

## 新疆东天山金滩金矿区安山岩岩石学、 地球化学及地质意义

朱余银<sup>1,2,3</sup>, 王天国<sup>1,2</sup>, 黄超文<sup>1,2</sup>, 戴塔根<sup>1,2</sup>, 杨柳<sup>4</sup>, CHONG Khai Yuen<sup>5</sup>, 杜高峰<sup>6</sup>

1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 湖南 长沙, 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙, 410083;
3. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳, 621010;
4. 湖南工程职业技术学院 资源工程系, 湖南 长沙, 410015;
5. 马来西亚大学 理学院, 马来西亚 吉隆坡, 50603;
6. 中国科学院 地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳, 550002)

**摘要:** 新疆金滩金矿发育一套与成矿密切相关的安山岩, 对该安山岩元素质量分数和相关性进行分析。研究结果表明: 安山岩中锆石结构以及 Th 和 U 的质量分数之比 $\omega(\text{Th})/\omega(\text{U})$ (0.30~1.02)均显示其为岩浆成因, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为  $(303.65 \pm 4.8)$  Ma, 代表安山岩形成时代; 安山岩 $\omega(\text{SiO}_2)$  为 54.29%~69.05%,  $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 11.27%~19.46%, 全碱 $\omega(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$  为 2.46%~6.81%,  $\omega(\text{MgO})$  为 3.60%~10.45%, Mg 指数为 46~66。安山岩轻稀土元素 (LREE) 富集、轻重稀土元素分异作用明显, 绝大多数样品具中等 Eu 负异常 ( $\delta\omega(\text{Eu})=0.44\sim 0.77$ ) 和轻微 Ce 负异常 ( $\delta\omega(\text{Ce})=0.93\sim 0.98$ ), 富集 K, Rb, Ba, Th 和 U 等大离子亲石元素, 相对亏损 Nb 和 Ti 等高场强元素; 岩浆经历了分离结晶作用, 且发生部分熔融; 安山岩可能是康古尔塔格洋向南俯冲, 洋壳脱水进入地幔楔, 被俯冲流体交代的地幔楔部分熔融, 同时产生结晶分异作用而形成, 而且遭受明显的陆壳物质混染; 东天山地区在晚石炭世依旧存在康古尔洋的俯冲消减作用。

**关键词:** 晚石炭世; 安山岩; 源区性质; 金滩金矿

中图分类号: P595; P597

文献标志码: A

文章编号: 1672-7207(2017)10-2697-12

## Petrology, geochemistry and geological significance of andesites of Jintan gold orefield in Eastern Tianshan, Xinjiang

ZHU Yuyin<sup>1,2,3</sup>, WANG Tianguo<sup>1,2</sup>, HUANG Chaowen<sup>1,2</sup>, DAI Tegen<sup>1,2</sup>,  
YANG Liu<sup>4</sup>, CHONG Khai Yuen<sup>5</sup>, DU Gaofeng<sup>6</sup>

1. Key Laboratory of Non-ferrous Metallogenic Prediction of Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;
4. Department of Resources Engineering, Hunan Engineering Polytechnic, Changsha 410015, China;
5. Faculty of Science, University of Malaya, Kuala Lumpur 50603, Malaysia;
6. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

收稿日期: 2016-10-12; 修回日期: 2016-12-22

基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB440901)(Project(2014CB440901) supported by the National Basic Research Program(973 Program) of China)

通信作者: 杨柳, 博士, 从事矿产普查与勘探研究; E-mail: 381199286a@sina.com

**Abstract:** A set of andesites closely related to the Au mineralization was developed from Jintan Gold Deposit. Element concentration of the andesites and geochemical correlation analysis were made. According to the results, both the zircons structure of the andesites and  $\omega(\text{Th})/\omega(\text{U})$  (0.30–1.02,  $\omega$  is element mass fraction) indicate that the zircons are the origin of magma, and the zircon U-Pb age is  $(303.65 \pm 4.8)$  Ma, which stands for the formation age of andesites. The  $\omega(\text{SiO}_2)$  of andesites is from 54.29% to 69.05%,  $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$  is from 11.27% to 19.46% and  $\omega(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$  is from 2.46% to 6.81%,  $\omega(\text{MgO})$  is from 3.60% to 10.45% and Mg index changes from 46 to 66. The light rare earth elements (LREE) of andesites is enriched, and the differentiation between LREE and HREE is obvious. Eu of the vast majority of the sample shows moderate negative anomaly ( $\delta\omega(\text{Eu})=0.44-0.77$ ), while Ce shows slight negative anomalies ( $\delta\omega(\text{Ce})=0.93-0.98$ ). It is enriched in large ion lithophile elements (such as K, Rb, Ba, Th and U), and depleted in high field strength elements (such as Nb and Ti). The magma undergoes the fractional crystallization and partial melting. The andesites are probably formed by partial melting of mantle wedge, which is metasomatized by subducting fluids when the Kanggurtag ocean southward subducts, oceanic crust dehydrates and subducts into the mantle wedge. Meanwhile the magma undergoes fractional crystallization, and suffers significant continental crust material contamination. Based on comprehensive analysis, subduction of the Kanggurtag ocean is still underway in the East Tianshan mountain region at the time of Late Carboniferous.

**Key words:** late carboniferous; andesite; source characteristics; Jintan Gold Deposit

新疆东天山造山带位于中天山地块以北,吐哈盆地以南的天山地区<sup>[1]</sup>,是“中亚巨型成矿带”的重要组成部分,也是我国重要的铜(镍)、金、铁、钼、银等多金属成矿带之一<sup>[2-5]</sup>。但该区大地构造属性长期以来一直众说纷纭,概括起来可分为4类:晚古生代岛弧带<sup>[6]</sup>、晚古生代裂谷或裂陷槽等拉张环境<sup>[7]</sup>、晚古生代弧后盆地<sup>[8]</sup>、火山型被动大陆边缘<sup>[9]</sup>。金滩金矿床是康古尔塔格地区最主要和最具代表性的金矿床,安山岩是该矿床的直接围岩和含矿层。本文作者通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究以对安山岩精确定年,并结合岩石学、地球化学研究,探讨其岩浆起源、成岩构造环境,以期深化对东天山地区地质构造演化的认识。

## 1 地质背景与岩相学

金滩金矿床大地构造位置处于塔里木板块北部阿奇山—雅满苏岛弧带北缘,北邻康古尔塔格—黄山碰撞变形带(图 1(a))<sup>[10-13]</sup>。区域上出露地层主要为石炭统雅满苏组,其岩性为浅海相中—酸性和基性熔岩、火山碎屑岩、陆源碎屑岩和碳酸盐岩等<sup>[10-13]</sup>。金滩矿区出露地层主要为雅满苏组第一岩性段,岩性为英安岩、流纹岩和英安质凝灰岩等(图 1(b))。英安岩呈深灰—灰褐色,斑状结构,片状构造。斑晶主要为斜长石,自形板状,表面混浊,有不规则裂纹,其内有后期蚀变矿物充填,边缘因溶蚀成锯齿状;有少量石英斑晶,呈粒状或浑圆状,粒径为 0.05~0.10 mm,单位面积质量分数为 2%~5%。基质成分主要为隐晶石英、

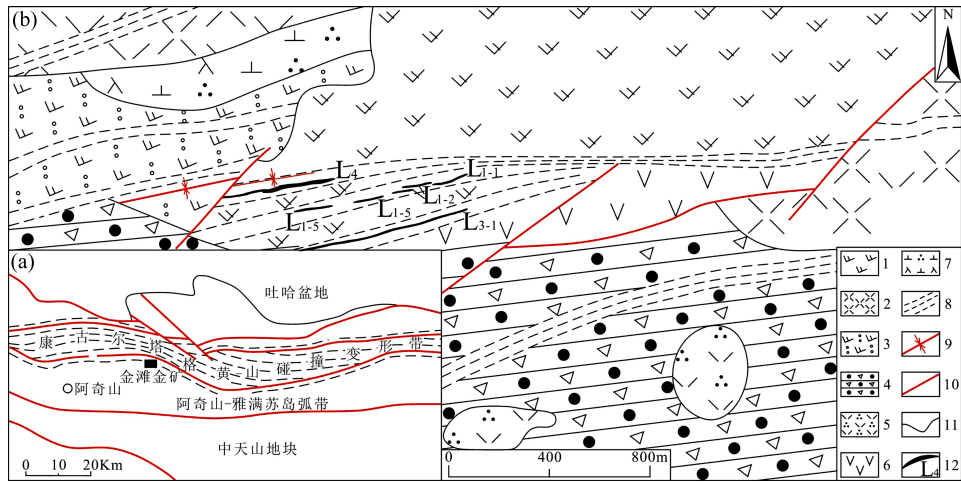
斜长石以及少量云母、角闪石,均已强烈绢云母化、绿泥石化,但仍保留斜长石颗粒形态,粒径为 0.10~1.00 mm;片状绿泥石及绢云母纤状集合体定向排列,片理化明显,多条石英细脉沿片理方向穿切,脉宽为 0.10~0.50 mm。另见少量粒状铁质矿物副矿物分布(图 2)。

## 2 样品采集及分析方法

本次研究样品采自金滩金矿区 255 m 中段 46 号勘探线穿脉剖面。其中,选择 2 件样品用于年代学测试,7 件样品用于岩石地球化学分析。所采样品均为 L4 主矿体的围岩,样品新鲜,无风化。

岩石主量、微量及稀土元素分析由澳实分析检测(广州)有限公司完成。主量元素采用硼酸锂/偏硼酸锂熔融,采用 X 荧光光谱 (ME-XRF06) 进行测定;微量元素采用四酸消解,采用等离子光谱 (ME-ICP) 进行分析;稀土元素用硝酸定容,再用等离子体质谱 (ME-MS82) 进行分析。测试过程按 DZ/T0130.3—2006“地质矿产实验室测试质量管理规范”进行,分析精度高于 5%。

锆石定年样品与岩石地球化学分析样品相对应。锆石阴极发光图像研究在中国科学院广州地球化学研究所 JXA-8100 电子探针仪上完成,LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测定在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。详细分析步骤见文献 [14]。锆石年龄采用国际标准锆石 91500 作为外标

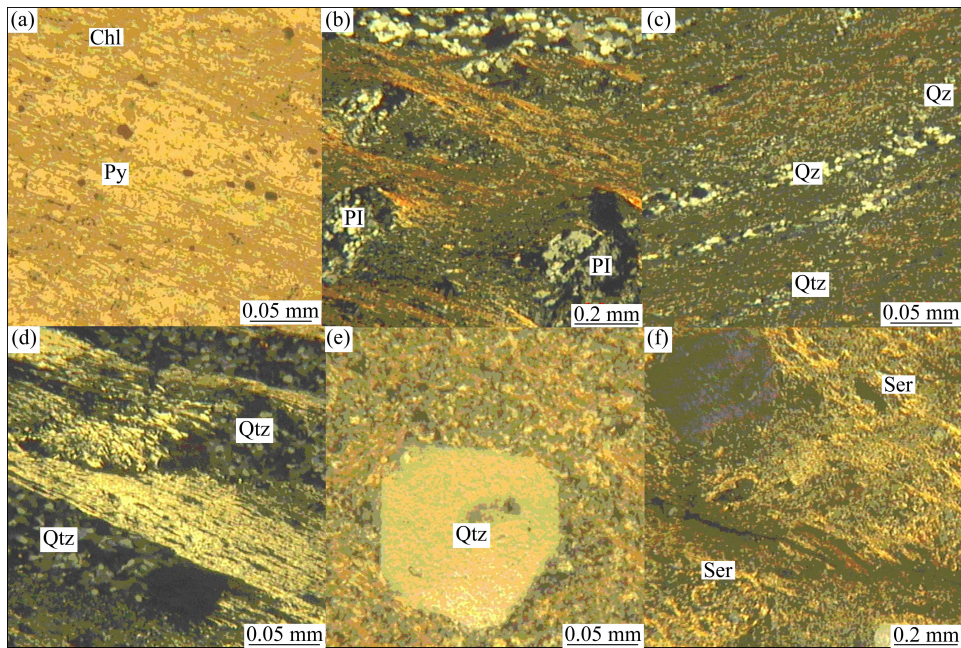


(a) 金滩金矿大地构造位置图; (b) 金滩金矿地质图

1—英安岩; 2—流纹岩; 3—英安质凝灰岩; 4—岩屑砂岩; 5—石英斑岩; 6—安山岩;  
7—石英闪长玢岩; 8—剪切带; 9—紧闭向斜; 10—断层; 11—地质界线; 12—金矿体及编号

图 1 金滩金矿大地构造位置和地质图(据文献[12-13]修改)

Fig. 1 Tectonic location and geological map of Jintan gold deposit(Modified from Refs.[12-13])



(a) 英安岩, 绿泥石化及自形黄铁矿; (b) 英安岩, 蚀变斜长石斑晶; (c) 英安岩, 两期石英脉穿插;  
(d) 英安岩, 片理化将后期脉体错断; (e) 英安岩, 次圆状石英斑晶; (f) 英安岩, 基质中强烈绢云母化现象

Chl—绿泥石; Py—黄铁矿; Pl—斜长石; Qtz—石英; Ser—绢云母

图 2 金滩金矿安山岩显微照片

Fig. 2 Andesite micrographs of Jintan gold deposit

准物质, 元素质量分数采用 NIST SRM 610 作为外标, <sup>29</sup>Si 作为内标。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot<sup>[15]</sup> 完成。同位素比值标准偏差σ, 加权平均年龄均具有 95% 以上的置信度。

### 3 分析结果

#### 3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

选取 WY-255-002 和 WY-255-005 这 2 个安山岩

样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析, 测试结果见表 1。每个样品分别测定 10 个单颗粒锆石, 代表性

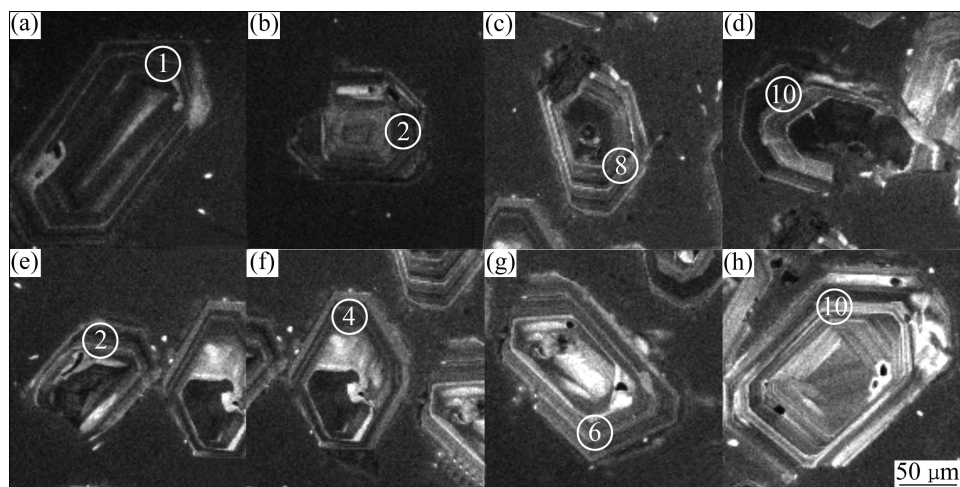
锆石的阴极发光 CL 图像见图 3。锆石颗粒形状规则、晶形较完整, 具有典型的岩浆结晶环带。

表 1 金滩金矿安山岩锆石 U-Pb SHRIMP 测年结果

Table 1 U-Pb SHRIMP zircon dating results of andesites of Jintan gold deposit

分析点号	$\omega(\text{Th})/10^{-6}$	$\omega(\text{U})/10^{-6}$	$\omega(\text{Th})/\omega(\text{U})$	U-Th-Pb 同位素比值						同位素年龄/Ma			
				$\omega(^{207}\text{Pb})/\omega(^{206}\text{Pb})$	$\sigma^1$	$\omega(^{207}\text{Pb})/\omega(^{235}\text{U})$	$\sigma^2$	$\omega(^{206}\text{Pb})/\omega(^{238}\text{U})$	$\sigma^3$	$\omega(^{207}\text{Pb})/\omega(^{235}\text{U})$	$\sigma^4$	$\omega(^{206}\text{Pb})/\omega(^{238}\text{U})$	$\sigma^5$
WY-255-002-1	165.8	180.9	0.92	0.052 4	0.002 7	0.3797	0.028 5	0.047 1	0.000 7	326.8	28.5	296.7	4.5
WY-255-002-2	54.3	96.6	0.56	0.052 3	0.001 9	0.3343	0.031 9	0.046 9	0.000 7	292.8	31.9	295.5	4.5
WY-255-002-3	32.7	46.6	0.70	0.053 2	0.002 2	0.3549	0.040 1	0.047 3	0.001 0	308.4	40.0	297.9	6.4
WY-255-002-4	147.4	250.3	0.59	0.052 6	0.003 5	0.3673	0.014 0	0.048 3	0.000 6	317.7	14.1	304.1	3.9
WY-255-002-5	130.4	171.7	0.76	0.053 2	0.002 2	0.3634	0.019 2	0.047 3	0.000 5	314.8	19.3	297.9	3.2
WY-255-002-6	202.5	254.8	0.79	0.053 4	0.002 4	0.3668	0.015 2	0.048 5	0.000 4	317.3	15.3	305.3	2.6
WY-255-002-7	123.2	120.4	1.02	0.052 4	0.002 1	0.3660	0.029 0	0.047 6	0.000 7	316.7	29.0	299.8	4.5
WY-255-002-8	160.5	191.9	0.84	0.052 5	0.002 9	0.3559	0.019 3	0.048 4	0.000 5	309.1	19.4	304.7	3.2
WY-255-002-9	129.4	162.8	0.79	0.050 8	0.002 6	0.3619	0.015 4	0.046 7	0.000 6	313.6	15.5	294.2	3.9
WY-255-002-10	161.7	220.4	0.73	0.052 0	0.002 3	0.3617	0.011 6	0.047 0	0.000 5	313.5	11.7	296.1	3.2
WY-255-005-1	63.4	158.8	0.40	0.057 4	0.002 8	0.399 2	0.016 6	0.050 5	0.000 9	341.1	16.7	317.6	5.8
WY-255-005-2	63.7	162.0	0.39	0.057 0	0.004 4	0.373 1	0.026 7	0.047 6	0.001 1	321.9	26.8	299.8	7.1
WY-255-005-3	71.1	135.3	0.53	0.056 5	0.002 4	0.379 1	0.013 0	0.048 7	0.000 9	326.4	13.1	306.5	5.8
WY-255-005-4	160.9	227.6	0.71	0.051 7	0.002 0	0.346 9	0.010 1	0.048 6	0.000 8	302.4	10.2	305.9	5.2
WY-255-005-5	46.0	154.8	0.30	0.053 2	0.002 7	0.368 6	0.017 3	0.050 2	0.000 9	318.6	17.4	315.7	5.8
WY-255-005-6	87.7	221.5	0.40	0.054 7	0.002 0	0.369 6	0.009 7	0.049 0	0.000 8	319.4	9.8	308.4	5.2
WY-255-005-7	109.4	217.7	0.50	0.055 2	0.002 1	0.371 9	0.009 9	0.048 9	0.000 8	321.1	10.0	307.8	5.2
WY-255-005-8	81.1	189.1	0.43	0.055 3	0.002 5	0.367 5	0.013 1	0.048 2	0.000 9	317.9	13.2	303.5	5.8
WY-255-005-9	85.6	228.7	0.37	0.055 5	0.002 5	0.380 4	0.013 9	0.049 8	0.000 9	327.3	14.0	313.3	5.8
WY-255-005-10	130.4	340.6	0.38	0.056 3	0.002 0	0.390 7	0.009 1	0.050 4	0.000 8	334.9	9.2	317.0	5.2

注: 1) 对应 $\omega(^{207}\text{Pb})/\omega(^{206}\text{Pb})$ ; 2) 对应 $\omega(^{207}\text{Pb})/\omega(^{235}\text{U})$ ; 3) 对应 $\omega(^{206}\text{Pb})/\omega(^{238}\text{U})$ ; 4) 对应 $\omega(^{207}\text{Pb})/\omega(^{235}\text{U})$ ; 5) 对应 $\omega(^{206}\text{Pb})/\omega(^{238}\text{U})$ 。



WY-255-002 锆石年龄/Ma: (a)  $296.7 \pm 4.5$ ; (b)  $295.5 \pm 4.5$ ; (c)  $304.7 \pm 3.2$ ; (d)  $296.1 \pm 3.2$ ;  
WY-255-005 锆石年龄/Ma: (e)  $299.8 \pm 7.1$ ; (f)  $305.9 \pm 5.2$ ; (g)  $308.4 \pm 5.2$ ; (h)  $317.0 \pm 5.2$

图 3 金滩金矿安山岩锆石阴极发光 CL 图像

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of zircons of andesites of Jintan gold deposit

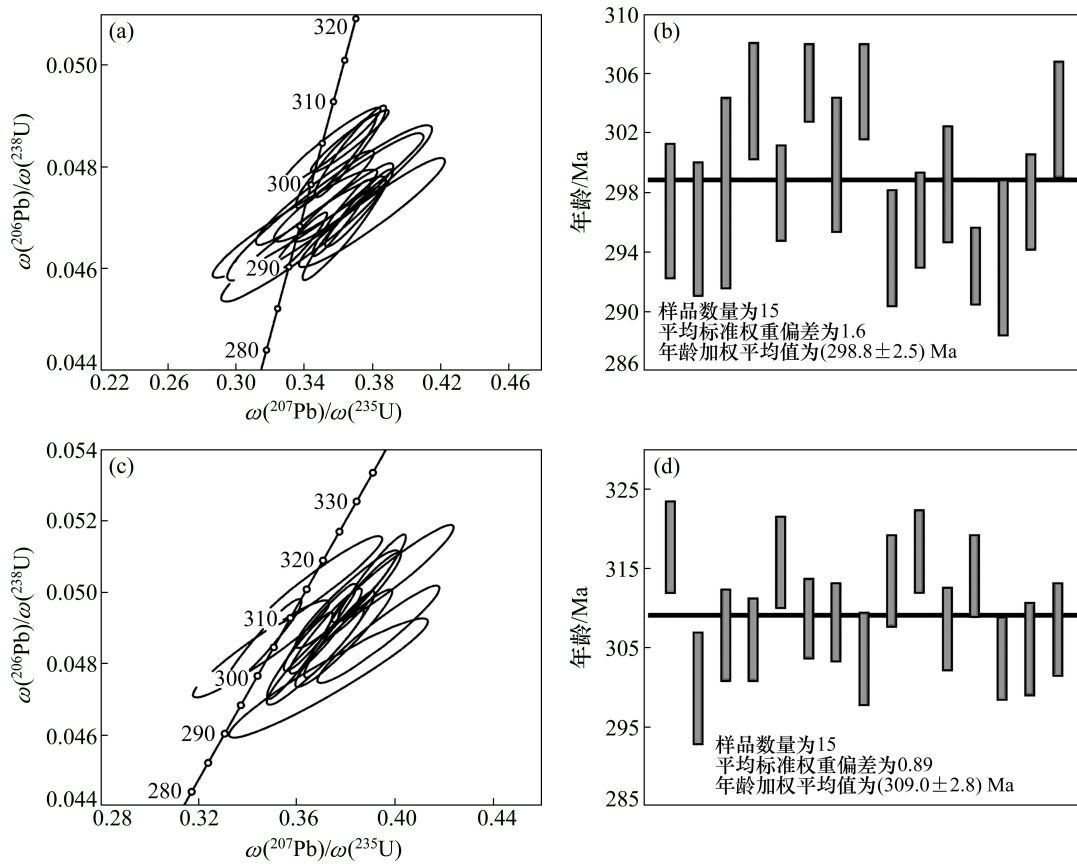
由表 1 可知: 2 个锆石 Th 和 U 的质量分数之比(即  $\omega(\text{Th})/\omega(\text{U})$ ) 为 0.52~1.02 和 0.30~0.71, 远大于 0.10, 且  $\omega(\text{Th})$  和  $\omega(\text{U})$  之间具有良好的正相关关系, 显示岩浆型锆石的典型特征。2 个锆石的年龄分别为 293.0~305.3 Ma 和 299.9~317.6 Ma, 年龄数据总体比较集中, 测点位置与年龄无明显的直接关系, 表明为同一成因和同一时代的锆石。WY-255-002 样品 10 个点的测试结果给出的  $\omega(^{206}\text{Pb})/\omega(^{238}\text{U})$  加权平均年龄为  $(298.8 \pm 2.5)$  Ma (图 4(a)), 平均标准权重偏差  $M_{\text{SWD}}=1.6$ , WY-255-005 样品 10 个点的测试结果给出的  $\omega(^{206}\text{Pb})/\omega(^{238}\text{U})$  加权平均年龄为  $(309.0 \pm 2.8)$  Ma (图 4(b),  $M_{\text{SWD}}=0.89$ )。上述定年结果表明, 安山岩的形成时间为  $(303.65 \pm 4.80)$  Ma, 属于晚石炭世。

3.2 主量和微量元素地球化学特征

表 2 所示为金滩金矿安山岩的岩石化学成分质量分析。从表 2 可见: 样品  $\omega(\text{SiO}_2)$  质量分数为 54.29%~69.05% (平均为 61.24%);  $\omega(\text{TiO}_2)$  质量分数低, 为 0.56%~0.92% (平均为 0.73%);  $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$  质量分数为 11.27%~19.46% (平均为 14.27%);  $\omega(\text{Na}_2\text{O})$  质

量分数为 1.29%~3.15% (平均为 2.25%),  $\omega(\text{K}_2\text{O})$  质量分数为 0.65%~4.60% (平均为 2.17%), 全碱  $\omega(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  为 2.46%~6.81% (平均为 4.43%);  $\omega(\text{MgO})$  质量分数变化大, 为 3.60%~10.45% (平均为 5.47%);  $\text{Mg}^\#$  指数为 46~66。对样品进行 TAS 投图<sup>[16]</sup>(图 5(a)), 样品(个别除外) 落在 Ir-Irvine 线下方亚碱性区内。绝大多数样品的里特曼指数  $\omega(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})^2/[\omega(\text{SiO}_2)-43]$  为 0.44~1.65, 属于钙碱性系列, 与  $\omega(\text{K}_2\text{O})-\omega(\text{SiO}_2)$  图解<sup>[17-18]</sup>(图 5(b)) 和  $\omega(\text{SiO}_2)-\omega(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\omega(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}))$  (记为  $\omega(\text{SiO}_2)$ -碱度率)图解<sup>[19]</sup>(图 5(c)) 的投图结果基本一致。因此, 矿区安山岩应该属于亚碱性系列钙碱性火山岩。

安山岩样品具有较高的稀土质量分数 ( $\omega(\Sigma\text{REE})=47.19 \times 10^{-6} \sim 144.36 \times 10^{-6}$ ), 稀土元素球粒陨石标准化型式较简单(球粒陨石标准化数据引自文献[20]), 所有样品都表现出一致的 LREE 富集的右倾型分布模式(图 6(a))。  $\omega(\text{LREE})/\omega(\text{HREE})$  较低, 为 3.79~8.98 (平均为 6.11),  $[\omega(\text{La})/\omega(\text{Yb})]_N$  (N 表示相应元素质量分数的球粒陨石标准化) 为 2.82~8.53,



(a) 样品 WY-255-002 锆石 U-Pb 年龄谐和图; (b) 样品 WY-255-002 锆石 U-Pb 年龄加权平均图; (c) 样品 WY-255-005 锆石 U-Pb 年龄谐和图; (d) 样品 WY-255-005 锆石 U-Pb 年龄加权平均图

图 4 金滩金矿安山岩锆石 U-Pb 同位素年龄谐和图

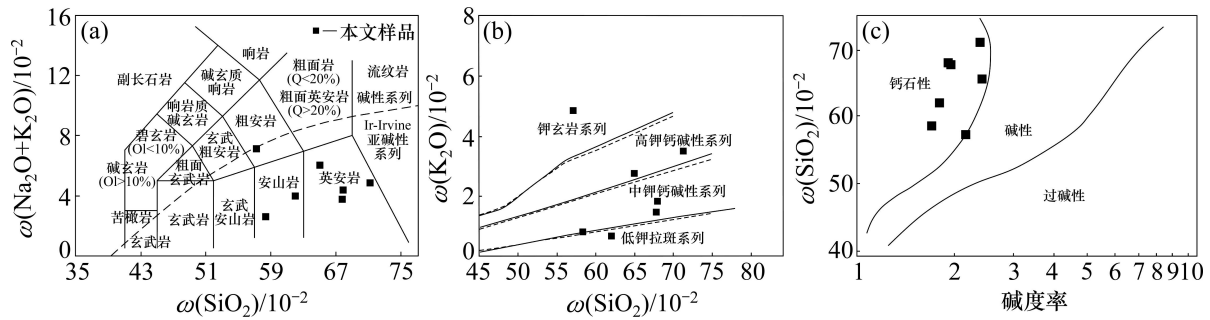
Fig. 4 LA-ICP-MS U-Pb zircon concordia diagram of andesites of Jintan gold deposit

表 2 金滩金矿安山岩主量元素和微量元素分析结果(质量分数)

Table 2 Major and trace elements compositions of andesite of Jintan gold deposit

参数	WY-255-001	WY-255-002	WY-255-003	WY-255-004	WY-255-005	WY-255-006	WY-255-007
$\omega(\text{SiO}_2)/10^{-2}$	69.05	63.99	55.01	64.84	54.29	58.70	62.81
$\omega(\text{TiO}_2)/10^{-2}$	0.56	0.57	0.92	0.71	0.81	0.80	0.75
$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)/10^{-2}$	12.48	11.27	13.19	13.79	19.46	14.38	15.35
$\omega(\text{FeO}^\dagger)/10^{-2}$	5.72	9.80	10.84	7.18	8.09	9.69	6.40
$\omega(\text{MnO})/10^{-2}$	0.12	0.17	0.34	0.17	0.15	0.24	0.14
$\omega(\text{MgO})/10^{-2}$	3.60	4.21	10.45	4.04	4.50	7.03	4.44
$\omega(\text{CaO})/10^{-2}$	0.54	0.56	0.79	0.39	0.53	0.28	0.60
$\omega(\text{Na}_2\text{O})/10^{-2}$	1.29	2.19	1.74	2.44	2.21	2.75	3.15
$\omega(\text{K}_2\text{O})/10^{-2}$	3.41	1.40	0.72	1.76	4.60	0.65	2.68
$\omega(\text{P}_2\text{O}_5)/10^{-2}$	0.08	0.14	0.17	0.16	0.34	0.16	0.12
$\omega(\text{Total})/10^{-2}$	99.68	98.17	99.54	99.05	99.1	99.19	99.49
$\omega(\text{Ba})/10^{-6}$	850.00	500.00	80.00	160.00	920.00	50.00	630.00
$\omega(\text{Ti})/10^{-6}$	2 700.00	2 800.00	5 400.00	1 700.00	2 600.00	1 900.00	4 400.00
$\omega(\text{Rb})/10^{-6}$	129.50	46.70	27.50	64.60	142.00	23.00	95.60
$\omega(\text{Sr})/10^{-6}$	39.00	45.00	21.00	28.00	33.00	21.00	51.00
$\omega(\text{Ta})/10^{-6}$	5.10	5.20	1.00	3.00	1.20	2.40	3.60
$\omega(\text{Nb})/10^{-6}$	10.80	8.10	5.50	5.80	4.80	5.80	10.70
$\omega(\text{Hf})/10^{-6}$	5.20	4.30	3.60	3.10	2.50	3.10	4.70
$\omega(\text{Zr})/10^{-6}$	188.00	157.00	131.00	117.00	92.00	116.00	175.00
$\omega(\text{Y})/10^{-6}$	21.40	21.70	20.6	22.30	14.40	20.60	23.80
$\omega(\text{K})/10^{-6}$	2.65	1.09	0.56	1.38	3.57	0.50	2.11
$\omega(\text{Th})/10^{-6}$	11.35	6.63	3.61	4.16	4.38	3.98	10.35
$\omega(\text{Pb})/10^{-6}$	3.00	9.00	1.00	1.00	3.00	1.00	3.00
$\omega(\text{Cr})/10^{-6}$	55.00	125.00	348.00	12.00	29.00	15.00	87.00
$\omega(\text{Ni})/10^{-6}$	30.00	64.00	158.00	10.00	19.00	14.00	57.00
$\omega(\text{U})/10^{-6}$	2.02	2.12	0.99	1.15	1.00	1.04	1.81
$\omega(\text{La})/10^{-6}$	23.70	27.40	11.00	18.10	6.60	13.40	18.10
$\omega(\text{Ce})/10^{-6}$	44.90	59.50	25.40	40.8	15.7	31.00	40.70
$\omega(\text{Pr})/10^{-6}$	5.37	7.40	3.57	5.36	2.20	4.15	5.07
$\omega(\text{Nd})/10^{-6}$	24.80	29.10	15.90	21.90	9.70	17.50	19.80
$\omega(\text{Sm})/10^{-6}$	4.34	5.78	4.04	4.91	2.61	3.97	4.41
$\omega(\text{Eu})/10^{-6}$	0.75	0.71	1.31	1.03	0.53	0.78	1.04
$\omega(\text{Gd})/10^{-6}$	3.61	4.22	3.54	4.15	2.74	3.55	3.88
$\omega(\text{Tb})/10^{-6}$	0.61	0.60	0.54	0.58	0.42	0.56	0.59
$\omega(\text{Dy})/10^{-6}$	3.80	3.80	3.51	3.54	2.55	3.49	3.65
$\omega(\text{Ho})/10^{-6}$	0.72	0.77	0.69	0.73	0.51	0.75	0.75
$\omega(\text{Er})/10^{-6}$	2.14	2.27	2.14	2.35	1.57	2.33	2.45
$\omega(\text{Tm})/10^{-6}$	0.32	0.32	0.29	0.34	0.24	0.35	0.36
$\omega(\text{Yb})/10^{-6}$	2.11	2.17	2.04	2.21	1.58	2.39	2.54
$\omega(\text{Lu})/10^{-6}$	0.34	0.32	0.30	0.33	0.24	0.36	0.39
$\Sigma\omega(\text{REE})$	117.51	144.36	74.27	106.33	47.19	84.58	103.73
$\omega(\text{LREE})$	103.86	129.89	61.22	92.10	37.34	70.80	89.12
$\omega(\text{HREE})$	13.65	14.47	13.05	14.23	9.85	13.78	14.61
$\omega(\text{LR})/\omega(\text{HR})$	7.61	8.98	4.69	6.47	3.79	5.14	6.10
$\delta\omega(\text{Eu})$	0.58	0.44	1.06	0.70	0.61	0.63	0.77
$\delta\omega(\text{Ce})$	0.93	0.98	0.95	0.97	0.97	0.97	1.00

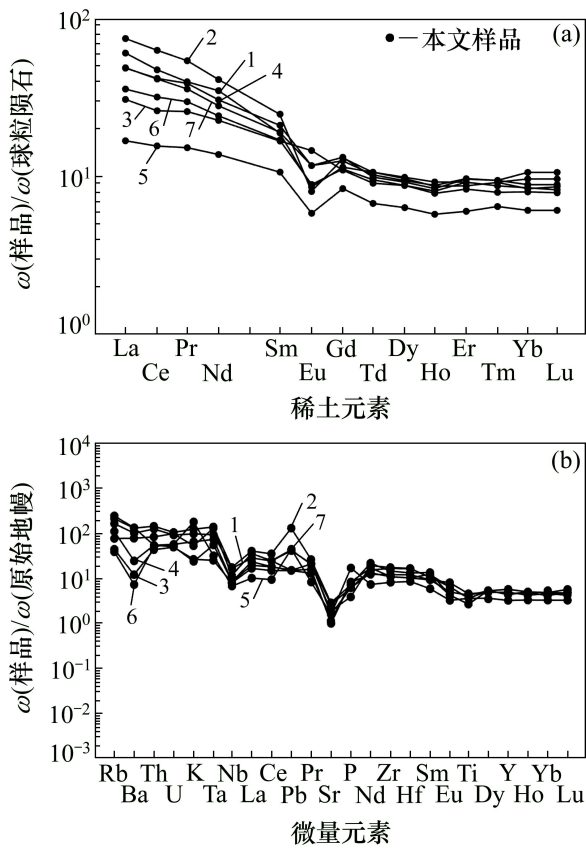
注:  $\text{FeO}^\dagger$  为全铁;  $\delta\omega(\text{Eu})=\omega(\text{Eu})_N/\sqrt{\omega(\text{Sm})_N \cdot \omega(\text{Gd})_N}$ ,  $\delta\omega(\text{Ce})=\omega(\text{Ce})_N/\sqrt{\omega(\text{La})_N \cdot \omega(\text{Pr})_N}$ ; N 表示相应元素质量分数球粒陨石标准化。



(a) TAS 图解; (b)  $\omega(K_2O)-\omega(SiO_2)$ 图解; (c)  $\omega(SiO_2)-A.R$ 图解

图 5 金滩金矿安山岩 TAS 图,  $\omega(K_2O)-\omega(SiO_2)$ 和  $\omega(SiO_2)-A.R$  图解

Fig. 5 TAS,  $\omega(K_2O)-\omega(SiO_2)$  and  $\omega(SiO_2)-A.R$  diagrams of andesites of Jintan Gold Deposit



(a) 球粒陨石标准化稀土元素配分图;

(b) 原始地幔标准化微量元素蛛网图

样品: 1—WY-255-001; 2—WY-255-002;

3—WY-255-003; 4—WY-255-004;

5—WY-255-005; 6—WY-255-006; 7—WY-255-007.

图 6 金滩金矿安山岩稀土元素球粒陨石标准化配分图和微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution and primitive mantle-standardized trace element patterns for the andesite of Jintan gold deposit

$[\omega(Gd)/\omega(Yb)]_N$  为 1.20~1.58, 表明 LREE 和 HREE 分异作用明显, LREE 发生明显富集。 $\delta\omega(Eu)$  (个别样品除外) 为 0.44~0.77, 具中等 Eu 负异常; 大部分样品显示轻微 Ce 负异常 ( $\delta\omega(Ce)=0.93\sim0.98$ ) (图 6(b))。

在原始地幔标准化的微量元素蛛网图(原始地幔微量元素标准化数据引自文献[21])上, 安山岩微量元素分配型式表现为向右倾斜的形态。大离子亲石元素(LILE) 普遍富集, 强烈富集 K, Rb, Ba, Th 和 U。部分高场强元素 Nb 和 Ti 明显相对亏损, 而相容元素 Cr, Ni, Co 和 V 表现为强烈亏损。大离子亲石元素普遍富集和个别高场强元素 (Ta) 富集可能是岩石蚀变引起的, 与镜下岩矿鉴定结果相吻合。

## 4 讨论

### 4.1 构造环境

考虑到矿区安山岩有不同程度的蚀变, 在开展成岩构造环境研究时, 除利用岩石主量元素外, 特别选用一些在蚀变和变质作用过程中十分稳定的微量元素进行判别。

矿区安山岩为亚碱性系列钙碱性火山岩,  $n(Al_2O_3)/n(CaO+K_2O+Na_2O)$  (记为 A/CNK, 其中  $n$  为物质的量) 为 1.24~2.50 (平均为 1.74), 属于铝过饱和和系列, 说明矿区安山岩是俯冲带环境的产物[22]。

矿区安山岩岩石化学系列属于钙碱性火山系列。 $TiO_2$  是比较惰性的组分, 是指示成岩构造环境的有效指标, 矿区安山岩中的  $\omega(TiO_2)$  质量分数为 0.56%~0.92% (平均为 0.73%), 比 MORB (平均为 1.5%) 和 OIB (平均大于 2.0%) 的低, 而与岛弧型火山岩的  $\omega(TiO_2)$  (平均为 0.8%) 接近。在原始地幔标准化的微量元素比值蛛网图(图 6(b))上, 大离子亲石元素 K, Rb,

Ba, Th 和 U 强烈富集, 部分高场强元素 Nb 和 Ti 明显相对亏损, Zr 和 Hf 轻微富集, 总体表现出与俯冲带相关的大陆或岛弧岩浆作用特征<sup>[22-24]</sup>。

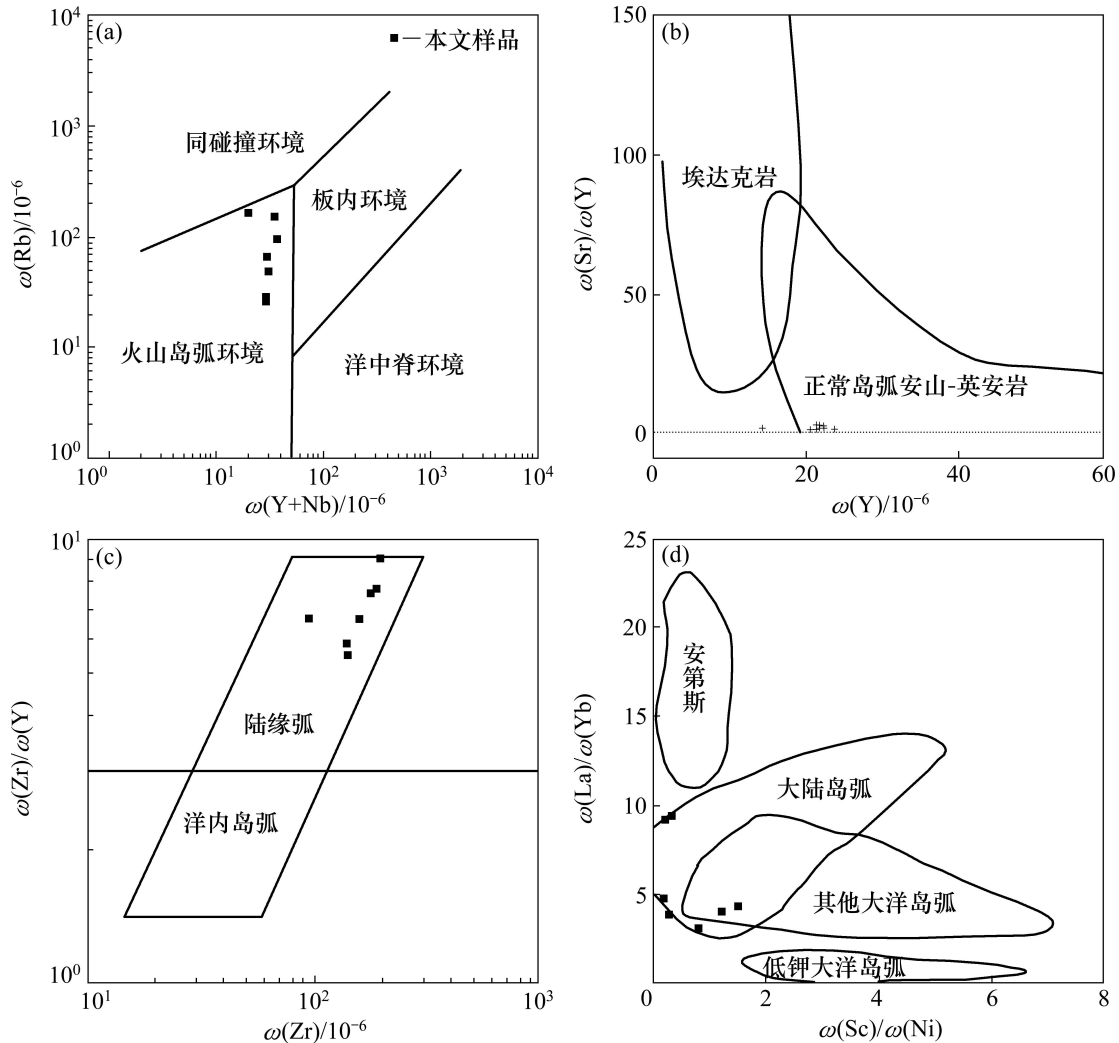
安山岩  $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Nb})$  (1.53~4.33) 落在岛弧火山岩的  $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Nb})$  (0~60) 范围内。稀土元素地球化学特征和  $\omega(\text{La})/\omega(\text{Nb})$  (1.38~3.38, 平均为 2.30) 均反映安山岩形成于活动大陆边缘上陆缘岛弧<sup>[25-26]</sup>。  $\omega(\text{Ba})/\omega(\text{La})$  (3.73~139.39, 平均为 35.45) 与岛弧火山岩的  $\omega(\text{Ba})/\omega(\text{La})$  (大于 30.00) 相近。  $[\omega(\text{Rb})/\omega(\text{Yb})]_{\text{N}}$  (0.71~6.59, 平均为 2.75) 与大陆构造背景值一致, 明显异于洋岛火山岩。

在  $\omega(\text{Rb})$  与  $\omega(\text{Y+Nb})$  的关系图 (图 7(a)) 和  $\omega(\text{Sr})/\omega(\text{Y})$  与  $\omega(\text{Y})$  的关系图(图 7(b))上, 安山岩样品全部落在岛弧火山岩范围内。从  $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Y})$  与  $\omega(\text{Zr})$  的关系图 (图 7(c))和  $\omega(\text{La})/\omega(\text{Yb})$  与  $\omega(\text{Sc})/\omega(\text{Ni})$  的关系

图(图 7(d))可以看出, 样品全部落在活动大陆边缘区, 进一步说明矿区安山岩形成于与俯冲消减作用有关的活动大陆边缘上陆缘岛弧环境, 与前人的晚古生代岛弧带的结论一致。

#### 4.2 岩石成因

安山岩样品的  $\omega(\text{MgO})$ ,  $\omega(\text{Cr})$ ,  $\omega(\text{Ni})$  和 Mg 指数绝大多数低于原生岩浆参考值 ( $\omega(\text{MgO})$  为 10%~12%,  $\omega(\text{Cr})$  为  $250 \times 10^{-6}$ ,  $\omega(\text{Ni})$  为  $90 \times 10^{-6}$ ~ $670 \times 10^{-6}$ , Mg 指数为 68~75)<sup>[27-28]</sup>, 表明母岩浆并不是原始的地幔岩浆, 而是发生结晶分异作用后的岩浆<sup>[29]</sup>。一般而言, 幔源岩浆的  $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)/\omega(\text{TiO}_2)$  为 30 左右<sup>[30]</sup>, 矿区安山岩的  $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)/\omega(\text{TiO}_2)$  为 14.33~24.02, 说明源岩浆具有幔源特征。  $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Hf})$  (36.15~37.74, 平均为 36.89), 接近原始地幔平均值 ( $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Hf})$  为 33~40)<sup>[31]</sup>, 显示该区岩浆具有幔源岩



(a)  $\omega(\text{Rb})$ 与 $\omega(\text{Y+Nb})$ 的关系; (b)  $\omega(\text{Sr})/\omega(\text{Y})$ 与 $\omega(\text{Y})$ 的关系;  
(c)  $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Y})$ 与 $\omega(\text{Zr})$ 的关系; (d)  $\omega(\text{La})/\omega(\text{Yb})$ 与 $\omega(\text{Sc})/\omega(\text{Ni})$ 的关系

图 7 金滩金矿安山岩构造背景判别图

Fig. 7 Discrimination diagrams for tectonic settings of andesites of Jintan gold deposit



浆特征。Ta 和 Yb 主要与地幔部分熔融及幔源性质有关, Th 是不相容元素, 它们均不易受后期蚀变和变质作用的影响, 地幔富集事件对 Ta 和 Th 的影响程度相近, 火山岩中 Ta 和 Th 丰度与火山岩源区组成及火山岩的形成环境有十分密切的关系<sup>[24]</sup>, 因此,  $\omega(\text{Th})/\omega(\text{Yb})$ 和 $\omega(\text{Ta})/\omega(\text{Yb})$ 对于区分火山岩的源区性质具有重要意义。区内安山岩具较高的  $\omega(\text{Th})/\omega(\text{Yb})$ 和 $\omega(\text{Ta})/\omega(\text{Yb})$ , 平均值分别为 2.94 和 1.41, 既显示活动大陆边缘特征, 同时也暗示其原始岩浆可能来自相对富集的地幔楔的部分熔融。

在 Harker 图解 (图略) 中,  $\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$ ,  $\omega(\text{MgO})$ ,  $\omega(\text{FeO}^T)$ ,  $\omega(\text{P}_2\text{O}_5)$ ,  $\omega(\text{TiO}_2)$ ,  $\omega(\text{NaO})$ ,  $\omega(\text{MnO})$ 与 $\omega(\text{SiO}_2)$ 呈负相关关系,  $\omega(\text{CaO})$ ,  $\omega(\text{K}_2\text{O})$ 与 $\omega(\text{SiO}_2)$ 呈正相关关系, 这些氧化物与  $\text{SiO}_2$  存在良好的相关性, 表明岩浆的分离结晶作用在岩浆演化中具有主导作用。

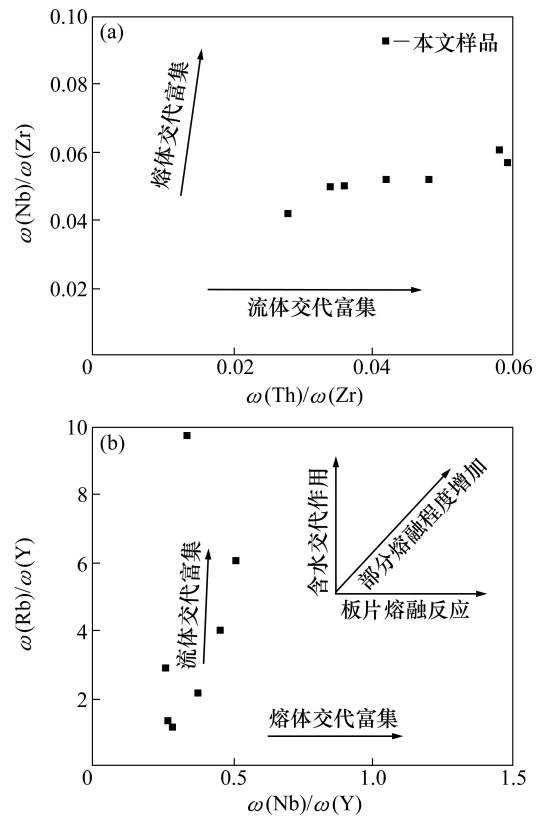
与板片俯冲有关的火山岩的 $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Nb})$  (质量分数) 为 10~60, 矿区安山岩的 $\omega(\text{Zr})/\omega(\text{Nb})$  为 16.39~23.81, 表明其形成与板片俯冲有关。从矿区岛弧型钙碱性安山岩、英安岩、流纹岩岩石组合看, 安山岩显然与俯冲板片脱水形成富含大离子亲石元素的流体交代地幔楔熔融有关<sup>[32]</sup>。根据一些微量元素质量分数的不同分异趋势能有效判别流体交代作用和熔体交代作用,  $\omega(\text{Nb})/\omega(\text{Zr})$  与 $\omega(\text{Th})/\omega(\text{Zr})$  的关系图<sup>[33]</sup> (图 8(a)) 和 $\omega(\text{Rb})/\omega(\text{Y})$  与 $\omega(\text{Nb})/\omega(\text{Y})$  的关系图<sup>[33]</sup> (图 8(b)) 显示, 矿区安山岩具有较明显的流体交代富集趋势。

因此, 大离子亲石元素 K, Rb, Ba, T 和 U 等强烈富集, 是俯冲板块脱水而形成的, 发生交代地幔楔时, 导致楔形地幔也富集这些元素; Sr, Nb 和 Ti 等元素亏损可能与岩浆演化过程中角闪石、斜长石和金红石的分离结晶作用有关。

在过亲石元素 H (如 Ta, Th, La 和 Ce 等) 和亲石元素 M (如 Zr, Hf 和 Sm 等) 的 H-H/M 图解中, 水平排列的岩石是由分离结晶形成的, 而倾斜排列的岩石是部分熔融所致<sup>[33-34]</sup>。在这类判别图中, 样品均为倾斜排列, 说明是由于部分熔融作用形成。ROLLISON<sup>[35]</sup>根据部分熔融定量模式计算出地幔岩在不同熔融程度中形成的熔体的 Ce 和 Sm 质量分数, 在该模拟图上, 安山岩的部分熔融程度为 1%~5%。

$\omega(\text{La})/\omega(\text{Nb})$ 与 $\omega(\text{Ba})/\omega(\text{Nb})$ 关系见图 9。从图 9 可见: 绝大多数样品投影在岛弧火山岩区, 与碎屑沉积物及大陆地壳的分布区较接近, 这一特征指示有陆源物质参与了成岩过程。安山岩样品具有较低的 $\omega(\text{Sm})/\omega(\text{Nd})$  (0.18~0.27, 小于 0.30) 及较高的 $\omega(\text{Ce})/\omega(\text{Nb})$ (3.30~7.30, 大于 1.00) 和  $\omega(\text{Th})/\omega(\text{Yb})$

(1.67~5.38, 大于 1.00), 同样说明岩浆曾遭受地壳物质的混染<sup>[30]</sup>。



(a)  $\omega(\text{Nb})/\omega(\text{Zr})$ 与 $\omega(\text{Th})/\omega(\text{Zr})$ 的关系;  
(b)  $\omega(\text{Rb})/\omega(\text{Y})$ 与 $\omega(\text{Nb})/\omega(\text{Y})$ 的关系

图 8 金滩金矿安山岩 $\omega(\text{Nb})/\omega(\text{Zr})$ - $\omega(\text{Th})/\omega(\text{Zr})$ 和 $\omega(\text{Rb})/\omega(\text{Y})$ - $\omega(\text{Nb})/\omega(\text{Y})$ 图解

Fig. 8  $\omega(\text{Nb})/\omega(\text{Zr})$  versus  $\omega(\text{Th})/\omega(\text{Zr})$  and  $\omega(\text{Rb})/\omega(\text{Y})$  versus  $\omega(\text{Nb})/\omega(\text{Y})$  diagram for andesites of Jintan gold deposit

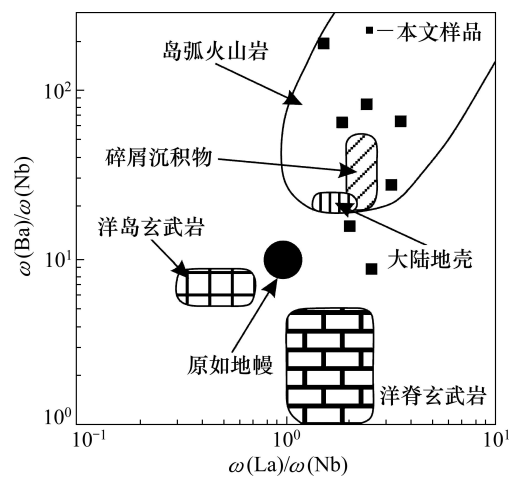


图 9 金滩金矿安山岩 $\omega(\text{La})/\omega(\text{Nb})$ 与 $\omega(\text{Ba})/\omega(\text{Nb})$ 的关系图(据文献[34])

Fig. 9  $\omega(\text{La})/\omega(\text{Nb})$  versus  $\omega(\text{Ba})/\omega(\text{Nb})$  diagram for andesites of Jintan gold deposit(according to Ref.[34])

### 4.3 成矿意义

矿区安山岩富集大离子亲石元素和具有明显负 Eu 异常,暗示安山岩曾经历过较好的岩浆分异作用过程,在岩浆作用条件下可以形成富集硫化物的长英质硅酸盐岩浆<sup>[36]</sup>,这是本区安山岩形成金铜多金属矿床十分有利的背景条件。经研究发现<sup>[37]</sup>,矿区安山岩的金质量分数普遍较高,平均达到  $25.79 \times 10^{-9}$ ,为地壳金丰度( $3.50 \times 10^{-9}$ )的 7.31 倍,为成矿带金背景值( $0.97 \times 10^{-9}$ )的 26.59 倍,对金成矿十分有利。另外,对金滩金矿的围岩安山岩和矿石中的硫同位素特征进行研究,结果显示,矿石硫同位素组成与围岩安山岩相近,说明两者同源。上述研究说明,围岩安山岩为金滩金矿的形成提供了矿源。陈文等<sup>[38]</sup>通过 Ar-Ar 同位素年代学研究认为,秋格明塔什—黄山韧性剪切带剪切变形作用主活动期为 262.9~242.8 Ma,而金滩金矿床主成矿期范围为 261.0~246.5 Ma,恰好落在剪切变形作用主活动期的时代范围之内,明显晚于围岩安山岩的形成时期。矿床 H 和 O 同位素研究结果表明成矿流体为岩浆水(或变质水)与大气降水的混合源,岩浆水(或变质水)在上升过程中,混入了大量的大气降水。

东天山地区板块俯冲碰撞造山作用形成了秋格明塔什—黄山韧性剪切带。金滩金矿的空间分布严格受断裂构造的控制,并明显表现出“多级有序”的特点,不同级别的构造单元对成矿起着不同的控制作用,分别控制矿带、矿床以及矿体的产出和展布。具体构造控矿特征如下。

1) 韧性剪切带对矿带的控制。韧性剪切带属于高压区,根据金的地球化学行为,一般向高应力区迁移,因此,韧性剪切带聚集金的作用相当明显<sup>[39]</sup>。韧性剪切带形成后,应力得到释放,已成为构造薄弱地带,在其后的构造活动中,易于在剪切带中产生脆—韧性剪切带、脆性断裂,为后期的导矿、容矿提供空间。韧性剪切带一般延深大,可与基底构造(如深大断裂)连通,为成矿热循环聚富成矿提供条件。

2) 脆—韧性剪切带对矿床的控制。金滩金矿尽管受控于区域性韧性剪切带,但其产出并不是均匀分布在韧性剪切带内部,而是分布于秋格明塔什—黄山韧性剪切带南部边缘的次级脆—韧性变形转换带(康古尔—金滩脆—韧性剪切带)中。由于脆—韧性变形转换的动力过程对金成矿作用重大,其独特的时空域则成为运输反应耦合成矿的有利场所<sup>[40]</sup>。成矿流体在运移过程中,由韧性变形带向脆—韧性变形带迁移时,温度和压力会急剧降低,物理化学条件急剧变化,溶液中的成矿元素便有序地沉淀,形成金矿床<sup>[41]</sup>。

3) 脆性断裂对矿体的控制。矿区脆—韧性剪切带形成后,受后期右行直剪作用的影响,在脆—韧性剪切带中形成数条近于平行、规模大小不等的脆性断裂,其产状与脆—韧性剪切带基本一致,这些断裂即为金的赋矿空间。秋格明塔什—黄山韧性剪切带与康古尔—金滩脆—韧性剪切带以及发育于其中的脆性断裂沟通,共同构成“y”型成矿构造系统。成矿流体在“y”型构造系统中不断循环聚集,最终在容矿构造(脆性断裂)中富集成矿。

## 5 结论

1) 金滩矿区安山岩的锆石 U-Pb 年龄为  $(303.65 \pm 4.80) \text{ Ma}$ ,属于晚石炭世岩浆活动的产物。

2) 安山岩主要由英安岩、安山岩等组成,显示亚碱性系列钙碱性火山岩特征。综合岩石地球化学特征,认为可能形成于与俯冲碰撞造山作用有关的活动大陆边缘上的火山岛弧环境。

3) 康古尔洋向南俯冲,俯冲板片脱水形成流体(富水和大离子亲石元素)进入地幔楔,被俯冲流体交代的地幔楔发生部分熔融,同时产生结晶分异作用而形成安山岩,并在岩浆的演化过程中受到陆壳物质混染,说明东天山地区在晚石炭世依旧存在俯冲消减作用,与俯冲碰撞造山作用有关的岛弧型钙碱性中—酸性火山岩为金滩金矿的形成提供了矿源。

### 参考文献:

- [1] HUANG Xiaowen, QI Liang, GAO Jianfeng, et al. First reliable Re-Os ages of pyrite and stable isotope compositions of Fe (-Cu) deposits in the Hami region, Eastern Tianshan Orogenic Belt, NW China[J]. Resource Geology, 2013, 63(2): 166-187.
- [2] SONG Xieyan, WEI Xie, DENG Yufeng, et al. Slab break-off and the formation of Permian mafic-ultramafic intrusions in southern margin of Central Asian Orogenic Belt, Xinjiang, NW China[J]. Lithos, 2011, 127(1/2): 128-143.
- [3] QIN Kezhang, SU Benxun, ASAMOAH S P, et al. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-bearing-ultramafic intrusions in eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin (NW China): constraints on a Ca. 280 Ma mantle plume[J]. American Journal of Science, 2011, 311(3): 237-260.
- [4] SONG Xieyan, LI Xiangren. Geochemistry of the Kalatongke Ni-Cu-(PGE) sulfide deposit, NW China: implication for the formation of magmatic sulfide mineralization in a postcollisional environment[J]. Mineralium Deposita, 2009, 44(3): 303-327.

- [5] 王银宏,薛春纪,刘家军,等.新疆东天山土屋斑岩铜矿床地球化学、年代学、Lu-Hf 同位素及其地质意义[J].岩石学报,2014,30(11):3383-3399.  
WANG Yinhong, XUE Chunji, LIU Jiajun, et al. Geochemistry, geochronology, Lu-Hf isotope and geological significance of the Tuwu porphyry copper deposit in eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(11): 3383-3399.
- [6] 李锦轶,王克卓,孙桂华,等.东天山吐哈盆地南缘古生代活动陆缘残片:中亚地区古亚洲洋板块俯冲的地质记录[J].岩石学报,2006,22(5):1087-1102.  
LI Jinyi, WANG Kezhao, SUN Guihua, et al. Paleozoic active margin slices in the southern Turfan-Hami basin: geological records of subduction of the Paleo-Asian Ocean plate in central Asian regions[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1087-1102.
- [7] 李向民,夏林圻,夏祖春,等.东天山企鹅山群火山岩锆石 U-Pb 年代学[J].地质通报,2004,23(12):1215-1220.  
LI Xiangmin, XIA Linqi, XIA Zuchun, et al. Zircon U-Pb geochronology of volcanic rocks of the Qi'eshan Group in the Eastern Tianshan Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(12): 1215-1220.
- [8] 张良臣,吴乃元.天山地质构造及演化史[J].新疆地质,1985,3(3):1-14.  
ZHANG Liangchen, WU Naiyuan. The geotectonic and its evolution of Tianshan[J]. *Xinjiang Geology*, 1985, 3(3): 1-14.
- [9] 何国琦,李茂松,刘德权,等.中国新疆古生代地壳演化及成矿[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1994:50-57.  
HE Guoqi, LI Maosong, LIU Dequan, et al. Paleozoic crustal evolution and metallogenic in Xinjiang of China[M]. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1994: 50-57.
- [10] 王义天,毛景文,陈文,等.新疆东天山康古尔塔格金矿带成矿作用的构造制约[J].岩石学报,2006,22(1):236-244.  
WANG Yitian, MAO Jingwen, CHEN Wen, et al. Tectonic constraints on mineralization of the Kanggurtag gold belt in the Eastern Tianshan, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1): 236-244.
- [11] 张立成,王义天,陈雪峰,等.东天山红云滩铁矿床矿物、矿物化学特征及矿床成因探讨[J].岩石矿物学杂志,2013,32(4):431-449.  
ZHANG Licheng, WANG Yitian, CHEN Xuefeng, et al. Mineralogy, mineral chemistry and genesis of the Hongyuntan iron deposit in East Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2013, 32(4): 431-449.
- [12] 舒斌,马天林,陈宣华,等.东天山康古尔塔格金矿田控矿构造特征[J].地质通报,2007,26(2):166-173.  
SHU Bin, MA Tianlin, CHEN Xuanhua, et al. Characteristics ore-controlling structures in the Kanggur gold field, East Tianshan, Xinjiang, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(2): 166-173.
- [13] 张连昌,姬金生,杨兴科,等.东天山马头滩韧性剪切带型金矿地质特征及成因[J].西安工程学院学报,1998,20(4):15-19.  
ZHANG Lianchang, JI Jinsheng, YANG Xingke, et al. Geological characteristics and genesis of the ductile shear zone-type gold deposit in Matoutan Eastern Tianshan[J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 1998, 20(4): 15-19.
- [14] 柳小明,高山,袁洪林,等.193 nm LA-ICP-MS 对国际地质标准参考物质中42种主量和微量元素的分析[J].岩石学报,2002,18(3):408-418.  
LIU Xiaoming, GAO Shan, YUAN Honglin, et al. Analysis of 42 major and trace elements in glass standard reference materials by 193 nm LA-ICP-MS[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(3): 408-418.
- [15] LUDWIG K R. Isoplot: A plotting and regression program for radiogenic-isotope data[R]. Virginia: U S Geological Survey Open-File Report, 1991: 91-102.
- [16] LE MAITRE R W, BATEMAN P, DUDEK A, et al. A classification of igneous rocks and glossary of terms[M]. Oxford: Blackwell, 1989: 206.
- [17] WINCHESTER J A, FLOYD P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20(4): 325-343.
- [18] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [19] IRVINE T N, BARAGAR W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8(5): 523-548.
- [20] BOYNTON W V. Geochemistry of the rare earth elements meteorite studies[C]//HENDERSON P. Rare earth element geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [21] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C]//SAUNDERS A D, NORRIS M J. Magmatism in the ocean basins. London: Geological Society Special Publication, 1989: 313-345.
- [22] GILL J B. Orogenic andesites and plate tectonics[M]. Berlin: Springer Verlag, 1981: 282-290.
- [23] CONDIE K C. Mantle plume and their record in earth history[M]. London: Cambridge University Press, 2001: 30-43.
- [24] ROLLINSON H R. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1993: 265-287.
- [25] WILSON M. Igneous petrogenesis[M]. London: Springer, 1989: 121-133.
- [26] SALTERS V J M, HART S R. The mantle sources of ocean ridges, islands and arcs: the Hf isotope connection[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 104(2/3/4): 364-380.
- [27] WENDLANDT R F, ALTHERR R, NUEMANN E R, et al. *Petology, geochemistry, isotopes*[C]//OLSEN K H, Continental

- Rifts: Evolution, Structures, Tectonics. Amsterdam: Elsevier, 1995: 47-60.
- [28] FREY F A, GREEN D H, ROY S D. Integrated models of basalt petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from southeastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data[J]. *Journal of Petrology*, 1978, 19(3): 463-513.
- [29] 高林, 陈斌. 鲁西地块济南辉长岩岩石学、地球化学和 Os-Nd-Sr 同位素研究[J]. *地球科学与环境学报*, 2013, 35(2): 19-31.
- GAO Lin, CHEN Bin. Study on petrology, geochemistry and Os-Nd-Sr isotopes of Jinan Gabbro in Luxi Block[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2013, 35(2): 19-31.
- [30] 丁建华, 肖成东, 秦正永. 洞子沟地区大红峪组富钾火山岩岩石学、地球化学特征[J]. *地质调查与研究*, 2005, 28(2): 100-105.
- DING Jianhua, XIAO Chengdong, QIN Zhengyong. Petrological and geochemical research on Dahongyu ultra-potassic volcanic rocks in Dongzigou Area, Hebei Province[J]. *Geological Survey and Research*, 2005, 28(2): 100-105.
- [31] GREEN T H. Significance of Nb/Ta as indicator of geochemical processes in the crust-mantle system[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120 (3/4): 347-359.
- [32] 赵振华, 王强, 熊小林. 俯冲带复杂的壳幔相互作用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2004, 23(4): 277-284.
- ZHAO Zhenhua, WANG Qiang, XIONG Xiaolin. Complex mantle-crust interaction in subduction zone[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2004, 23(4): 277-284.
- [33] KEPEZHINSKAS P, MCDERMOTT F, DEFANT M J, et al. Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka arc petrogenesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(3): 577-600.
- [34] ALLEGRE C J, MINSTER J F. Quantitative models of trace element in igneous petrology[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1978, 38(5): 1-25.
- [35] ROLLISON H R. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation[M]. Edinburgh: Longman, 1993: 260-275.
- [36] ANDREW G T, JOHN A M. Generation of metal-rich felsic magmas during crustal anatexis[J]. *Geology*, 2003, 31(9): 765-768.
- [37] 李彤泰. 东天山康古尔塔格金矿带地质特征及成矿规律[J]. *黄金地质*, 2004, 10(3): 13-16.
- LI Tongtai. Geological features and metallogenic rules of Kanggurtage gold belt in East Tianshan[J]. *Gold Geology*, 2004, 10(3): 13-16.
- [38] 陈文, 张彦, 秦克章, 等. 新疆东天山剪切带型金矿床时代研究[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8): 2007-2016.
- CHEN Wen, ZHANG Yan, QIN Kezhang, et al. Study on the age of the shear zone-type gold deposit of East Tianshan, Xinjiang, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(8): 2007-2016.
- [39] 王魁元. 韧性剪切带内元素的聚集和离散及其平衡计算[J]. *国外前寒武纪地质*, 1993, 16(4): 73-84.
- WANG Kuiyuan. The aggregation, discrete, balance calculation of the elements in ductile shear zone[J]. *Overseas Precambrian Geology*, 1993, 16(4): 73-84.
- [40] 邓军, 杨立强, 孙忠实, 等. 构造体制转换与流体多层循环成矿动力学[J]. *地球科学*, 2000, 25(4): 397-403.
- DENG Jun, YANG Liqiang, SUN Zhongshi, et al. Ore-forming dynamics of tectonic regime transformation and multi-layer fluid circulation[J]. *Earth science-Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(4): 397-403.
- [41] 吕古贤, 郭涛. 阜山金矿区构造变形岩相特征与成矿流体构造物理化学特征研究[J]. *地质地球化学*, 2001, 29(3): 90-93.
- LÜ Guxian, GUO Tao. Tectono-deformation-facies characteristics and tectono-physicochemistry of metallogenic liquid for Fushan gold deposit[J]. *Geology Geochemistry*, 2001, 29(3): 90-93.

(编辑 陈灿华)