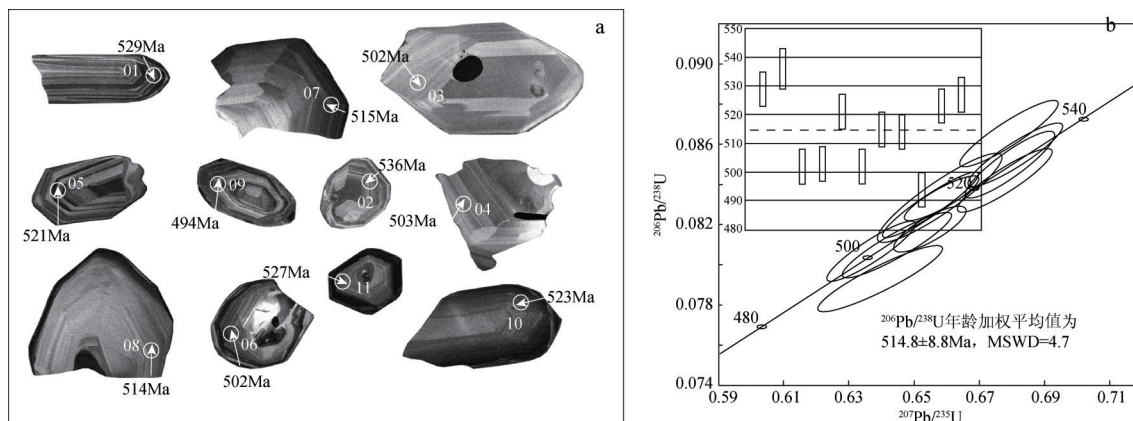


图6 阿克塞蛇绿岩玄武质凝灰岩锆石阴极发光(CL)图像(a)和U-Pb年龄谱和图(b)

Fig. 6 CL images of zircons from the Aksay ophiolite (a) and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages (b)

者在不同区段研究结果不尽相同。西段红柳沟蛇绿构造混杂带中,蛇绿岩组成包括地幔橄榄岩及与之伴生的斜长花岗岩、镁铁-超镁铁质堆晶杂岩、岩墙群和基性熔岩^[9,13,23,29],地幔橄榄岩表现出深海橄榄岩和俯冲带环境橄榄岩成分特点,深成堆晶岩(异剥橄榄岩-橄榄二辉石岩-(橄榄)辉石岩-辉长岩-斜长岩)为常见的SSZ构造背景产物;席状岩墙群的岩石成分与熔岩一致,为典型的MORB组合^[13],此外,混杂带中也卷入了洋岛^[16,23]或海山玄武岩^[18]。东段阿克塞青崖子附近的蛇纹岩以富Mg,贫 Al_2O_3 、CaO、 TiO_2 和 ΣREE 为特征,辉长岩在球粒陨石标准化稀土元素配分模式上表现为平坦或轻微富集型,与现代E-MORB和OIB玄武岩类似,显示为经SSZ环境改造的MORB环境^[15]。

一般来说,SSZ型蛇绿岩的形成与古洋壳的俯冲有关,俯冲板块发生熔融上升到地幔楔中,使其岩浆富集轻稀土元素和大离子亲石元素,形成岛弧型拉斑玄武岩,而N-MORB蛇绿岩则源自于正常的对流上地幔,E-MORB蛇绿岩是地幔柱岩浆作用所特有的。从构造环境看,SSZ型蛇绿岩位于弧前或部分弧后盆地中,而MORB型蛇绿岩则位于初始洋盆、大洋盆及弧后盆地中^[30]。

本次研究结果显示,在北阿尔金蛇绿岩带东段的阿克塞蛇绿岩套中,无论是基性熔岩还是基性岩墙,其岩石地球化学特征均显示出特征性的大洋中脊构造环境,据此笔者认为,北阿尔金蛇绿岩是形成于大洋中脊环境,后经构造俯冲、碰撞、闭合而残

留在俯冲带上盘的大洋地层系统(OPS)。

4.2 形成时代

随着同位素年代学的不断发展及高精度测年方法的应用,对北阿尔金蛇绿岩带的形成时代的确定也越来越精确。修群业等^[10]利用TIMS U-Pb法,测得红柳沟恰什坎萨依沟内枕状玄武岩的年龄为 448.6 ± 3.3 Ma,与该地区南、北两段玄武岩的测定年龄相近^[17];张新建等^[18]在米兰红柳沟的红柳泉一带通过对榴辉岩中多硅白云母进行的Ar-Ar测年得出 512 ± 3 Ma的坪年龄和 513 ± 5 Ma的等时线年龄;杨子江等^[31]利用SHRIMP锆石U-Pb法在阿克塞青崖子蛇绿混杂岩辉长岩中获得了 521 ± 12 Ma的锆石U-Pb年龄;杨经绥等^[9]在该蛇绿岩带西段米兰-红柳沟一带辉长岩中获得了 479 ± 8 Ma的锆石SHRIMP年龄,认为代表蛇绿岩的形成年龄。以上数据均表明,北阿尔金红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩形成时代为早古生代。通过对阿克塞蛇绿岩中玄武质熔岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb测年,得出阿克塞蛇绿岩形成于 514.6 ± 8.8 Ma的寒武纪,与前人研究结果一致。

总之,阿克塞蛇绿岩是迄今为止在北阿尔金蛇绿岩带东段发现的岩石类型较齐全的蛇绿岩,可以与西段的恰什坎萨依蛇绿岩和红柳沟蛇绿岩进行对比。岩石地球化学及同位素地质年代学研究表明,北阿尔金蛇绿岩东段阿克塞蛇绿岩与西段红柳沟蛇绿岩具有相似的形成环境及形成时代,都为早古生代早期形成的大洋中脊系统,进一步明确了北阿尔金洋在早古生代已完全打开并连通了红

柳沟—阿克塞。

5 结 论

(1)阿克塞蛇绿岩由超基性岩、基性熔岩、基性岩墙群组成,地球化学研究显示,基性熔岩及基性岩墙群的地球化学特征与大洋中脊玄武岩地球化学特征相似,可能形成于洋中脊环境。

(2)阿克塞蛇绿岩玄武质熔岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $514.6 \pm 8.8 \text{ Ma}$, 表明该套蛇绿岩形成时代为寒武纪。

(3)阿克塞蛇绿岩与北阿尔金山西段红柳沟蛇绿岩形成时代及环境相似,表明在早古生代北阿尔金山已经完全打开并连通红柳沟—阿克塞。

致谢:感谢中国地质调查局西安地质调查中心李向民研究员在审稿过程中提出的宝贵修改意见。

参考文献

- [1] Dewey J F, Bird J M. The origin and emplacement of the ophiolite suite: Appalachian ophiolites in Newfoundland[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76: 3179–3206.
- [2] Nicolas A. Structure of Ophiolites and Dynamics of Oceanic Lithosphere: Dordrecht, the Netherlands[M]. Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [3] Lagabrielle Y, Guivel C, Maury R, et al. Magmatic-tectonic effects of high thermal regime at the site of active ridge subduction: The Chile triple junction model[J]. *Tectonophysics*, 2000, 326: 255–268.
- [4] Cawood P A, Kroner A, Collins W J, et al. Accretion-ary orogens through Earth history in Space and time[J]. *Geological Society of London Special Publication*, 2009, 318: 1–36.
- [5] Dilek Y, Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, 123(3/4): 387–411.
- [6] Lister G, Forster M. Tectonic mode switches and the nature of orogenesis[J]. *Lithos*, 2009, 113: 274–291.
- [7] Reagan M K, Ishizuka O S, Stern R J, et al. Fore-arc basalts and subduction initiation in the IzuBonin-Mariana system[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11(3): 1–17.
- [8] Dilek Y, Furnes H. Spontaneous subduction initiation and forearc magmatism as revealed by Phanerozoic suprasubduction zone ophiolites[C]//*Geological Society of America Abstracts with Programs*, 2010, 42(5): 575.
- [9] 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 等. 北阿尔金山地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和 SHRIMP 定年[J]. *岩石学报*, 2008, 24(7): 1567–1584.
- [10] 崔军文, 唐哲民, 邓晋福. 阿尔金山断裂系[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 1–249.
- [11] 李向民, 马中平, 孙吉明, 等. 阿尔金山断裂南缘约马克其镁铁-超镁铁岩的性质和年代学研究[J]. *岩石学报*, 2009, 25(4): 862–872.
- [12] 许志琴, 杨经绥, 张新建, 等. 阿尔金山断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制[J]. *地质学报*, 1999, 73(3): 193–205.
- [13] 杨经绥, 吴才来, 史仁灯. 阿尔金山米兰红柳沟的席状岩墙群: 海底扩张的重要证据[J]. *地质通报*, 2002, 21(2): 69–74.
- [14] 郭召杰, 张志诚, 王建君. 阿尔金山北缘蛇绿岩带的 Sm-Nd 等时线年龄及其大地构造意义[J]. *科学通报*, 1998, 43(18): 1981–1984.
- [15] 张志诚, 郭召杰, 宋彪. 阿尔金山北缘蛇绿混杂岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2009, 25(3): 568–576.
- [16] 修群业, 于海峰, 刘永顺, 等. 阿尔金山北缘枕状玄武岩的地质特征及其锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质学报*, 2007, 81(6): 787–794.
- [17] 刘函, 王国灿, 杨子江, 等. 恰什坎萨伊沟玄武岩年代学、地球化学特征及其对北阿尔金山洋盆闭合过程的制约[J]. *地质学报*, 2013, 87(1): 38–54.
- [18] 张新建, 孟繁聪, 于胜尧, 等. 北阿尔金山 HP/LT 蓝片岩和榴辉岩的 Ar-Ar 年代学及其区域构造意义[J]. *中国地质*, 2007, 34(4): 558–564.
- [19] 刘良, 车自成, 罗金海, 等. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义[J]. *科学通报*, 1996, 41(16): 1485–1488.
- [20] 王焰, 刘良, 车自成, 等. 阿尔金山地区早古生代蛇绿岩的地球化学特征[J]. *地质论评*, 1999, 45(增刊): 1010–1014.
- [21] 刘良, 车自成, 王焰, 等. 阿尔金山高压变质岩带的特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 1999, 15: 57–64.
- [22] Boynton W V. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies[C]//Henderson P. Rare earth element geochemistry. Elsevier, 1984, 2: 63–114.
- [23] 吴峻, 兰朝利, 李继亮, 等. 阿尔金山红柳沟蛇绿混杂岩中 MORB 与 OIB 组合的地球化学证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 2002, 21(1): 24–30.
- [24] Melson W G, Vallier T L, Wright T L, et al. The Geophysics of the Pacific Ocean Basin and Its Margin[C]//Chemical diversity of abyssal volcanic glass erupted along Pacific, Atlantic and Indian Ocean sea floor. Spreading Centers, 1976: 351–367.
- [25] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[C]//Thorpe R S. Andesite: Orogenic Andesite and Related Rocks. Chichester: Wiley, 1982: 525–548.
- [26] Wilson M. Igneous Petrogenesis[M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1–466.
- [27] Jakes P, White A J R. Major and trace element abundances in volcanic rocks of orogenic areas[J]. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 1972, 83: 29–40.
- [28] 夏林圻, 李向民, 余吉远, 等. 祁连山新元古代中—晚期至早古生代火山作用与构造演化[J]. *中国地质*, 2016, 43(4): 1087–1138.
- [29] 高晓峰, 校培喜, 过磊, 等. 北阿尔金山地区早古生代有限洋盆开启时限: 来自斜长花岗岩的证据[J]. *中国科学(D辑)*, 2012, 3: 359–368.
- [30] 王金荣, 宋春晖, 高军平, 等. 阿拉善北部格尔乌苏蛇绿混杂岩的形成机制[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1995, 31(2): 140–147.
- [31] 杨子江, 马华东, 王宗秀, 等. 阿尔金山北缘冰沟蛇绿混杂岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(7): 2269–2276.