

# 东天山雅满苏组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义

罗 婷<sup>1</sup>, 廖群安<sup>1\*</sup>, 陈继平<sup>1</sup>, 张雄华<sup>1</sup>, 郭东宝<sup>2</sup>, 胡兆初<sup>3</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 甘肃省有色金属地质勘查局兰州矿产勘查院, 甘肃兰州 730000

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 报道了东天山觉罗塔格构造带中雅满苏组火山岩的地球化学特征和年代学结果, 通过岩石学、同位素年代学及地球化学研究显示:(1)雅满苏组火山岩由玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩以及火山碎屑岩组成, 以钙碱性系列为主。火山岩地球化学特征及捕获锆石年龄指示雅满苏组火山岩形成于具有古老基底的陆源弧环境;(2)东天山觉罗塔格构造带雅满苏组火山岩LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谱和年龄为东段  $348.0 \pm 1.7$  Ma(MSWD=1.15)、中段  $335.9 \pm 2.4$  Ma(MSWD=1.03)、西段  $334.0 \pm 2.5$  Ma (MSWD=1.02), 雅满苏组火山岩整体形成于早石炭世, 但东段形成时间早于西段;(3)东天山雅满苏岛弧带形成时期东段早于中段和西段, 东天山石炭纪时的俯冲事件可能是由东部先开始, 依次到中部、西部, 俯冲形式类似于“剪刀”闭合的过程。

**关键词:** 觉罗塔格; 雅满苏组; 锆石 U-Pb 年龄; “剪刀”式闭合; 地球化学; 岩石学。

中图分类号: P588.14

文章编号: 1000-2383(2012)06-1338-15

收稿日期: 2012-07-19

## LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Volcanic Rocks from Yamansu Formation in the Eastern Tianshan, and Its Geological Significance

LUO Ting<sup>1</sup>, LIAO Qun-an<sup>1\*</sup>, CHEN Ji-ping<sup>1</sup>, ZHANG Xiong-hua<sup>1</sup>, GUO Dong-bao<sup>2</sup>, HU Zhao-chu<sup>3</sup>

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Gansu Non-Ferrous Metal Geological Exploration Bureau, Lanzhou 730000, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** This paper presents the geochemical characteristics and isotope chronology of volcanics from Yamansu Formation, occurring in Jueluotage tectonic belt in the eastern Tianshan of China. Petrological, isotope chronology and geochemical features of these volcanic rocks show that: (1) Yamansu Formation is composed of basite-mesite-acidic volcanic rock, pyroclastic rocks and pyroclastic sedimentary rocks. And it is mainly of calc-alkaline series. The geochemical characteristics demonstrated and inherited zircon age suggests that Yamansu volcanic rocks were formed at arc settings with continental basement. (2) In situ zircon U-Pb LA-ICP-MS dating on the zircon of Yamansu Formation yielded an age of  $348.0 \pm 1.7$  Ma (MSWD=1.15) in the eastern section,  $335.9 \pm 2.4$  Ma(MSWD=1.03) in the middle and  $334.0 \pm 2.5$  Ma (MSWD=1.02) in the western section, which stands for volcanic age. (3) The magmatic activity started from the east and then developed to the middle and western sections, like the close of scissors.

**Key words:** Jueluotage tectonic belt; Yamansu Formation; zircon U-Pb dating; close of “scissors”; geochemistry; petrology.

东天山觉罗塔格构造带位于东天山北部, 带内发育大量石炭纪火山岩, 其分布主要受康古尔塔格

和阿奇克库都克断裂控制(图 1), 北至吐哈盆地南缘, 南至阿奇克库都克断裂, 西起托克逊、东至甘肃

基金项目: 中国地质调查局地质调查工作项目(No. 1212011085469).

作者简介: 罗婷(1987—), 女, 在读硕士, 主要从事岩浆岩研究. E-mail: 179175768@qq.com

\* 通讯作者: 廖群安, E-mail: qanliao@cug.edu.cn

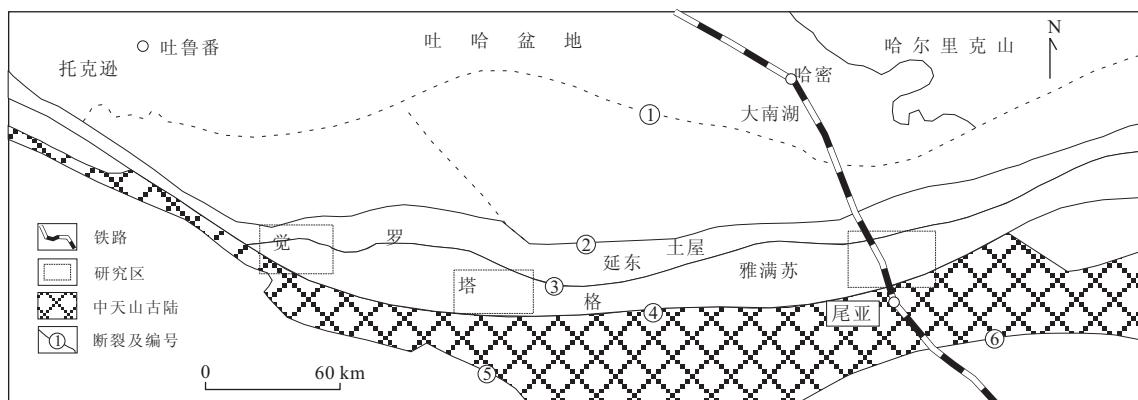


图1 东天山及邻区大地构造图(据冯益民等,2002)

Fig. 1 Tectonic map of the southern East Tianshan and its adjacent areas

①隐伏断裂;②康古尔塔格—黄山断裂;③雅满苏断裂;④阿奇克库都克断裂;⑤星星峡断裂;⑥中天山南缘断裂

与新疆的交界位置。有学者认为觉罗塔格构造带是石炭纪造山后拉伸的裂谷,雅满苏组可能形成于拉张背景(肖序常等,1992;夏林圻等,2002,2004,2009,Xia *et al.*, 2003);成守德等(1986)则认为雅满苏组为有限洋盆;芮宗瑶等(2002)认为雅满苏为典型的裂陷槽;姬金生等(1994)认为觉罗塔格构造带是塔里木板块和准噶尔板块的缝合带,在古生代发生双向俯冲,并且在石炭纪时存在着沟弧盆体系,南北两侧分别形成雅满苏岛弧和大南湖—头苏泉岛弧(姬金生等,1994;周济元等,1994;杨兴科等,1996;侯广顺等,2006);马瑞士等(1993)认为雅满苏组为塔里木板块北缘的岛弧,与博格达岛弧相对应,其间是康吉尔弧间盆地,俯冲带为卡拉麦里蛇绿岩带。

本文就觉罗塔格构造带中雅满苏组火山岩岩相学、年代学及岩石地球化学方面进行了研究,并讨论了该组火山岩产出的构造环境。对雅满苏组火山岩的研究有助于解决本区的成矿地质背景问题,对恢

复古生代期间古亚洲洋的构造演化也具有重要的意义。

## 1 区域地质背景

东天山雅满苏组火山岩位于东天山觉罗塔格构造带内(图2),据新疆东天山1:25万区域地质调查报告,该带从北向南主要出露的火山岩地层依次为脐山组( $C_2qs$ )、底坎儿组( $C_2d$ )、梧桐窝子组( $C_2w$ )、干墩组( $C_2g$ )、雅满苏组( $C_1y$ )和土古土布拉克组( $C_2tg$ )。脐山组( $C_2qs$ )和底坎儿组( $C_2d$ ),由原来的企鹅山群解体而来(李永军等,2008),脐山组( $C_2qs$ )位于觉罗塔格构造带北部,主要为一套基性—中酸性火山碎屑岩夹中—基性火山熔岩建造,分布于康吉尔塔格大断裂两侧,呈东西向断片状产出,断片内石炭纪、二叠纪侵入岩较为发育。底坎儿组( $C_2d$ )主要为一套火山岩,下段为凝灰岩夹砾岩、灰岩,上段主要为安山岩、玄武岩,次为火山碎屑岩流

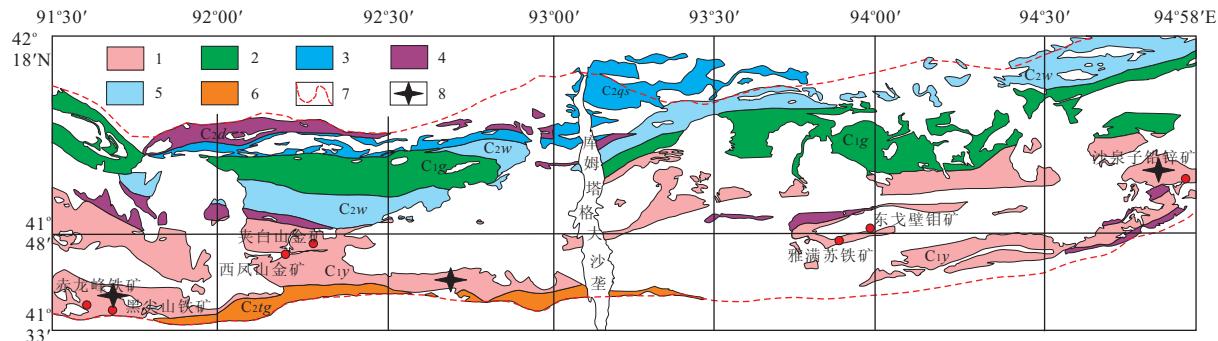


图2 东天山石炭纪火山岩分布简图(据新疆东天山1:25万区域地质调查图改编)

Fig. 2 Simplified map of volcanic rocks in the East Tianshan

1.  $C_1y$  雅满苏组;2.  $C_1g$  干墩组;3.  $C_2qs$  脐山组;4.  $C_2d$  底坎儿组;5.  $C_2w$  梧桐窝子组;6.  $C_2tg$  土古土布拉克组;7. 断裂;8. 采样点

纹岩, 沿康古尔塔格断裂东西向零星分布, 底界与下伏雅满苏组( $C_1y$ )整合接触。梧桐窝子组( $C_2w$ )为一套深海相火山碎屑岩及碎屑岩, 夹杂洋壳残片及陆缘碎屑岩, 东西延伸分布于脐山组( $C_2qs$ )与雅满苏组( $C_1y$ )之间, 有资料显示其可能为蛇绿混杂岩带(贺军慧等, 2005)。干墩组( $C_1g$ )为一套海相火山—沉积建造, 由爆发相及火山碎屑沉积岩和正常碎屑沉积岩组成, 呈近东西向微向南凸的弧形带状展布, 与梧桐窝子组( $C_2w$ )呈断裂接触。雅满苏组北侧以雅满苏断裂为界(图 1), 南侧以阿其克库都克—沙泉子断裂为界与中天山古隆起带相隔, 其火山岩主要由玄武岩—安山岩—流纹岩系列及火山碎屑岩组成, 夹在晚石炭统梧桐窝子组( $C_2w$ )、早石炭统干墩组( $C_1g$ )和上石炭土古土布拉克组( $C_2tg$ )之间, 呈整合过渡或断裂相接, 东西向延伸。据前人资料雅满苏组火山岩形成于早石炭世, 以钙碱性系列为主(侯广顺等, 2006)。土古土布拉克组火山岩( $C_2tg$ )主要分布于阿奇克库都克断裂两侧, 北与雅满苏组相接, 南连中天山古陆, 东西向延伸, 岩石以中基性的熔岩和中酸性的火山碎屑岩为主(宋安江等, 2006; 吴春伟等, 2008)。

## 2 岩相学特征

根据野外观察和采样, 镜下薄片鉴定和岩石化学全分析结果, 确认雅满苏组火山岩的岩石类型主要为玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩以及英安岩和同成分火山凝灰岩。

**玄武岩:** 灰绿色—灰黑色, 斑状结构, 气孔—杏仁构造(图 3a)。斑晶为斜长石和辉石。斜长石斑晶半自形板状, 有绿帘石化; 辉石斑晶半自形—它形, 多蚀变为绿泥石。基质为玻基交织结构, 斜长石微粒与玻璃质微粒均匀分布。

**安山岩:** 灰色—灰绿色, 斑状结构, 气孔—杏仁构造。发育不规则气孔, 部分被方解石、绢云母、石英充填。斑晶为斜长石、辉石(图 3b)和少量黑云母。斜长石斑晶半自形板状, 聚片双晶发育, 最大消光角  $Np' \wedge (010) = 26^\circ$ , 多为中长石, 表面偶有绢云母化; 辉石斑晶半自形—它形, 黑云母斑晶零星分布, 发生绿泥石化。基质为交织结构、玻基交织结构、微粒—细粒间粒结构, 由斜长石微晶、辉石微粒、铁质微粒、玻璃质构成。斜长石微晶长轴定向排列, 暗色玻璃质和铁质微粒充填于斜长石间隙。

**英安岩:** 灰紫色, 斑状结构, 块状构造, 斑晶为斜

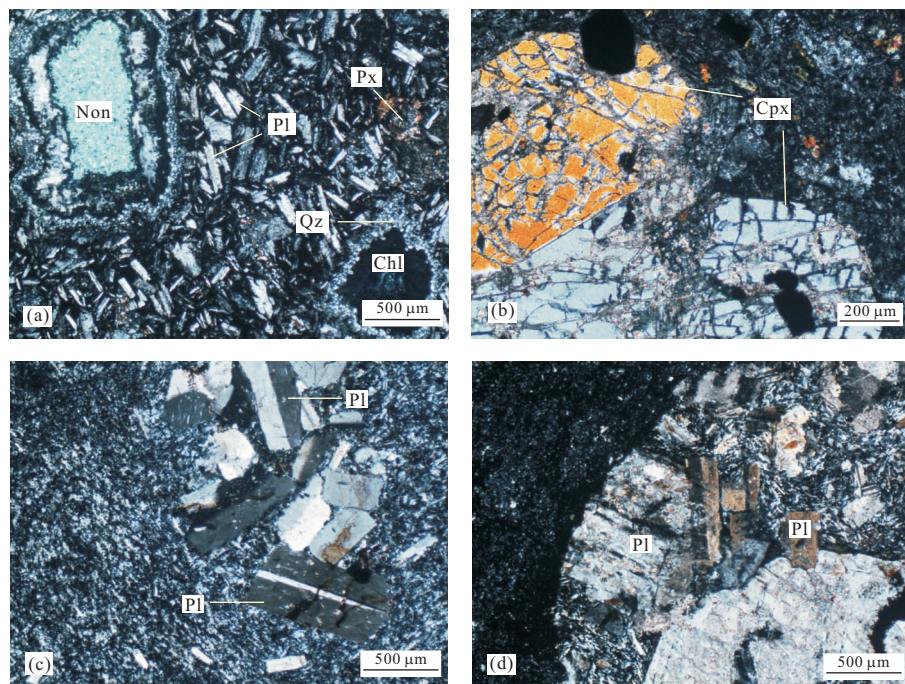


图 3 雅满苏组火山岩显微照片

Fig. 3 Petrographic characteristics of the Carboniferous volcanic rocks from Yamansu Formation

a. 玄武岩中绿脱石与绿泥石充填杏仁体(+); b. 辉石安山岩中单斜辉石(+); c. 英安岩中斜长石斑晶(+); d. 岩屑凝灰岩中安山质岩屑(+); Pl. 斜长石; Non. 绿脱石; Chl. 绿泥石; Px. 辉石; Cpx. 单斜辉石; Qz. 石英

长石(图3c)和少量石英。斜长石斑晶自形一半自形板状,石英斑晶它形,多呈浑圆状。基质为玻晶交织结构,由长英质矿物和玻璃质构成。

**流纹岩:**灰色,斑状结构,块状构造,流动构造。斑晶为斜长石和石英。斜长石斑晶它形粒状,有不清晰的聚片双晶,最大消光角  $N_p \wedge (010) = 16^\circ$ ,为更长石;少量石英斑晶浑圆状。基质为球粒结构。

**凝灰岩和凝灰熔岩:**凝灰结构,熔结结构,块状构造,岩石由晶屑、岩屑、玻屑经凝灰质胶结组成(图3d)(有时三者皆有,有时有其二,或其一)。晶屑主要是石英和斜长石,多呈棱角状;岩屑主要为安山岩和粗安岩屑;玻屑呈弧面棱角状,已脱玻成硅质或被碳酸盐矿物取代。

### 3 锆石 U-Pb 年代学

#### 3.1 同位素年龄样品与分析方法

本文的3件同位素年龄样品分别采自东天山雅满苏组火山岩地层东段、中段和西段,分别为发生微弱蚀变的英安岩(SQ1-1)、英安岩(1050-1)和流纹岩(HJS1-1),具体位置见图2。

3件样品的粉碎加工以及锆石分离挑选由河北廊坊诚信地质服务公司完成。锆石年龄在西北大学大陆动力学实验室的LA-ICP-MS上测定,分析仪器为ELAN6100DRC型四级杆质谱仪和Geolas 200M型激光剥蚀系统,激光器为193 nm ArF准分子激光器,单脉冲能量210 mJ;最高重复频率20 Hz,平均功率4 W。经光学系统匀光和聚焦,到达样品表面的激光束具有平顶(fat top)的特点,对不同斑束可以提供相同的能量密度,最高能量密度可达20 J/cm<sup>2</sup>。锆石年龄计算采用国际标准锆石91500作为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃NIST SRM610作为外标,<sup>29</sup>Si作为内标进行计算。测试结果通过ICPMsData-Cal软件计算得出<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb、<sup>207</sup>Pb/<sup>205</sup>Pb、<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U这3组同位素比值、年龄及其误差,锆石标准样91500的U-Th-Pb同位素比值推荐值据Wiedenbeck *et al.* (1995)。锆石样品的U-Pb年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用Isoplot(Ludwig, 2003)完成。同位素比值误差为2,加权平均年龄均具有95%以上的置信度。

#### 3.2 锆石 U-Pb 年龄

根据每个测年样品锆石的情况,本文选定透射光、反射光和阴极发光照片均显示锆石颗粒形状规

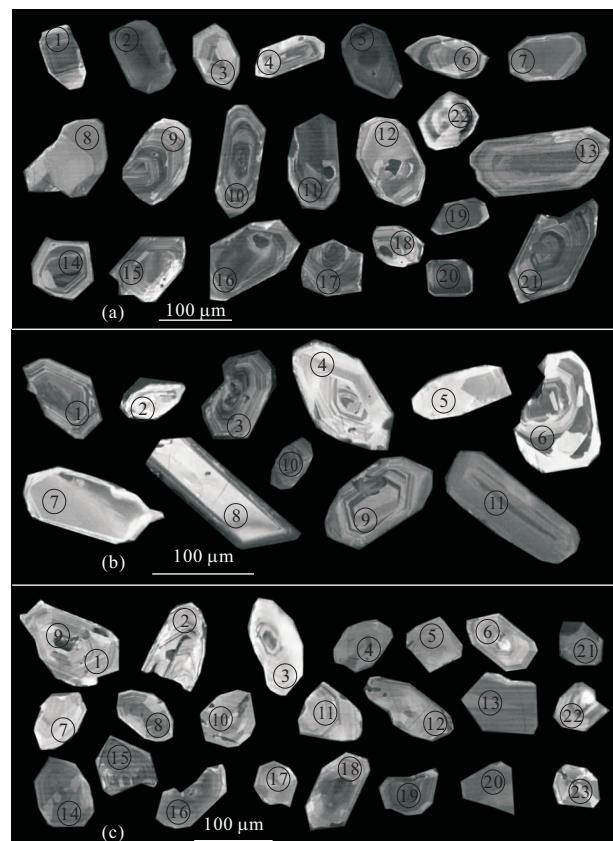


图4 东天山雅满苏组火山岩锆石阴极发光(CL)照片  
Fig. 4 CL images of zircon for volcanic rocks from Yaman-su Formation in eastern Tianshan  
a. SQ1-1 东段英安岩; b. 1050-1 中段英安岩; c. HJS1-1 西段流纹岩

则、晶形较完整的锆石进行同位素测试,测试的单颗粒锆石有效点数分别为东天山东段雅满苏组(SQ1-1)样品22个、中段雅满苏组(1050-1)样品11个、西段雅满苏组(HJS1-1)样品23个,锆石样品个别显示有脆性断口,锆石均具有明显的岩浆结晶环带,没有后期蚀变的痕迹。测试同位素样品锆石阴极发光(CL)图像和测点位置见图4。测试结果见表1,对3件样品锆石进行的激光探针等离子体质谱(LA-ICP-MS)U-Pb微区同位素分析得到的<sup>232</sup>Th/<sup>238</sup>U比值均在0.34~1.30之间,与变质锆石<sup>232</sup>Th/<sup>238</sup>U值(通常小于0.1)(Vavra *et al.*, 1999)明显不同,表明这些锆石为岩浆锆石。东天山雅满苏组火山岩锆石U-Pb同位素年龄谐和图及加权平均年龄图(图5)显示,东天山东段雅满苏组英安岩(SQ1-1)的谐和年龄为348.0±1.7 Ma(MSWD=1.15),中段雅满苏组英安岩(1050-1)的谐和年龄为335.9±2.4 Ma(MSWD=1.03),西段雅满苏组流纹岩的谐和年龄为334.0±2.5 Ma(MSWD=1.02),年龄数据集中在334~348 Ma之间,测点位置与年龄值大

表1 东天山雅满苏组火山岩锆石LA-ICP-MS U-Th-Pb同位素分析结果  
Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotopic data of zircon from Yamansu Formation

测点号	元素含量( $\times 10^{-6}$ )			同位素比值			同位素年龄(Ma)							
	Total Pb	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
SQ1-01	23.30	315.0	319.0	0.99	0.0526	0.0008	0.4011	0.0069	0.0550	0.0003	342	5	345	2
SQ1-02	21.38	201.0	317.0	0.63	0.0560	0.0014	0.4277	0.0101	0.0555	0.0004	362	7	348	3
SQ1-03	10.53	70.2	153.0	0.46	0.0579	0.0014	0.4279	0.0105	0.0552	0.0007	362	7	346	4
SQ1-04	15.19	122.0	216.0	0.57	0.0689	0.0015	0.5139	0.0113	0.0552	0.0006	421	8	346	4
SQ1-05	13.82	130.0	198.0	0.66	0.0567	0.0013	0.4281	0.0097	0.0553	0.0004	362	7	347	2
SQ1-06	14.67	125.0	208.0	0.60	0.0659	0.0017	0.4712	0.0122	0.0558	0.0015	392	8	350	9
SQ1-07	11.09	102.0	156.0	0.65	0.0620	0.0016	0.4802	0.0119	0.0561	0.0004	398	8	352	2
SQ1-08	5.61	47.3	85.4	0.55	0.0566	0.0018	0.4239	0.0133	0.0542	0.0005	359	9	340	3
SQ1-09	7.54	64.6	110.0	0.59	0.0550	0.0014	0.4274	0.0109	0.0558	0.0005	361	8	350	3
SQ1-10	16.57	171.0	227.0	0.76	0.0585	0.0016	0.4249	0.0114	0.0558	0.0013	360	8	350	8
SQ1-11	20.31	222.0	300.0	0.74	0.0521	0.0012	0.4068	0.0115	0.0554	0.0005	347	8	347	3
SQ1-12	5.16	45.5	68.6	0.66	0.0579	0.0021	0.4202	0.0159	0.0556	0.0011	356	11	349	7
SQ1-13	9.84	85.2	133.0	0.64	0.0635	0.0020	0.4613	0.0151	0.0556	0.0012	385	10	349	7
SQ1-14	40.20	405.0	509.0	0.79	0.0533	0.0034	0.4222	0.0261	0.0574	0.0013	358	19	360	7
SQ1-15	40.40	324.0	519.0	0.62	0.0652	0.0043	0.5017	0.0313	0.0563	0.0010	413	21	353	6
SQ1-16	42.10	403.0	550.0	0.73	0.0516	0.0033	0.3954	0.0250	0.0567	0.0013	338	18	356	8
SQ1-17	55.10	498.0	705.0	0.71	0.0536	0.0030	0.4207	0.0226	0.0565	0.0009	357	16	355	6
SQ1-18	47.90	666.0	607.0	0.77	0.0541	0.0030	0.4122	0.0228	0.0548	0.0010	350	16	344	6
SQ1-19	52.40	602.0	630.0	0.96	0.0520	0.0033	0.4003	0.0251	0.0558	0.0009	342	18	350	5
SQ1-20	70.50	838.0	803.0	1.04	0.0585	0.0029	0.4608	0.0230	0.0568	0.0009	385	16	356	5
SQ1-21	33.00	182.0	442.0	0.41	0.0602	0.0043	0.4581	0.0295	0.0566	0.0011	383	21	355	7
SQ1-22	29.50	274.0	382.0	0.72	0.0573	0.0044	0.4307	0.0309	0.0565	0.0012	364	22	354	7
HJSI-01	6.00	42.8	84.2	0.51	0.0948	0.0028	0.7161	0.0251	0.0544	0.0006	548	15	341	4
HJSI-02	8.90	102.8	130.0	0.79	0.0643	0.0025	0.4528	0.0150	0.0527	0.0008	379	10	331	5
HJSI-03	4.80	47.1	75.4	0.62	0.0717	0.0030	0.4879	0.0230	0.0519	0.0028	404	16	326	17
HJSI-04	6.30	69.7	79.7	0.87	0.0725	0.0028	0.5113	0.0206	0.0541	0.0009	419	14	340	5
HJSI-05	6.10	50.4	80.8	0.62	0.1108	0.0033	0.7897	0.0251	0.0532	0.0007	591	14	334	4
HJSI-06	8.90	93.8	104.2	0.90	0.0709	0.0023	0.4859	0.0163	0.0543	0.0014	402	11	341	9
HJSI-07	5.90	64.6	91.9	0.70	0.0958	0.0038	0.6806	0.0324	0.0517	0.0011	527	20	325	6
HJSI-08	11.00	134.4	145.4	0.92	0.0556	0.0016	0.3929	0.0110	0.0536	0.0009	336	8	337	6
HJSI-09	9.70	102.7	121.6	0.85	0.0624	0.0018	0.4296	0.0120	0.0537	0.0009	363	9	337	6
HJSI-10	6.60	64.4	90.3	0.71	0.0691	0.0023	0.4807	0.0175	0.0540	0.0013	399	12	339	8
HJSI-11	5.00	44.3	63.4	0.70	0.1259	0.0037	0.9274	0.0285	0.0535	0.0006	666	15	336	3
HJSI-12	11.30	160.5	157.3	1.02	0.0590	0.0018	0.4055	0.0125	0.0524	0.0010	346	9	329	6
HJSI-13	7.10	65.2	98.6	0.66	0.0591	0.0019	0.4135	0.0131	0.0533	0.0010	351	9	335	6
HJSI-14	6.40	56.2	83.6	0.67	0.0906	0.0057	0.6318	0.0384	0.0510	0.0012	497	24	321	8
HJSI-15	3.50	31.5	50.6	0.62	0.1079	0.0098	0.7610	0.0689	0.0510	0.0015	575	40	321	9
HJSI-16	9.40	104.9	93.6	1.12	0.1436	0.0109	1.0733	0.0799	0.0549	0.0013	740	39	345	8
HJSI-17	3.90	34.0	53.1	0.64	0.1278	0.0141	0.8853	0.1061	0.0515	0.0017	644	57	324	10
HJSI-18	9.60	134.3	117.8	1.14	0.0787	0.0059	0.5413	0.0382	0.0531	0.0013	439	25	334	8

续表 1

测点号	元素含量( $\times 10^{-6}$ )			元素比值			同位素比值			同位素年龄(Ma)				
	Total Pb	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
HJSI-19	16.4	271.7	208.3	1.30	0.054 6	0.003 3	0.396 6	0.025 2	0.053 0	0.001 3	339	18	333	8
HJSI-20	16.8	250.5	200.9	1.25	0.056 4	0.003 4	0.403 7	0.024 1	0.051 8	0.001 0	344	17	326	6
HJSI-21	9.9	112.6	137.4	0.82	0.083 9	0.019 6	0.595 3	0.143 4	0.051 6	0.001 4	474	92	324	8
HJSI-22	8.0	106.0	107.7	0.98	0.072 1	0.005 1	0.518 4	0.036 9	0.052 7	0.001 7	424	25	331	10
HJSI-23	5.9	64.7	78.6	0.82	0.075 9	0.006 0	0.537 8	0.042 8	0.051 6	0.001 5	437	28	324	9
HJSI-24	16.3	142.3	248.7	0.57	0.057 2	0.001 3	0.422 9	0.010 9	0.053 7	0.000 5	358	8	337	3
1050-01	42.4	422.0	574.0	0.74	0.105 9	0.003 7	0.791 6	0.037 0	0.053 0	0.000 6	592	21	333	4
1050-02	43.4	1603.3	1956.2	0.82	0.055 5	0.001 0	0.405 5	0.008 0	0.053 0	0.000 4	346	6	333	2
1050-03	19.6	209.3	283.0	0.74	0.056 4	0.001 3	0.421 5	0.011 2	0.054 2	0.000 5	357	8	340	3
1050-04	4.7	48.4	69.4	0.70	0.054 4	0.002 7	0.396 5	0.018 9	0.054 0	0.000 7	339	14	339	4
1050-05	9.7	87.8	147.3	0.60	0.059 5	0.002 1	0.427 4	0.014 8	0.053 8	0.000 7	361	10	338	4
1050-06	6.7	55.0	74.7	0.74	0.064 4	0.003 2	0.455 2	0.022 1	0.054 5	0.000 9	381	15	342	5
1050-07	4.1	21.9	63.1	0.35	0.074 5	0.005 9	0.563 8	0.053 2	0.053 8	0.001 6	454	35	338	10
1050-08	5.6	50.9	72.2	0.70	0.082 6	0.007 5	0.601 1	0.051 7	0.053 7	0.001 5	478	33	337	9
1050-09	13.4	174.3	174.6	1.00	0.055 8	0.003 6	0.386 4	0.022 1	0.051 5	0.002 1	332	16	324	13
1050-10	6.6	40.1	99.8	0.40	0.074 8	0.006 9	0.524 9	0.050 5	0.051 3	0.001 1	428	34	323	7
L01-01	436.9	415.8	698.5	0.60	0.213 0	0.001 4	14.311 3	0.174 2	0.487 0	0.002 9	2771	12	2558	13
L01-02	194.2	410.8	676.5	0.61	0.092 6	0.003 1	3.075 0	0.119 4	0.238 0	0.006 0	1426	30	1376	31
L01-03	146.3	324.4	503.2	0.64	0.092 3	0.000 6	2.966 0	0.039 2	0.232 2	0.001 8	1399	10	1346	10
L01-04	18.0	76.7	48.3	1.59	0.087 7	0.004 5	2.691 8	0.141 1	0.219 8	0.004 1	1326	39	1281	22
L01-05	275.0	125.9	1582.0	0.08	0.073 9	0.000 7	1.724 1	0.025 5	0.169 0	0.001 1	1018	10	1006	6
L01-06	93.0	136.0	469.3	0.29	0.068 4	0.002 1	1.523 3	0.047 1	0.158 2	0.002 3	940	19	947	13
L01-07	167.6	927.7	859.6	1.08	0.072 3	0.000 9	1.485 8	0.022 9	0.149 0	0.001 0	925	9	896	6
L01-08	623.0	451.6	3881.4	0.12	0.075 1	0.000 6	1.593 6	0.020 0	0.153 5	0.000 8	968	8	921	4
L01-09	14.3	98.6	102.2	0.96	0.060 3	0.003 6	0.799 3	0.046 5	0.094 4	0.001 9	596	26	582	11
L01-10	23.4	157.6	205.7	0.77	0.060 2	0.002 2	0.750 4	0.027 7	0.090 8	0.000 8	568	16	560	5
L01-11	42.7	168.3	399.3	0.42	0.061 1	0.001 4	0.768 8	0.024 3	0.090 8	0.001 8	579	14	560	11
L01-12	93.4	398.2	850.9	0.47	0.070 5	0.003 5	0.888 7	0.048 4	0.090 9	0.000 6	646	26	561	3
L01-13	25.8	148.3	212.0	0.70	0.057 9	0.002 8	0.720 3	0.034 6	0.089 3	0.002 0	551	20	551	12
L01-14	16.3	57.9	172.2	0.34	0.060 5	0.001 4	0.720 6	0.019 1	0.086 0	0.000 6	551	11	532	4
L01-15	24.5	128.0	220.5	0.58	0.061 1	0.003 0	0.700 1	0.035 7	0.081 2	0.001 8	539	21	503	10
L01-16	55.5	46.5	757.3	0.06	0.057 6	0.000 6	0.569 6	0.008 5	0.071 4	0.000 5	458	5	445	3
L01-17	151.5	897.9	1864.0	0.48	0.056 6	0.000 8	0.543 8	0.009 0	0.069 6	0.000 4	441	6	434	3
L01-18	5.0	74.1	49.8	1.49	0.072 4	0.003 6	0.644 8	0.031 7	0.066 0	0.000 9	505	20	412	6
L01-19	10.2	41.1	121.3	0.34	0.065 4	0.002 2	0.560 1	0.019 7	0.066 1	0.001 3	452	13	413	8
L01-20	4.3	23.2	55.6	0.42	0.062 5	0.003 0	0.562 3	0.027 3	0.065 7	0.000 8	453	18	410	5
L01-21	10.3	73.5	124.3	0.59	0.060 1	0.004 5	0.522 6	0.037 5	0.063 3	0.001 2	427	25	396	7
L01-22	263.5	1745.6	3767.3	0.46	0.056 4	0.000 5	0.471 0	0.006 2	0.060 4	0.000 4	392	4	378	3
L01-23	117.9	1443.8	1236.9	1.17	0.057 4	0.002 8	0.554 6	0.027 2	0.068 5	0.001 0	448	18	427	6
L01-24	88.5	839.8	1030.7	0.81	0.056 8	0.003 3	0.493 4	0.026 4	0.062 7	0.001 1	407	18	392	7

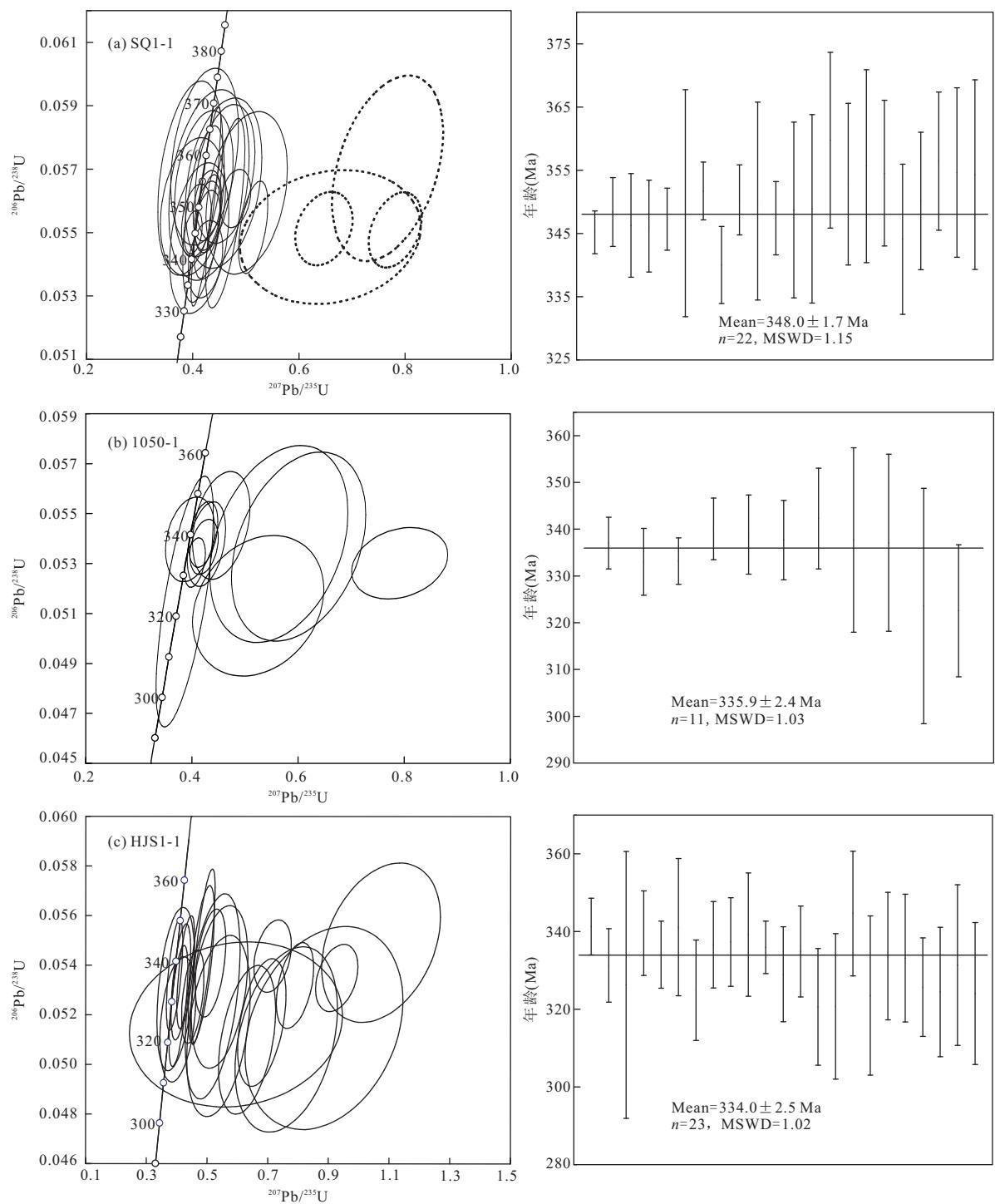


图5 东天山雅满苏组火山岩锆石U-Pb同位素年龄谐和图及加权平均年龄图

Fig. 5 LA-ICP-MS U-Pb zircon concordia diagram and weighted mean age for volcanic rocks from Yamansu Formation in eastern Tianshan

a. SQ1-1 东段英安岩; b. 1050-1 中段英安岩; c. HJS1-1 西段流纹岩

小无明显的直接关系。3个年龄样品均显示东天山雅满苏组火山岩形成时代为早石炭世。另外,笔者在雅满苏火山岩地层中发现了大量的捕获锆石,U-Pb同位素年龄谐和图、年龄分布曲线、阴极发光(CL)

照片及测点位置见图6,锆石大多具有明显的岩浆结晶环带,除2个测点 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 比值小于0.1,其余均在0.30~1.58之间,表明这些锆石为岩浆锆石(Vavra *et al.*, 1999)。捕获锆石年龄分布范围大,

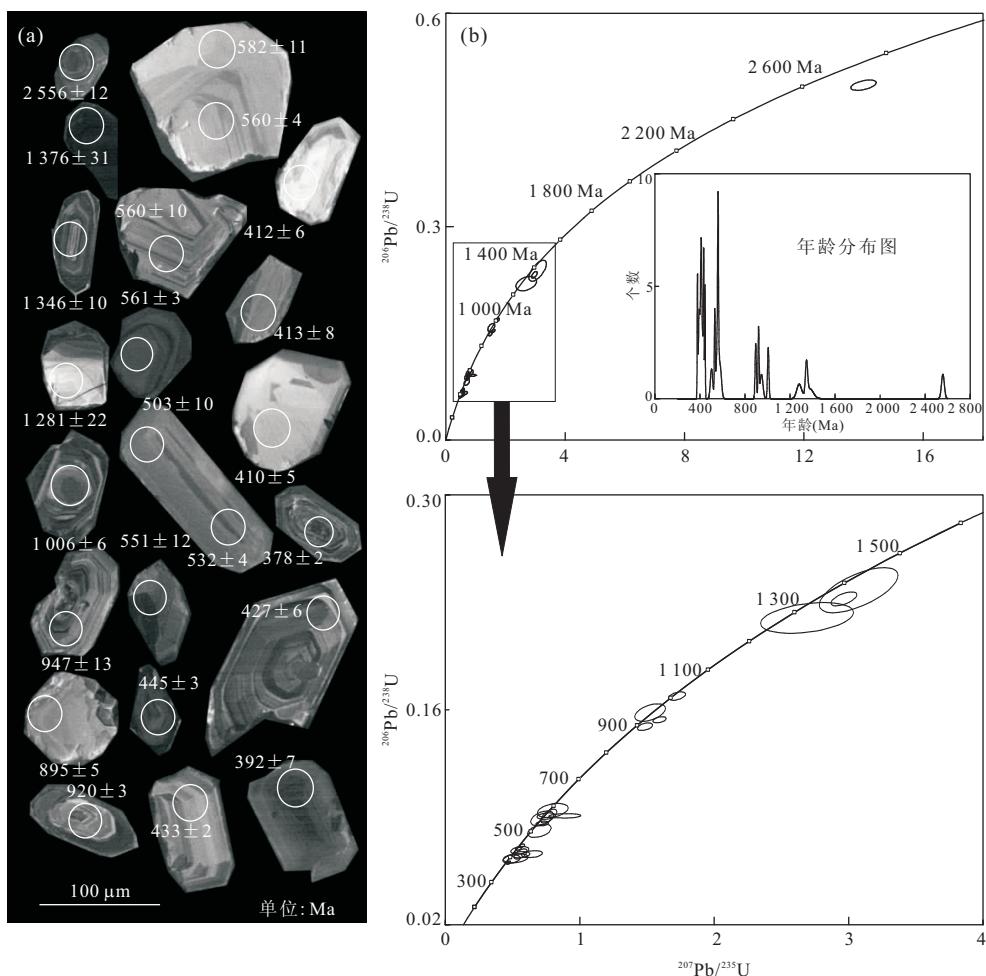


图 6 东天山雅满苏组火山岩捕获锆石(L01)阴极发光(CL)照片(a)及 U-Pb 同位素年龄谐和图解(b)

Fig. 6 CL images (a) and LA-ICP-MS U-Pb zircon age concordia diagram (b) for inherited zircon L01 from Yamansu Formation volcanic rocks in eastern Tianshan

年龄分布曲线分别在约 410、530、910、1 400 Ma 出现峰值,最大的年龄为约 2 556 Ma。

## 4 岩石地球化学特征

### 4.1 测试方法

笔者在详细的岩相学观察基础上,选择新鲜无脉体交代的样品,并对样品进行了仔细清洗和杏仁体的清除。一共测试了 17 件火山岩样品,主微量元素测试由澳实矿物实验室(ALS Chemex)完成,采用 ME-ICP85 分析方法;微量元素采用 ME-MS61 分析方法;稀土元素采用 ME-MS81 分析方法;亚铁分析采用 Fe-VOL05 方法,酸消解,重铬酸钾滴定测量。Muller *et al.* (1992) 和 Carr (1998) 认为火山岩 5% 的烧失量可作为划分新鲜样品和蚀变样品的界限。雅满苏组火山岩的烧失量除样品 SQ3-2 为

8.16%,其余均在 1.43%~4.47% 之间,平均 3.17%,属新鲜的样品。

### 4.2 主量元素地球化学特征

东天山觉罗塔格构造带早石炭世雅满苏组火山岩的主量元素分析结果见表 2。在 17 件样品中,5 件样品  $\omega(\text{SiO}_2)$  在 44%~55% 之间,属于基性岩类;7 件样品  $\omega(\text{SiO}_2)$  在 55%~63% 之间,属于中性岩类;5 件样品  $\omega(\text{SiO}_2) > 63\%$ , 属于酸性岩类。在火山岩 Nb/Y-SiO<sub>2</sub> 图解(图 7a)中,Nb/Y 比值都小于 0.8, 属于亚碱性系列(Winchester and Floyd, 1977)。所有样品  $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$  在 12.66%~19.24% 之间,与俯冲带火山岩的富铝特征一致。 $\omega(\text{MgO})$  除 1 件玄武岩样品较高为 9.75% 外,其余均在 0.90%~3.83% 之间, $\omega(\text{FeO}_t)$  分布范围较广,在 2.17%~10.03% 之间,且随着 SiO<sub>2</sub> 含量增加呈降低趋势。 $\omega(\text{TiO}_2)$  主体在 0.48%~1.44% 之间,平均值为 0.95%,与典型的岛弧与陆缘弧相似。CaO 变化于 1.66%~

表2 东天山觉罗塔格构造带雅满苏组火山岩主量、微量元素分析结果(%)

Table 2 Major element compositions of volcanic rocks from Yamansu Formation

样品号 岩石名称	SQ3-2	1274-3	SQ4-1	SQ4-3	1274-4	SQ2-9	1098-1	SQ4-5	SQ2-8	SQ2-1	SQ2-2	SQ2-5	SQ1-1	1050-2	1050-3	SQ4-4	1090-2	英安岩
	玄武岩			辉石安山岩				安山岩		凝灰岩								英安岩
SiO <sub>2</sub>	44.93	51.86	53.18	53.75	54.10	57.69	57.35	59.40	59.97	58.54	60.50	61.97	64.38	65.43	67.67	67.51	71.56	
TiO <sub>2</sub>	1.44	1.11	0.65	0.64	0.97	0.88	1.96	0.64	1.17	1.12	1.23	1.02	0.70	0.99	0.76	0.48	0.31	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.20	19.24	18.86	18.99	14.88	15.03	14.12	16.39	14.51	13.9	14.55	14.15	16.15	13.52	13.63	15.21	12.66	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.09	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.50	1.42	1.04	1.07	1.23	0.92	1.23	0.68	1.04	0.90	1.08	0.80	0.64	0.81	0.80	0.33	0.37	
FeO	8.53	8.02	5.90	6.07	6.95	5.23	6.97	3.85	5.90	5.10	6.14	4.55	3.63	4.57	4.54	1.84	2.10	
MnO	0.3	0.10	0.17	0.17	0.31	0.09	0.16	0.06	0.12	0.16	0.13	0.11	0.16	0.12	0.06	0.07	0.11	
MgO	9.75	1.66	3.78	3.83	2.03	3.25	2.03	2.46	1.66	0.90	1.79	0.85	2.66	1.89	0.91	1.43	2.04	
CaO	4.42	2.77	6.10	5.21	3.03	4.06	3.53	3.45	2.51	5.38	1.85	3.36	3.11	2.17	1.54	1.66	0.48	
Na <sub>2</sub> O	1.16	4.02	3.52	3.92	0.16	4.47	5.21	5.84	6.51	6.46	6.35	6.01	3.70	5.47	7.13	2.54	1.90	
K <sub>2</sub> O	1.67	4.57	2.18	2.04	9.23	1.44	2.69	2.24	1.25	1.28	1.37	2.00	1.40	0.17	0.10	4.69	4.19	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.333	0.393	0.157	0.159	0.292	0.228	0.744	0.188	0.32	0.292	0.338	0.271	0.095	0.256	0.149	0.082	0.044	
SrO	0.01	0.02	0.04	0.05	0.01	0.04	0.03	0.03	0.01	0.01	0.04	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	
BaO	0.04	0.04	0.05	0.04	0.14	0.08	0.05	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.01	0.01	0.06	0.14	
LOI	8.16	2.71	3.60	3.27	3.95	4.24	1.83	2.85	2.58	4.47	2.12	3.31	2.09	2.96	1.43	2.39	1.93	
Total	97.54	97.94	99.24	99.21	97.29	97.67	97.91	98.14	97.59	98.55	97.53	98.46	98.80	98.40	98.75	98.32	97.86	
FeOt	10.03	9.44	6.95	7.14	8.18	6.15	8.20	4.53	6.94	6.00	7.23	5.35	4.27	5.37	5.34	2.17	2.47	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> t	11.15	10.49	7.72	7.93	9.09	6.84	9.11	5.04	7.71	6.67	8.03	5.95	4.75	5.97	5.94	2.41	2.74	
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	2.83	8.59	5.70	5.96	9.39	5.91	7.90	8.08	7.76	7.74	7.72	8.01	5.1	5.64	7.23	7.23	6.09	
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	0.69	0.88	1.61	1.92	0.02	3.10	1.94	2.61	5.21	5.05	4.64	3.01	2.64	32.18	71.30	0.54	0.45	
La	16.40	15.80	7.40	7.20	12.50	23.10	42.00	10.50	8.60	6.40	7.60	17.20	26.90	16.60	6.80	12.50	11.10	
Ce	38.40	34.90	15.60	15.50	31.30	46.20	98.60	25.80	22.30	17.20	19.80	39.70	69.10	41.20	17.50	28.90	27.10	
Pr	5.36	4.83	2.13	2.19	3.96	5.67	13.40	3.68	3.57	2.93	3.14	5.67	6.36	5.69	2.71	4.08	2.79	
Nd	23.60	21.50	9.90	10.10	17.80	23.30	57.70	15.90	17.50	15.50	26.00	25.80	26.00	13.10	17.80	11.10		
Sm	5.35	5.04	2.48	2.52	4.39	4.82	13.40	3.78	4.67	4.99	4.19	6.17	6.03	3.88	4.15	2.60		
Eu	1.59	1.51	0.89	0.91	1.50	1.39	3.61	1.40	1.27	1.39	1.08	1.74	1.74	1.58	1.18	0.85	0.65	

续表 2

样品号 岩石名称	SQ3-2	1274-3	SQ4-1	SQ4-3	1274-4	SQ2-9	1098-1	SQ4-5	SQ2-8	SQ2-1	SQ2-2	SQ2-5	SQ1-1	1050-2	1050-3	SQ4-4	1090-2
	玄武岩	辉石安山岩															
Gd	4.81	4.84	2.49	2.55	4.51	4.31	13.00	3.42	4.66	5.37	4.35	5.98	5.91	7.17	4.37	3.88	2.71
Tb	0.73	0.73	0.39	0.39	0.65	0.65	2.02	0.52	0.78	0.97	0.71	0.96	0.93	1.23	0.74	0.64	0.46
Dy	4.39	4.70	2.55	2.53	4.20	4.10	12.25	3.31	5.15	6.39	4.67	6.11	5.97	8.33	4.92	4.24	3.23
Ho	0.89	1.09	0.54	0.55	0.95	0.86	2.62	0.72	1.08	1.32	1.00	1.29	1.29	1.82	1.08	0.92	0.71
Er	2.57	3.48	1.60	1.63	2.94	2.47	7.26	2.17	3.09	3.78	3.01	3.66	3.96	5.55	3.26	2.93	2.28
Tm	0.35	0.58	0.23	0.23	0.45	0.34	1.09	0.32	0.44	0.53	0.44	0.53	0.59	0.80	0.48	0.47	0.34
Yb	2.22	3.79	1.54	1.60	2.91	2.21	6.81	2.12	2.90	3.39	2.94	3.32	4.05	5.31	3.14	3.31	2.47
Lu	0.35	0.65	0.25	0.26	0.46	0.34	1.07	0.34	0.44	0.48	0.46	0.52	0.65	0.84	0.47	0.55	0.41
Y	24.3	33.2	15.7	15.1	29.0	23.5	79.7	20.2	28.2	34.1	26.2	34.0	36.0	49.2	29.9	26.1	19.2
$\Sigma$ REE	131.31	136.64	63.69	63.26	117.52	143.26	354.53	94.18	104.65	104.74	95.49	152.85	195.28	177.95	93.53	111.32	87.15
Rb	55.8	164.5	56.2	55.0	270.0	30.4	69.6	54.2	18.6	22.0	22.9	42.4	111.5	2.1	1.7	149.0	129.0
Ba	400.0	477.0	445.0	358.0	1340.0	800.0	534.0	518.0	313.0	273.0	338.0	381.0	402.0	94.2	63.1	637.0	1270.0
Th	2.01	7.19	1.22	1.24	6.09	4.42	5.16	3.61	3.86	3.63	4.11	4.48	9.64	4.79	2.70	10.10	8.17
U	1.46	1.32	0.48	0.52	2.00	1.49	2.28	1.20	1.16	0.98	1.41	1.22	3.28	2.25	1.58	3.21	2.2
K	14 800	34 600	17 000	15 400	47 600	12 000	21 100	17 100	10 600	10 600	11 300	16 800	11 700	1 300	800	37 200	33 800
Nb	6.6	6.2	1.8	1.7	5.1	7.4	18	3	3.8	3.6	4.1	4.3	8.7	5.6	2.3	6.6	6.5
Ta	0.4	0.5	0.1	0.1	0.4	0.5	1.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.7	0.4	0.2	0.5	0.6
Pb	8	8	9	9	8	9	9	6	20	17	19	24	17	5	5	7	5
Sr	138.5	187.5	463.0	559.0	84.5	444.0	299.0	273.0	127.5	129.0	384.0	107.5	335.0	313.0	117.5	232.0	151.5
P	1 650	1 750	710	730	1 340	1 070	3 450	890	1 550	1 400	1 600	1 270	480	1 260	750	430	250
Zr	165	224	54	58	185	179	511	98	132	122	141	152	380	208	102	255	157
Hf	3.7	5.8	1.5	1.6	4.7	4.2	11.4	2.7	3.9	3.6	4.1	4.4	9.5	5.8	3.1	7.1	4.1
Ti	8 470	5 400	3 500	3 470	4 650	5 100	10 850	3 470	5 270	5 390	5 800	4 420	3 890	5 610	4 380	2 410	1 910

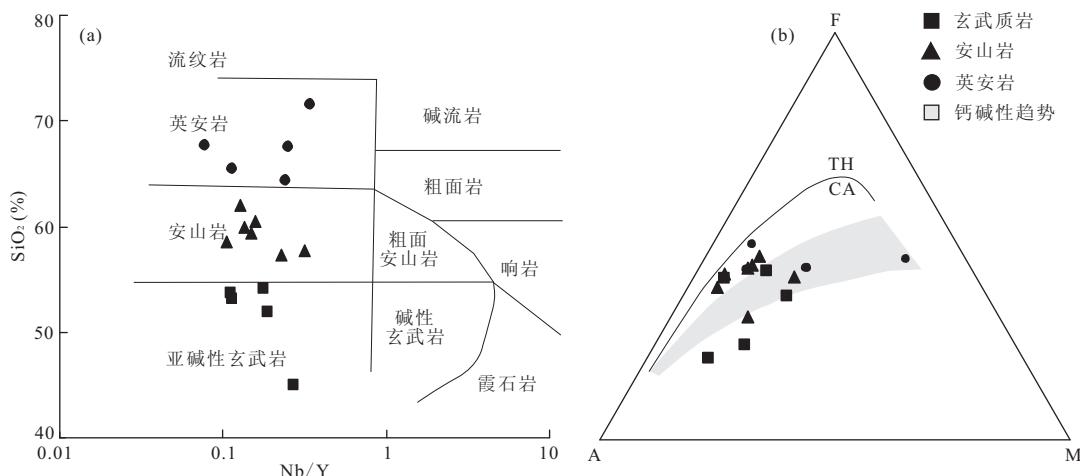
图 7 东天山雅满苏组火山岩 Nb/Y-SiO<sub>2</sub> 图解(a)和 AFM 图解(b)

Fig. 7 Nb/Y-SiO<sub>2</sub> diagram (a) and AFM diagram (b) for volcanic rocks of Yamansu Formation from eastern Tianshan

6.10% 之间。在 AFM 图解(图 7b)(Ringwood, 1975)上可以看出, 雅满苏组火山岩具有典型的钙碱性序列演化趋势, 暗示其可能形成于较成熟的岛弧环境(潘桂棠等, 2008)。

#### 4.3 微量元素地球化学特征

东天山早石炭世雅满苏组火山岩的微量元素和稀土元素测试分析结果见表 2, 雅满苏组基性岩 La/Nb 比值在 2.45%~4.24% 之间, Pb/Ce 比值主体在 0.21%~0.58% 之间, Ba/La 比值在 24.39%~107.20% 之间, 与 N-MORB 相比都明显偏高, 这可能指示了其地幔源区受到了流体影响, 显示俯冲带火山岩的典型特征。与板片俯冲有关的火山岩的 Zr/Nb 比值一般在 10~60 之间变化(Davidson, 1996), 而雅满苏组火山岩数据(表 2)全部落入此区域, 指示雅满苏组火山岩与俯冲有关。基性火山岩 Ta/Yb 比值在 0.06%~0.18% 之间, Th/Ta 比值在 5.03%~15.20% 之间, 具有陆源弧玄武岩特征(Debari, 1994; Pearce and Peate, 1995), 表明雅满苏组火山岩可能形成于具有陆壳基底的岛弧环境。微量元素 N-MORB 标准化配分图解(图 8)显示雅满苏组火山岩总体相对富集 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb、Ta 等高场强元素。除此之外, 雅满苏组火山岩微量元素特征显示从基性岩到酸性岩 Sr 和 Ti 呈规律性变化, Sr 的相对亏损趋势减弱, Ti 的亏损趋势加强, 可能指示了含 Ti 矿物的分离结晶作用。由于 Ti 元素是高场强元素(HFSE), Rb、Ba 等元素是大离子亲石元素(LILE), 在部分熔融和早期结晶过程中是不相容元素, Rb 峰、Ba 峰、Ti 槽的出现表明岩浆源区来自于

富含 Rb、Ba 等大离子亲石元素而亏 Ti 的物质, 即俯冲组分物质。

#### 4.4 稀土元素地球化学特征

雅满苏组火山岩稀土元素总量主体在 63.26~177.90 μg/g 之间, 球粒陨石标准化稀土配分图解(图 8)显示雅满苏组火山岩配分曲线大体平行, 暗示它们可能是同源演化的产物。基性火山岩 LREE/HREE 比值在 3.52~4.98 之间, (La/Sm)<sub>N</sub> 比值在 1.84~2.02 之间, 中酸性火山岩 LREE/HREE 比值在 1.99~6.18 之间, (La/Sm)<sub>N</sub> 比值在 0.83~3.09 之间, 显示为轻稀土相对富集, 重稀土相对平坦。从基性岩到酸性岩, 轻稀土富集趋势增强, δEu 逐渐增强, 表明岩浆在喷发过程中有斜长石的分离结晶作用。

## 5 讨论

### 5.1 构造环境

雅满苏组火山岩由基性一酸性火山岩及中酸性火山碎屑岩组成, 其中火山岩岩石类型从玄武岩变化到流纹岩, 以钙碱性为主, 从岩石组合上看, 其形成环境与岛弧相吻合。McCulloch and Gamble (1989) 提出 La/Zr 及 Nb/Zr 比值能较好地反映其源区的成分差异以及 La、Nb、Zr 之间的分异特征。武莉娜等(2003)根据世界上典型大地构造环境区玄武岩类的 La、Nb、Zr 数据, 利用统计学方法划分出了玄武岩形成的大地构造位置, 在 La/Zr-Nb/Zr 构造环境判别图解(图 9a)上, 雅满苏组基性岩全部落入板块汇聚边缘玄武岩, 这可能指示了雅满苏组火

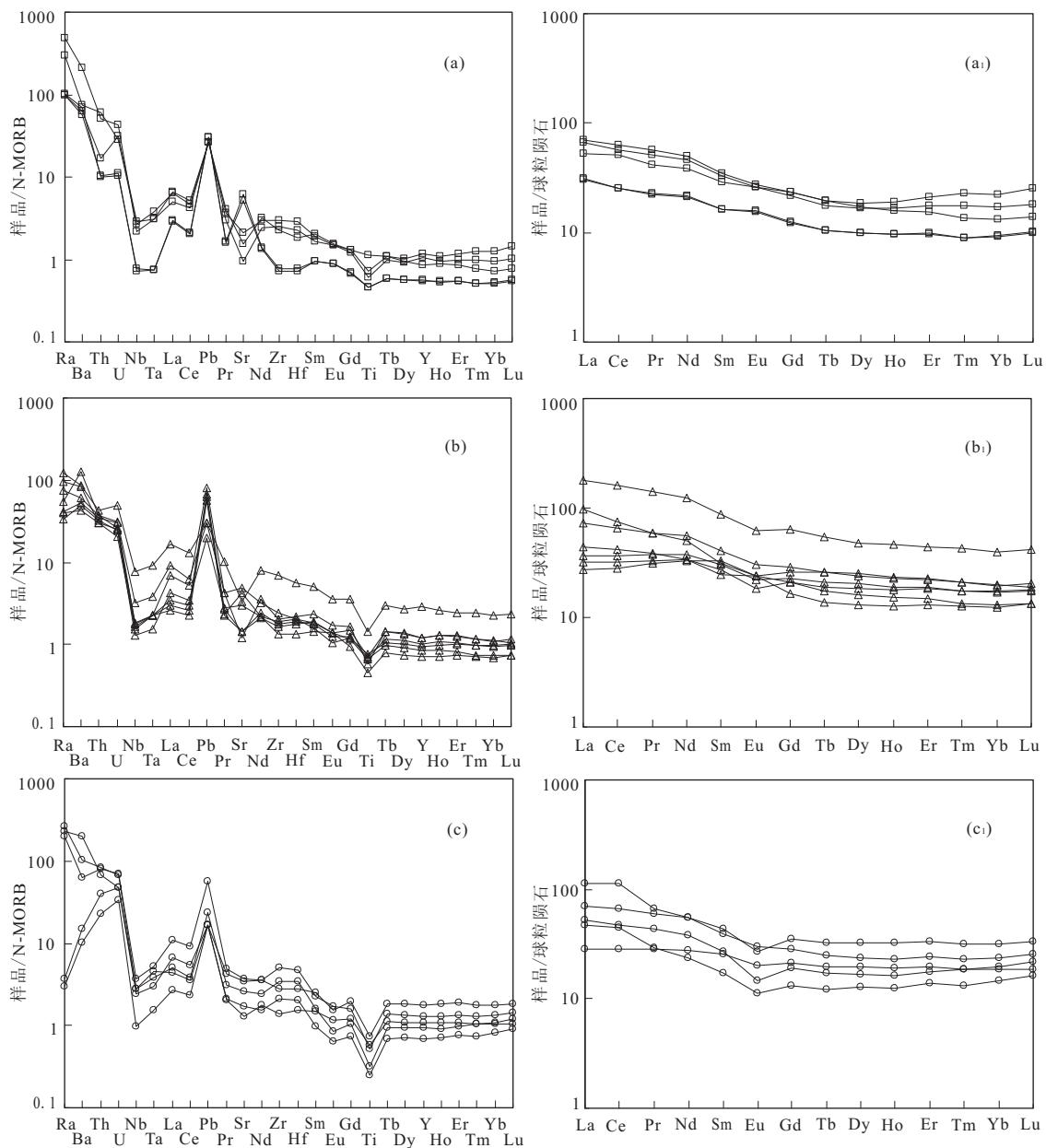


图 8 雅满苏组火山岩微量元素 N-MORB 标准化配分图解(a,b,c)及稀土元素球粒陨石标准化配分图解(a<sub>1</sub>,b<sub>1</sub>,c<sub>1</sub>)(N-MORB 值据 Sun and McDonough, 1989; 球粒陨石值据 Boynton, 1984)

Fig. 8 N-MORB-normalized Trace Elements patterns (a, b, c) and Chondrite-normalized REE patterns (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>) for the Yamansu volcanic rocks from eastern Tianshan

a, a<sub>1</sub>. 玄武质岩; b, b<sub>1</sub>. 安山岩; c, c<sub>1</sub>. 英安岩

山岩形成于俯冲环境。Hf、Th 以及 Nb 属于不活泼元素,受变质和蚀变作用的影响较小,可以很好地反映玄武岩的源区性质。在 Th-Hf/3-Nb/16 玄武岩构造环境判别图解中(图 9b),该组火山岩样品全部落入岛弧背景下的玄武岩及其分异的产物区域内,这与微量元素和稀土元素的研究结果相一致。从微量元素特征及相对偏高的 La/Nb、Pb/Ce、Ba/La、Ta/Yb、Zr/Nb 及 Th/Ta 比值上分析,进一步说明雅满苏组

火山岩可能形成于俯冲环境下具有陆壳基底陆源弧环境。

## 5.2 火山岩年龄及其地质意义

雅满苏组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谱和年龄分别为东段  $348.0 \pm 1.7$  Ma(MSWD=1.15)、中段  $335.9 \pm 2.4$  Ma(MSWD=1.03)、西段  $334.0 \pm 2.5$  Ma(MSWD=1.02), 3 个年龄均处于早石炭世, 代表了雅满苏组火山岩形成时代为早石炭世; 同时

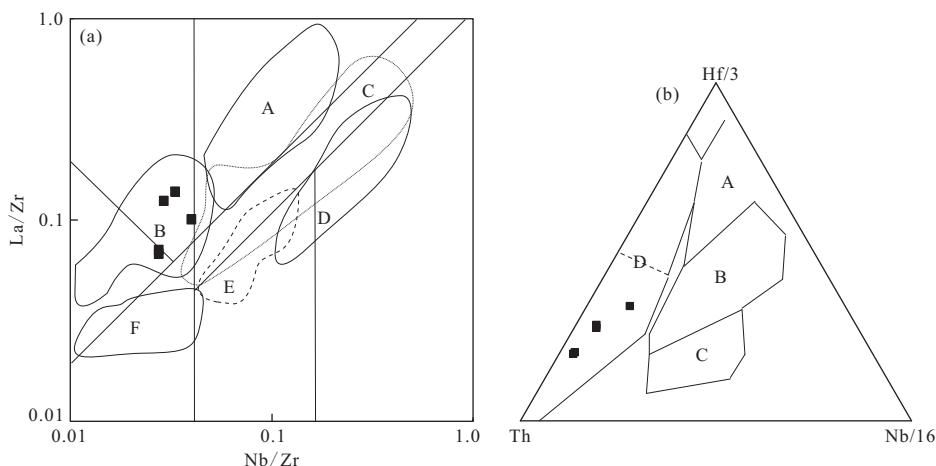


图9 La/Zr-Nb/Zr(a)和Th-Hf/3-Nb/16(b)构造环境判别图解(图9a底图据武莉娜等,2003改编;图9b据Wood,1979)

Fig. 9 La/Zr-Nb/Zr (a) and Th-Hf/3-Nb/16 (b) identification diagram for the Carboniferous basalts from Yamansu Formation  
 A. 大陆板内玄武岩(陆—陆碰撞带); B. 板块汇聚边缘玄武岩; C. 大陆板内玄武岩(裂谷、拉张区); D. 地幔热柱玄武岩; E. 大洋板内玄武岩; F. 大洋板块发散边缘玄武岩; G. 洋中脊玄武岩; H. 富集型洋中脊玄武岩和板内碱性玄武岩; I. 板内碱性玄武岩; J. 火山弧玄武岩

在雅满组火山岩中发现的大量捕获的锆石可能指示了雅满苏组火山岩形成于古老基底之上的陆源弧环境,从雅满苏组东段至西段,年龄依次减小,可能说明了雅满苏组岩浆活动由东段先开始,再到中段、西段,说明东天山雅满苏岛弧带东段形成时期早于中段和西段。暗示了东天山石炭纪时的俯冲事件可能是由东部先开始,依次到中部、西部,俯冲形式类似于“剪刀”闭合的过程。

## 6 结论

(1)东天山觉罗塔格构造带雅满苏组火山岩形成于具有古老基底的岛弧环境。

(2)东天山觉罗塔格构造带雅满苏组火山岩LA-ICP-MS锆石U-Pb谐和年龄东段为 $348.0 \pm 1.7$  Ma(MSWD=1.15)、中段为 $335.9 \pm 2.4$  Ma(MSWD=1.03)、西段为 $334.0 \pm 2.5$  Ma(MSWD=1.02),雅满苏组火山岩整体岩浆结晶时代为早石炭世。

(3)东天山雅满苏岛弧带东段形成时期早于中段和西段。暗示了东天山石炭纪时的俯冲事件可能是由东部先开始,依次到中部、西部,俯冲形式类似于“剪刀”闭合的过程。

## References

Boynton, W. V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteoric studies. Rare Earth Element Geochemistry, Elsevier, Amsterdam, 63—114.

Carr, P. F., 1998. Subduction-related Late Permian shoshonites of the Sydney basin, Australia. *Mineralogy and Petrology*, 63(1—2):49—71. doi:10.1007/BF01162768

Cheng, S. D., Wang, G. R., Yang, S. D., et al., 1986. The paleoplate tectonic of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 4(2): 1—26(in Chinese with English abstract).

Davidson, J. P., 1996. Deciphering mantle and crustal signatures in subduction zone magmatism. In: Bebout, E., et al., eds., Subduction top to bottom. *Geophys. Monogr. Ser.*, AGU, Washington, D. C., (96): 251—262. doi: 10.1029/GM096p0251

Debari, S. M., 1994. Petrogenesis of the Fiambala gabbroic intrusion, northwestern Argentina, a deep crustal syntectonic pluton in a continental magmatic arc. *Journal of Petrology*, 35(3): 679—713. doi: 10.1093/petrology/35.3.679

Feng, Y. M., Zhu, B. Q., Yang, J. L., et al., 2002. Tectonics and evolution of the eastern Tianshan Mountains—a brief introduction to tectonic map (1: 500 000) of the eastern Tianshan Mountains of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 20(4): 309—314 (in Chinese).

He, J. H., Xia, M., Zhang, X. L., et al., 2005. Discussion on the structural environment of the Wutongwozi Group at Jue-Luo-Ta-Ge region in the east Tianshan, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 23(1): 23—27 (in Chinese with English abstract).

Hou, G. S., Tang, H. F., Liu, C. Q., et al., 2006. Geochemical characteristics of the Late Paleozoic volcanics in jue-luotage tectonic belt, eastern Tianshan and its implications. *Acta Petrological Sinica*, 22(5): 1167—1177 (in Chinese with English abstract).

- Ji, J. S. , Tao, H. X. , Zeng, Z. R. , et al. , 1994. Geology and exploration of gold deposit in kangguertage belt, East Tianshan. Geological Publishing House, Beijing ( in Chinese).
- Li, Y. J. , Du, Z. G. , Hu, K. L. , et al. , 2008. On Disintegration of Qi'eshan Group and its definition of lithostratigraphic units from Kumutag sand-ridge area in the eastern Tianshan. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(4): 458—464 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R. , 2003. User's manual for Isoplot 3.00 a geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No. 4a, Berkeley, California.
- Ma, R. S. , Wang, C. Y. , Ye, S. F. , 1993. Tectonic framework and crustal evolution of eastern Tianshan Mountains. Publishing House of Nanjing University, Nanjing ( in Chinese).
- McCulloch, M. T. , Gamble, J. A. , 1989. Depleted source for volcanic arc basalts: constraints from basalts of Kema-dec-Taupo volcanic zone based on trace elements, isotopes and subduction chemical geodynamics. *Continental Magmatism, Inter. Volcanic Conf.-Abstr.* , New Mexico Bur. Miner. Resour. Bull. , 131—180.
- Muller, D. , Rock, N. M. S. , Groves, D. I. , 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potasssic volcanic rocks in different tectonic settings: a pilot study. *Mineralogy and Petrology*, 46 (4): 259—289. doi: 10.1007/BF01173568
- Pan, G. T. , Xiao, Q. H. , Lu, S. N. , et al. , 2008. Definition, classification, characteristics and diagnostic indications of tectonic facies. *Geological Bulletin of China*, 27 (10): 1613—1637 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A. , Peate, D. W. , 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Earth and Planetary Science*, 23: 251—285. doi: 10.1146/annurev.ea.23.050195.001343
- Ringwood, A. E. , 1975. Composition and petrology of the earth's mantle. McGraw-Hill, New York: 618.
- Rui, Z. Y. , Wang, L. S. , Wang, Y. T. , et al. , 2002. Discussion on metallogenic epoch of Tuwu and Yandong porphyry copper deposits in eastern Tianshan Mountains, Xinjiang. *Mineral Deposit*, 21(1): 6—22 (in Chinese with English abstract).
- Song, A. J. , Zhu, Z. X. , Shi, Y. , et al. , 2006. SHRIMP U-Pb dating of zircons from the Tugutu Bulak Formation in the western segment of the Aqqikkuduk fault in the East Tianshan, Xinjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 953—956 (in Chinese with English abstract).
- Sun, S. S. , McDonough, W. F. , 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders, A. D. , Norry, M. J. , eds., *Magmatism in ocean basins*. Geological Society Publication London, 42: 313—345. doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.0119
- Vavra, G. , Schmid, R. , Gebauer, D. , 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibole-to-granulite facies zircons: geochronology of the Ivren zone (Southern Alps). *Mineralogy and Petrology*, 134 (4): 380—404.
- Wiedenbeck, M. , Alle, P. , Corfu, F. , et al. , 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19 (1): 1—24. doi: 10.1111/j.1751—908x.1995.tb00147.x
- Winchester, J. A. , Floyd, P. A. , 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325—343. doi: 10.1016/0009—2541(77)90057—2
- Wu, C. W. , Liao, Q. A. , Li, Q. X. , et al. , 2008. The Late Carboniferous volcanic arc rocks in Jueluotage area, eastern Tianshan, China. *Geological Science and Technology Information*, 27 (6): 29—36 (in Chinese with English abstract).
- Wu, L. N. , Wang, Z. C. , Wang, Y. L. , 2003. On the application of La, Nb and Zr in identifying the tectonic settings. *Journal of East China Geological Institute*, 26 (4): 343—348 (in Chinese with English abstract).
- Wood, D. A. , 1979. A variably veined suboceanic upper mantle—genetic significance for mid-ocean ridge basalts from geochemical evidence. *Geology*, 7(10): 499—503.
- Xia, L. Q. , Xia, Z. C. , Xu, X. Y. , et al. , 2003. Magmagenesis in the Ordovician backarc basins of the northern Qilian Mountains, China. *Geological Society of America Bulletin*, 115(12): 1510—1522.
- Xia, L. Q. , Xia, Z. C. , Xu, X. Y. , et al. , 2004. Carboniferous Tianshan igneous mega province and mantle plume. *Geological Bulletin of China*, 23(9—10): 903—910 (in Chinese with English abstract).
- Xia, L. Q. , Xia, Z. C. , Xu, X. Y. , et al. , 2009. Do the Tianshan Carboniferous volcanic successions contain Nb-enriched arc basalts? *Earth Science Frontiers*, 16 (6): 303—317 (in Chinese with English abstract).
- Xia, L. X. , Zhang, G. W. , Xia, Z. C. , et al. , 2002. Constraints on the timing of opening and closing of the Tianshan Paleozoic oceanic basin: evidence from Sinian and Car-

- boniferous volcanic rocks. *Geological Bulletin of China*, 21(2):55—62 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, X. C., Tang, Y. Q., Feng, Y. M., et al., 1992. Tectonics of North Xinjiang and its neighbouring areas. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. K., Tao, H. X., Luo, G. C., et al., 1996. Basic features of plate tectonics in East Tianshan of China. *Xinjiang Geology*, 14(3):221—227 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. Y., Mao, Y. S., Huang, Z. X., et al., 1994. Volcanology of East Tianshan continental margin. Chengdu University of Science and Technology Press, Chengdu (in Chinese).
- 企鹅山群的解体及岩石地层单位厘定. 地球科学——中国地质大学学报, 33(4):458—464.
- 马瑞士, 王赐银, 叶尚夫. 1993. 东天山构造格架及地壳演化. 南京:南京大学出版社.
- 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等, 2008. 大地构造相的定义、划分特征及其鉴别标志. 地质通报, 27(10):1613—1637.
- 芮宗瑶, 王龙生, 王义天, 等, 2002. 东天山土屋和延东斑岩铜矿床时代讨论. 矿床地质, 21(1):16—22.
- 宋安江, 朱志新, 石莹, 等, 2006. 东天山阿其克库都克断裂西段土古土布拉克组锆石 SHRIMP U-Pb 测年. 地质通报, 25(8):953—956.
- 吴春伟, 廖群安, 李奇祥, 等 2008. 东天山觉罗塔格地区晚石炭世岛弧火山岩. 地质科技情报, 27(6):29—36.
- 武莉娜, 王志畅, 汪云亮, 2003. 微量元素 La, Nb, Zr 在判别大地构造环境方面的应用. 华东地质学院学报, 26(4): 343—348.
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等, 1992. 新疆北部及邻区大地构造. 北京:地质出版社.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等, 2004. 天山石炭纪大火成岩省与地幔柱. 地质通报, 23(9—10):903—910.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等, 2009. 天山石炭纪火山岩系中含有富 Nb 岛弧玄武岩吗? 地学前缘, 16(6):303—317.
- 夏林圻, 张国伟, 夏祖春, 等, 2002. 天山古生代洋盆开启、闭合时限的岩石学约束——来自震旦纪、石炭纪火山岩的证据. 地质通报, 21(2):55—62.
- 杨兴科, 陶洪祥, 罗桂昌, 等, 1996. 东天山板块构造基本特征. 新疆地质, 14(3):221—227.
- 周济元, 茅燕石, 黄志勋, 等, 1994. 东天山古大陆边缘火山地质. 成都:成都科技大学出版社.

## 附中文参考文献

- 成守德, 王广瑞, 杨树德, 等, 1986. 新疆古板块构造. 新疆地质, 4(2):1—26.
- 冯益民, 朱宝清, 杨军录, 等, 2002. 东天山大地构造及演化——1:50 万东天山大地构造图简要说明. 新疆地质, 20(4):309—314.
- 贺军慧, 夏明, 张兴龙, 等, 2005. 新疆东天山觉罗塔格地区梧桐窝子岩组构造环境探讨. 新疆地质, 23(1):23—27.
- 侯广顺, 唐红峰, 刘丛强, 等, 2006. 东天山觉罗塔格构造带晚古生代火山岩地球化学特征及意义. 岩石学报, 22(5): 1167—1177.
- 姬金生, 陶洪祥, 曾章仁, 等, 1994. 东天山康古尔塔格金矿带地质与成矿. 北京:地质出版社.
- 李永军, 杜志刚, 胡克亮, 等, 2008. 东天山库姆塔格沙垄地区