

青海沱沱河地区那日尼亚铅锌矿床 地质与地球化学研究

张 翀¹ 宋玉财² 侯增谦² 庄天明³ 李连松⁴ 贾宗涌⁴ 闫 明⁴ 陈生彦⁴

(1. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 344000; 2. 中国地质科学院 地质研究所, 北京 100037;
3. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 青海省第五地质矿产勘查院, 青海 西宁 810028)

摘 要: 那日尼亚铅锌矿床是在青藏高原近来发现的、与钾质火山岩岩浆活动有关的矿床。分析表明, 新鲜赋矿火山岩 SiO_2 含量 62.9%~68.6%, K_2O 含量 5.1%~5.8%, 属钾玄岩系列, 其轻稀土和大离子亲石元素相对富集, Nb、Ta、Ti 等元素强烈亏损, Sr/Y-Y 图解投影点落入已报道的藏北钾质-超钾质岩分布范围之内, 指示岩浆起源于富集地幔或受下地壳物质混染的软流圈地幔。矿床的矿体呈脉状出现在粗面岩中, 由一系列细脉状的矿石构成, 硫化物主要是方铅矿和黄铁矿, 也含少量闪锌矿和黄铜矿, 脉石矿物以石英为主, 并发育方解石、白云石、绢云母, 围岩蚀变以白云母化和黄铁矿化为主。石英中流体包裹体为盐水体系, 均一温度为 170~300℃、盐度为 2%~9% NaCl_{eq} (质量分数) 指示成矿流体可能来自岩浆活动驱动的地表水, 方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 -0.1~1.7 之间, 铅同位素组成落入藏北钾质-超钾质岩石的组成范围内, 指示硫和铅均来自赋矿的钾质火山岩。那日尼亚铅锌矿床与沱沱河地区碳酸盐岩容矿铅锌矿床的地质和地球化学特征差别明显, 两者不是一套成矿系统的产物。

关键词: 钾质火山岩 地质和地球化学特征 那日尼亚 沱沱河

中图分类号: P595; P618.42; P618.43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)03-0291-14

Geological and geochemical studies of the Nariniya lead-zinc deposit in Tuotuohe area, Qinghai Province

ZHANG Chong¹, SONG Yu-cai², HOU Zeng-qian², ZHUANG Tian-ming³, LI Lian-song⁴,
JIA Zong-yong⁴, YAN Ming⁴ and CHEN Sheng-yan⁴

(1. College of Earth Science, East China Institute of Technology, Nanchang 344000, China; 2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. Qinghai No. 5 Institute of Geology and Mineral Resources, Xining 810028, China)

Abstract: The Nariniya lead-zinc deposit, recently discovered in the Tibetan Plateau, is genetically linked to the activities of potassic volcanic magma. Studies show that the SiO_2 and K_2O content of the fresh host rocks is 62.9%~68.6% and 5.1%~5.8%, respectively, indicative of a shoshonitic series. The host rocks are relatively enriched in LREE and large iron lithophile elements and strongly depleted in elements such as Nb, Ta, and Ti. The Sr/Y ratios and Y content fall into the range of the potassium-ultrapotassic rocks, which has already been reported. These data suggest that the magma was sourced from enriched mantle or the asthenosphere mantle which had been contaminated by lower crustal material. Ore bodies occur as NWW-striking veins in volcanic rocks, consisting of galena, pyrite, quartz, calcite, dolomite, and minor sphalerite, chalcopyrite, and

收稿日期: 2013-03-10; 修订日期: 2013-04-16

基金项目: 国家重点基础研究规划项目(2009CB421008, 2011CB403104); 国家自然科学基金(41273050, U0933605, 41102040); IGCP/SIDA 600 项目; 国土资源大调查项目(1212011220908, 1212011121065)

作者简介: 张 翀(1988-), 男, 汉族, 硕士, 矿产普查与勘探专业, E-mail: hyeta.z@gmail.com; 通讯作者: 宋玉财(1978-), 副研究员, 矿物学岩石学矿床学专业, E-mail: songyucai@gmail.com

sericite. The alteration is dominated by muscovitization and pyritization. Fluid inclusions in quartz belong to a $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ system and have the homogenization temperature of $170 \sim 300^\circ\text{C}$ and the salinity of $2\% \sim 9\%$ $\text{Na}-\text{Cl}_{\text{eq}}$, which probably represents meteoric water driven by magmatic activity. The $\delta^{34}\text{S}$ values of galena are from -0.1 to 1.7 and the Pb isotopic compositions fall into the range of the potassium-ultrapotassic rocks of northern Tibet, so the sulfur and lead were probably derived from the potassic volcanic rocks. The Nariniya lead-zinc deposit is significantly different from carbonate-hosted lead-zinc deposits in Tuotuohe region in geological and geochemical characteristics, so they belong to different ore-forming systems.

Key words: potassic volcanic rocks; geological and geochemical characteristics; Nariniya; Tuotuohe

新生代印-亚大陆碰撞造就了宏伟的青藏高原,同时也导致大量金属矿床的形成。过去研究识别出这些矿床有多种类型,包括斑岩型和矽卡岩型 $\text{Cu}(-\text{Mo}-\text{Au}, -\text{Pb}-\text{Zn}, \text{Sn}-\text{W})$ 矿床、造山型 Au 矿床、沉积岩容矿 $\text{Pb}-\text{Zn}$ 和 Cu 矿床、热液脉型 $\text{Sb}(-\text{Au})$ 矿床、碱性岩和碳酸岩容矿 REE 矿床等,矿床的形成被认为与侵入岩岩浆活动、变质流体活动以及盆地流体活动有关(侯增谦等, 2008; Hou and Cook, 2009)。

然而,在青藏高原,除发育大量新生代侵入岩外,还发育有大量新生代火山岩,其中,钾质-超钾质火山岩分布十分广泛(图 1),但是迄今为止,尚未见到有关此类岩浆活动可与金属成矿相关的报道。近年来,在羌塘地体沱沱河地区的查保玛组粗面岩内发现了那日尼亚铅锌矿床,围岩锆石 U-Pb 定年和蚀

变绢云母 Ar-Ar 定年显示成岩和成矿时代一致,都在 38 Ma 左右(宋玉财, 另文发表),显示矿床形成与岩浆活动有关,这暗示青藏高原新生代钾质火山岩具有一定的成矿潜力。本次工作,主要对该矿床围岩的主、微量元素进行了分析,对矿床地质、矿体和蚀变、矿石矿化特点、流体包裹体、硫化物 S-Pb 同位素开展了研究,以此来讨论赋矿围岩的岩浆起源和矿床的成因。

1 地质背景

那日尼亚铅锌矿床位于青藏高原中部的羌塘地块上(图 1)地理上处于青海省南部的沱沱河地区。该区主要发育石炭纪到中新世的沉积岩和火山岩,

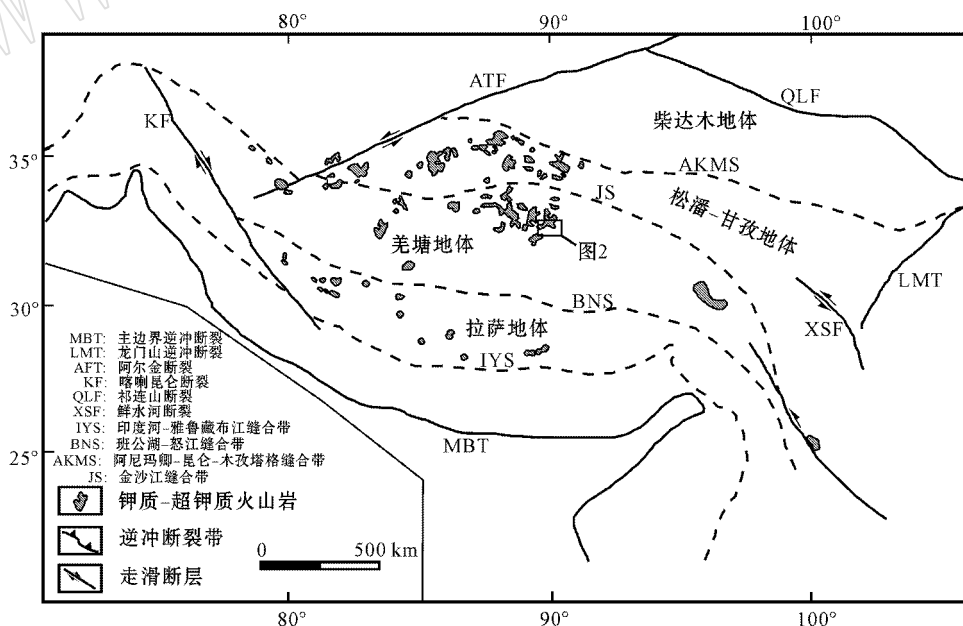


图 1 青藏高原高钾-超钾质火山岩分布及那日尼亚铅锌矿床位置(据赵志丹等, 2006)

Fig. 1 Distribution of high K and ultra K volcanic rocks in the Tibetan Plateau where the Nariniya Lead-zinc deposit lies in the Qiangtang block (after Zhao Zhidan *et al.*, 2006)

缺失下-中三叠统、下侏罗统地层,白垩系地层和新生地地层呈不整合接触^{①②}。区内未见老的变质基底。区内主要构造样式为北西-南东走向的新生代逆冲构造,逆冲由南向北,依次形成高角度逆冲带、褶皱逆冲带和低角度逆冲带(Li *et al.* , 2012)。沱沱河地区出露的侵入体主要见于唐古拉山一带,为白垩纪花岗岩。另外,在沱沱河北岸的扎木曲-扎拉夏格涌一带,见有新生代正长斑岩,在沱沱河南岸的多才玛矿区内,见早三叠世正长斑岩和闪长岩。

区内火山岩主要发育在 3 个时期,早期火山岩为二叠纪诺日巴嘎日堡组玄武质安山岩和玄武岩,中期为晚三叠世甲丕拉组中、基性火山岩,晚期出现在新生代,主要发育在那日尼亚及以西地区,岩性为粗面岩,属羌塘地体上新世代钾质火山岩的组成部分(邓万明等, 1998 ;Ding *et al.* , 2003),那日尼亚

矿床便赋存于这套火山岩内。目前,那日尼亚矿床还处于勘查过程中,已获得铅资源量为 21.34 万吨,平均品位 1.47% ,达到中型矿床规模^③。

2 矿床地质与矿体矿化特征

那日尼亚地区出露侏罗系索瓦组灰岩和碎屑岩、白垩系错居日组红色碎屑岩、古近系沱沱河组红色碎屑岩,古近系查保玛组火山岩覆盖于沱沱河组之上。矿区内发育有两条较大的断层:F1 和 F2 断层,断层穿过查保玛组火山岩。其中,规模较大的 F1 断层呈北西-南东向延伸,倾向北东,倾角 50° ,其在矿区形成了较大的破碎蚀变带,与铅锌矿体的产出有密切的联系(图 2)。矿体赋存于查保玛组火山岩中,新鲜火山岩多呈灰白色(浅)灰绿色(图 3a)。

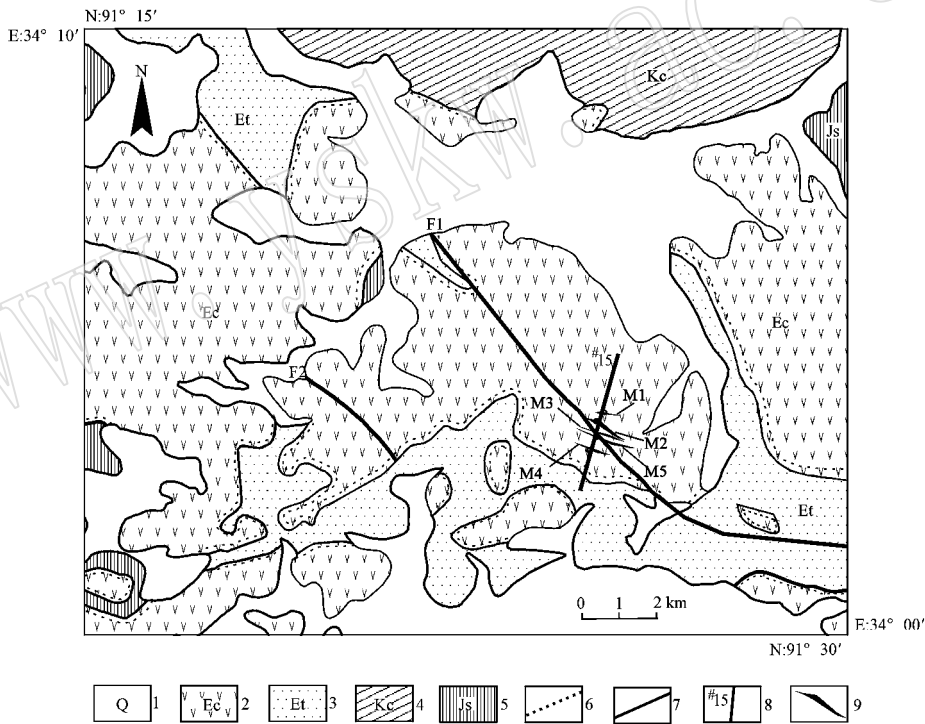


图 2 那日尼亚矿床矿区地质简图(据青海省第五地质矿产勘查院, 2010^④简化)

Fig. 2 Simplified geological map of the Nariniya deposit (after No. 5 Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Qinghai Province, 2010^④)

1—第四系,古近纪;2—查保玛组,灰白-浅灰色粗面岩;3—沱沱河组,砖红、紫红色石英砂岩,含砾砂岩、粉砂岩,局部夹泥岩和泥灰岩;白垩纪;4—错居日组,紫、紫灰色厚层状-巨厚层状岩屑砂岩、砾岩,钙质岩屑砂岩;侏罗纪;5—索瓦组,深灰色厚层状泥晶灰岩、生物碎屑灰岩、砂屑灰岩夹灰色泥质钙质粉砂岩;6—不整合线;7—断层;8—#15 勘探线;9—矿体及编号
1—Quaternary; 2—Chabaoma Formation; 3—Tuotuohe Formation; 4—Cuojuri Formation; 5—Suowa Formation; 6—unconformity; 7—fault; 8—exploration line; 9—ore body

① 成都理工大学. 2004. 1:25 万温泉兵站幅地质图(146C003002).
② 青海省地质调查院. 2005. 1:25 万沱沱河幅地质图(146C002002).
③ 青海省第五地质矿产勘查院. 2010. 青海沱沱河纳保扎陇-那日尼亚铅锌银矿调查设计.
④ 青海省第五地质矿产勘查院. 2010. 青海沱沱河纳保扎陇-那日尼亚铅地区综合地质图.

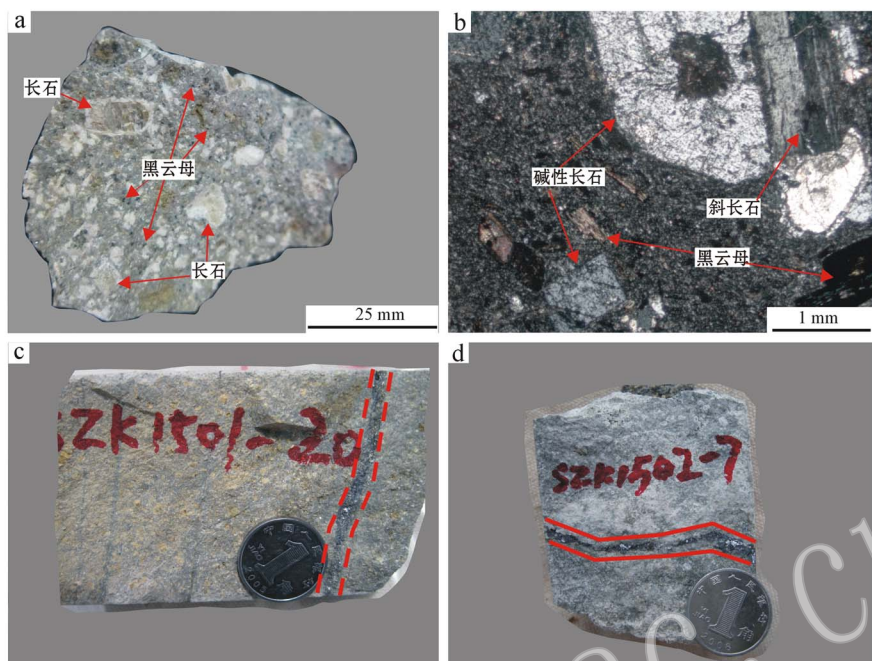


图 3 那日尼亚铅锌矿床新鲜粗面岩、矿石照片及镜下照片

Fig. 3 Photograph and micrograph of fresh trachyte and ore from the Nariniya deposit

a—那日尼亚矿床的围岩(新鲜粗面岩); b—粗面岩显微镜下照片; c、d—那日尼亚矿床典型矿石
a—fresh trachyte, the host rock of the Nariniya deposit; b—microscopic photos of fresh trachyte from the Nariniya deposit;
c, d—ores from the Nariniya deposit

镜下观察显示,岩石具斑状结构,斑晶总量约占 30%,斑晶主要为呈短柱状的碱性长石和黑云母,粒径多 $>3\text{ mm}$,最大长轴达到 6 mm 左右,其中斜长石占斑晶总量的 $1\% \sim 2\%$;细粒黑云母约占 $5\% \sim 10\%$;石英一般粒度较小,石英约占 1% ;基质为微晶质(图 3b)。

在那日尼亚矿区共圈出 M1、M2、M3、M4 和 M5 共 5 条铅锌矿(化)体,北西西-南东东走向,矿化带长约 $330 \sim 950\text{ m}$,宽 $1\,000\text{ m}$ 左右(图 2)。15 号勘探线上的钻孔资料显示,矿体倾向南东,倾角 $50^\circ \sim 55^\circ$,呈脉状、树枝状,横向上和纵向上都不连续,由多条矿化体组成(图 4)。

矿石为脉状、细脉状(图 3c、3d)。脉状矿石中硫化物主要为方铅矿和黄铁矿,局部见黄铜矿、闪锌矿,脉中脉石矿物主要为石英、方解石、白云石,偶见绢云母(图 5)。矿脉中热液矿物有多种组合样式:①石英+方铅矿+黄铁矿(图 5a);②石英+方解石+方铅矿脉(图 5b);③石英+方铅矿+闪锌矿+黄铜矿(图 5c);④石英+方铅矿+黄铁矿+闪锌矿+黄铜矿(图 5d);⑤石英+绢云母+方铅矿(图 5g);⑥石英+绢云母+方铅矿+黄铜矿+黄铁矿(图 5f);⑦黄铁矿脉(图 5h);⑧石英+方解石+白云石

等(图 5i)。

围岩均伴随强烈黄铁矿化和白云母化,往往以浸染状形式出现,并与矿化富集程度呈正相关关系,即铅锌矿化强的部位,围岩的黄铁矿化和绢云母化蚀变程度就越强,远离矿化部位,蚀变随之减弱(图 6)。

3 样品处理及测试方法

选取 5 件新鲜的围岩开展主量元素、微量元素和稀土元素分析。测试工作均在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成,其中主量元素用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定,微量元素和稀土元素采用等离子质谱法(ICP-MS)测定,分析过程中均以国际标准样品 AMH-1(安山岩)为标样,分析误差小于 10% ,分析结果见表 1。

选取矿石中方铅矿单矿物样品开展 S 和 Pb 同位素分析。S 同位素分析测试工作在国土资源部同位素地质重点实验室 MAT-252EM 型同位素质谱计(Finnigan 公司)上完成。测试以 Cu_2O 作氧化剂制备 SO_2 ,分析精度均为 $\pm 0.2\%$ (2σ),采用 V-CDT 标准。分析结果见表 3。

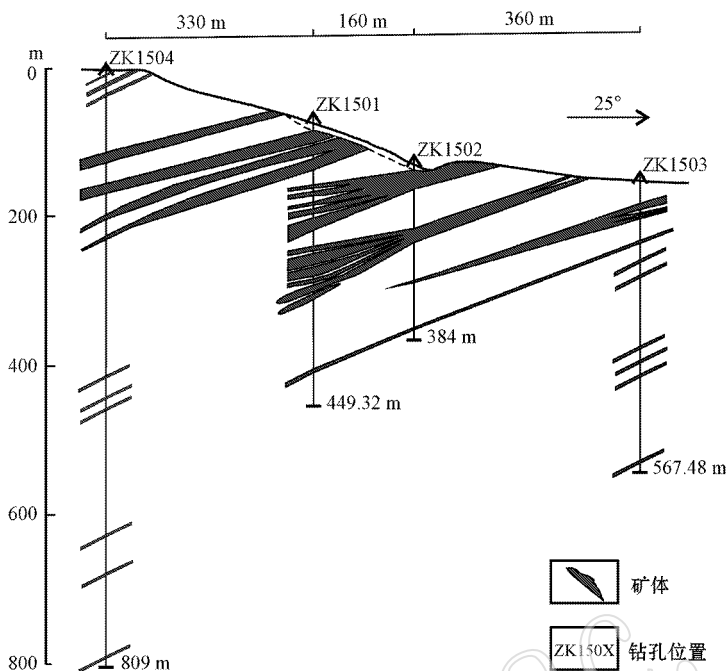


图 4 那日尼亚矿床 15 号勘探线矿体剖面图(与闫明等私人交流)

Fig. 4 Cross-section of the ore body along No. 15 exploration line(private communication with Yan Ming *et al.*)

Pb 同位素测试工作在中国地调局武汉地质调查中心同位素实验室完成,测试仪器型号为 MAT261 质谱仪,实验流程:先用蒸馏水把样品洗净,再用二次蒸馏的硝酸和盐酸混合物使样品溶解,然后用氢溴酸和阴离子交换树脂分离和提纯铅,再用磷酸和硅胶涂到铈带上,最后用质谱分析。同位素比值绝对误差低于 0.01,分析结果见表 3。

进行流体包裹体岩相学观察,识别包裹体类型,然后选择合适的包裹体开展测温。显微测温工作在中国地质科学院矿产资源研究所完成,所用冷热台型号为 THSMG-600,测定温度范围 $-200 \sim +600^{\circ}\text{C}$,冷冻数据和均一温度数据精度分别为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。本次研究选择成矿期石英中的包裹体作为对象。首先将用于研究的样品磨制成厚 $0.125 \sim 0.130 \text{ mm}$ 的包裹体片,在显微镜上进行流体包裹体岩相学观察,鉴定出与成矿同期的流体包裹体,圈出适合测温的有代表性的原生包裹体。再将符合条件的包裹体片用酒精浸泡并清洗干净,分别编号装入小盒中待测。冷冻测温时,利用液氮对流体包裹体降温,在温度下降过程中观察流体包裹体的变化,待流体包裹体完全冻结后,缓慢升温,观察初熔点、冰点等,当温度接近相变点时,控制升温速度,速率变为 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$,记录流体包裹体初熔温度、冰点温度。进行均一温度测定时,升温速度在 10

$^{\circ}\text{C}/\text{min}$,在升温过程中观察气液两相的变化,当气相接近消失时,将升温速度控制到 $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$,以便准确记录均一温度。

4 结果

4.1 围岩主、微量元素特征

矿床新鲜围岩的主量元素分析结果见表 1。查保玛组火山岩 $\text{SiO}_2 = 62.93\% \sim 68.61\%$,平均值为 67.11% ,在 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{SiO}_2$ 图上,5 个样品落入了粗面岩的范围内(图 7a),结合镜下观察,可定名为粗面英安岩。岩石全碱 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 9.19\% \sim 8.58\%$, $\text{K}_2\text{O} = 5.1\% \sim 5.81\%$, $\text{Na}_2\text{O} = 2.77\% \sim 3.29\%$, $\text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解表明岩石属于钾玄岩系列(图 7b)。样品 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.17\% \sim 15.60\%$,平均值为 15.43% , Al_2O_3 饱和度(A/CNK)介于 $1.12 \sim 1.17$ 之间。火山岩 $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1.90\% \sim 2.87\%$,平均值为 2.20% ; $\text{FeO} = 0.20\% \sim 1.31\%$,平均值为 0.44% ; $\text{TFeO} = 1.91\% \sim 3.89\%$,平均值为 2.43% , $\text{MgO} = 0.90\% \sim 3.51\%$, $\text{Mg}^{\#} = 31 \sim 47$ 。

矿床新鲜围岩的稀土和微量元素分析结果分别见表 1。原始地幔数据标准化,微量元素蛛网图显示(Sun and McDonough, 1989),粗面岩明显富集 Rb、Ba、Th、K 等大离子亲石元素(LILE),强烈亏损 Ta、

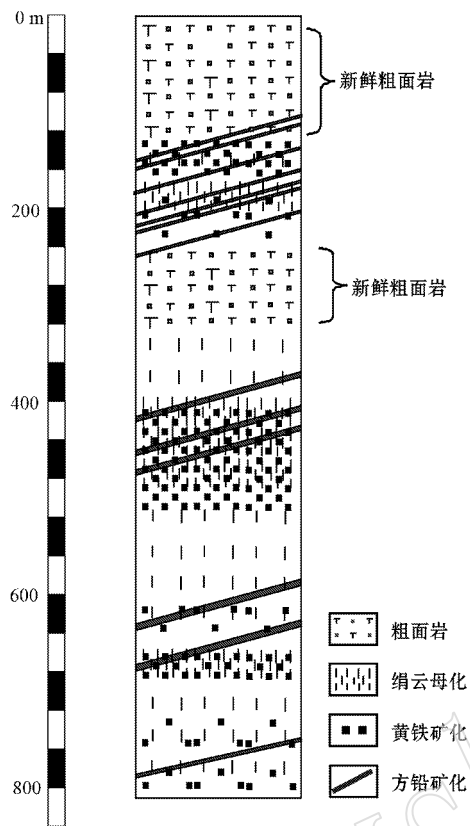


图 6 1504 钻孔的蚀变与矿化特点

Fig. 6 Relationship between mineralization and alteration in drill hole 1504

表 1 那日尼亚铅锌矿床粗面岩主量元素($w_B/\%$)
微量及稀土元素($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 1 Analytical results of major($w_B/\%$), trace and REE($w_B/10^{-6}$) elements of trachyte from the Nariniya Pb-Zn deposit

| 样品原号 | NR09-10 | NR11-01 | NR11-02 | NR11-03 | NR11-04 |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| SiO ₂ | 68.07 | 62.93 | 68 | 68.61 | 67.96 |
| TiO ₂ | 0.5 | 0.66 | 0.5 | 0.48 | 0.5 |
| Al ₂ O ₃ | 15.5 | 15.17 | 15.6 | 15.38 | 15.49 |
| TFeO | 2.03 | 3.89 | 1.91 | 1.98 | 2.34 |
| MnO | 0.03 | 0.1 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| MgO | 1.31 | 3.51 | 0.95 | 0.9 | 1.26 |
| CaO | 1.4 | 1.14 | 1.62 | 1.51 | 1.65 |
| Na ₂ O | 3.29 | 2.77 | 3.1 | 3.03 | 3.09 |
| K ₂ O | 5.11 | 5.81 | 5.41 | 5.54 | 5.1 |
| P ₂ O ₅ | 0.35 | 0.54 | 0.32 | 0.31 | 0.32 |
| LOI | 1.68 | 2.24 | 1.7 | 1.38 | 1.61 |
| Total | 99.82 | 99.24 | 99.51 | 99.42 | 99.9 |
| K ₂ O/Na ₂ O | 1.55 | 2.1 | 1.75 | 1.83 | 1.65 |
| Mg [#] | 39 | 47 | 33 | 31 | 35 |
| A/CNK | 1.15 | 1.17 | 1.12 | 1.12 | 1.14 |
| σ | 2.81 | 3.69 | 2.9 | 2.87 | 2.69 |

续表 1

Continued 1

| 样品原号 | NR09-10 | NR11-01 | NR11-02 | NR11-03 | NR11-04 |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Be | 3.68 | 4.09 | 3.72 | 3.61 | 3.75 |
| Sc | 6.92 | 10.3 | 6.16 | 6.04 | 6.65 |
| Ti | 2 903 | 3 774 | 2 993 | 2 918 | 2965 |
| V | 46.6 | 69.3 | 47.5 | 46.5 | 47.5 |
| Cr | 45.9 | 102 | 47 | 39.7 | 45.6 |
| Co | 9.08 | 14.3 | 4.33 | 4.34 | 5.79 |
| Ni | 42.2 | 56 | 27.6 | 24.7 | 27.3 |
| Cu | 13.4 | 22.2 | 13.9 | 12.2 | 9.89 |
| Zn | 283 | 522 | 192 | 173 | 387 |
| Ga | 22.8 | 23.1 | 22.4 | 22.3 | 21.8 |
| Rb | 189 | 232 | 204 | 213 | 211 |
| Sr | 1 167 | 934 | 1 168 | 1 111 | 1255 |
| Be | 3.68 | 4.09 | 3.72 | 3.61 | 3.75 |
| Sc | 6.92 | 10.3 | 6.16 | 6.04 | 6.65 |
| Ti | 2 903 | 3 774 | 2 993 | 2 918 | 2965 |
| V | 46.6 | 69.3 | 47.5 | 46.5 | 47.5 |
| Cr | 45.9 | 102 | 47 | 39.7 | 45.6 |
| Co | 9.08 | 14.3 | 4.33 | 4.34 | 5.79 |
| Ni | 42.2 | 56 | 27.6 | 24.7 | 27.3 |
| Cu | 13.4 | 22.2 | 13.9 | 12.2 | 9.89 |
| Zn | 283 | 522 | 192 | 173 | 387 |
| Ga | 22.8 | 23.1 | 22.4 | 22.3 | 21.8 |
| Rb | 189 | 232 | 204 | 213 | 211 |
| Sr | 1 167 | 934 | 1 168 | 1 111 | 1 255 |
| La | 121 | 126 | 101 | 105 | 93.4 |
| Ce | 231 | 274 | 200 | 206 | 183 |
| Pr | 22.4 | 25.7 | 18.9 | 19.8 | 18 |
| Nd | 75.5 | 88.9 | 63.9 | 67 | 61.5 |
| Sm | 10.6 | 12.9 | 9.22 | 9.87 | 8.93 |
| Eu | 2.36 | 2.99 | 2.07 | 2.32 | 2.1 |
| Gd | 6.53 | 7.92 | 6.12 | 6.42 | 5.26 |
| Tb | 0.9 | 1.06 | 0.81 | 0.88 | 0.7 |
| Dy | 3.77 | 4.84 | 3.31 | 3.66 | 2.99 |
| Ho | 0.64 | 0.81 | 0.55 | 0.62 | 0.51 |
| Er | 1.88 | 2.23 | 1.62 | 1.75 | 1.52 |
| Tm | 0.23 | 0.27 | 0.19 | 0.19 | 0.18 |
| Yb | 1.48 | 1.74 | 1.13 | 1.29 | 1.16 |
| Lu | 0.22 | 0.28 | 0.18 | 0.2 | 0.16 |
| Y | 18.1 | 23.8 | 15.5 | 17.3 | 14.8 |
| ΣREE | 478.51 | 549.64 | 409 | 425 | 379.41 |
| LREE | 462.86 | 530.49 | 395.09 | 409.99 | 366.93 |
| HREE | 15.65 | 19.15 | 13.91 | 15.01 | 12.48 |
| LREE/HREE | 29.58 | 27.7 | 28.4 | 27.31 | 29.4 |
| (La/Yb) _N | 55.12 | 48.82 | 60.26 | 54.88 | 54.28 |
| La/Sm | 11.42 | 9.77 | 10.95 | 10.64 | 10.46 |
| La/Yb | 81.76 | 72.41 | 89.38 | 81.4 | 80.52 |
| δEu | 0.87 | 0.9 | 0.84 | 0.89 | 0.94 |

注：TFeO=FeO+0.899 8×Fe₂O₃, Mg[#]=100×Mg/(Mg+Fe^T),
A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O), A/NK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O)

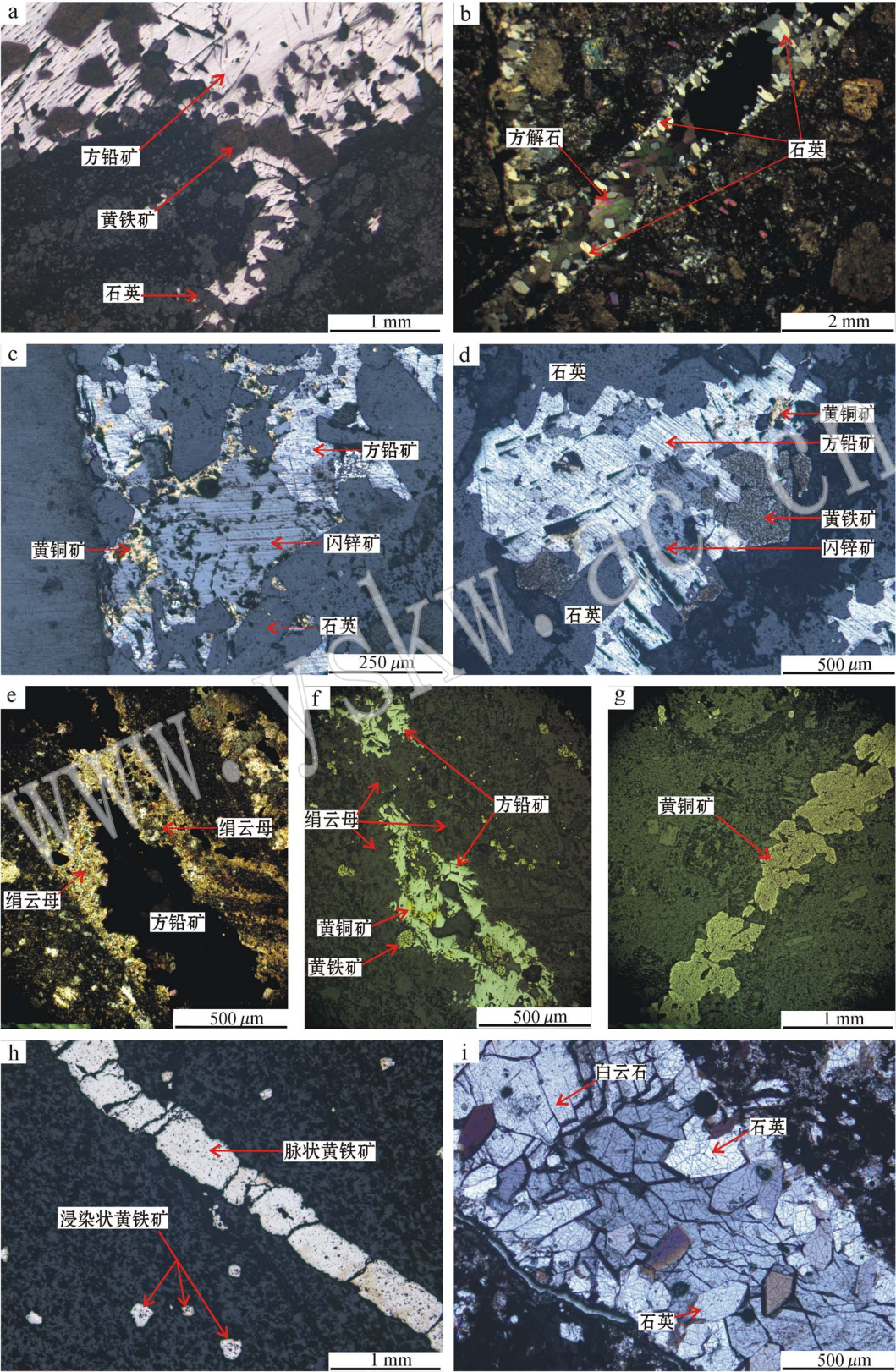


图 5 矿脉内热液矿物组合镜下照片

Fig. 5 Microphotograph of mineral assemblages in ores

表 2 那日尼亚铅锌矿床流体包裹体特征及参数

Table 2 Microthermometric data and characteristics of fluid inclusions from the Nariniya Pb-Zn deposit

| 序号 | 样品号 | 包裹体特征 | | 冰点温度/℃ | 均一温度/℃ | $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$ | 密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ |
|----|-------------|-------------------|---------|--------|--------|---------------------------------|---------------------------------------|
| | | 大小/ μm | 气液比估算/% | | | | |
| 1 | SZK1504-5-1 | 4~10 | 5~10 | -2.2 | 170 | 4.42 | 1.06 |
| 2 | SZK1504-5-1 | 4~5 | 5 | | 297 | | |
| 3 | SZK1504-5-1 | 10 | 5 | -3.9 | 214.5 | 6.95 | 1.08 |
| 4 | SZK1504-5-1 | 5~7 | 5~10 | | 245 | | |
| 5 | SZK1504-5-1 | 5~10 | 5 | -3.1 | 188 | 5.79 | 1.08 |
| 6 | SZK1504-5-1 | 6~10 | 5~10 | -3.5 | 180 | 6.37 | 1.09 |
| 7 | SZK1504-5-1 | 10~13 | 5 | -7 | 266 | | |
| 8 | SZK1504-5-1 | 8 | 5 | -4.2 | 279 | 7.37 | 1.03 |
| 9 | SZK1504-5-1 | 11~12 | 5~10 | | 263 | | |
| 10 | SZK1504-5-1 | 7~8 | 5~10 | -4 | 283 | 7.09 | 1.02 |
| 11 | SZK1504-5-1 | 4~10 | 5~10 | -4.7 | 223 | 8.09 | 1.11 |
| 12 | SZK1504-5-1 | 5 | 10 | -4.7 | 223 | 8.09 | 1.11 |
| 13 | SZK1504-5-1 | 5~20 | 5~10 | -4.7 | 223 | 8.09 | 1.11 |
| 14 | SZK1504-5-1 | 4~10 | 10~20 | -4.7 | 223 | 8.09 | 1.11 |
| 15 | SZK1504-5-1 | 7~8 | 5~10 | -4.9 | 275 | 8.34 | 1.07 |
| 16 | SZK1504-5-1 | 4~12 | 5~20 | | 278 | | |
| 17 | SZK1504-5-1 | 8~10 | 5~20 | | 214 | | |
| 18 | SZK1504-5-1 | 20 | 10 | -2.1 | 245 | 4.26 | 0.98 |
| 19 | SZK1504-5-1 | 6~17 | 5~20 | | 203 | | |
| 20 | SZK1504-7 | 9 | 10 | -5 | 255 | 4.26 | 0.97 |
| 21 | SZK1504-7 | 5~10 | 5 | | 189 | | |
| 22 | SZK1501-14 | 6~10 | 5~10 | -3.4 | 223 | 6.22 | 1.06 |
| 23 | SZK1501-14 | 10~13 | 5 | -2 | 232 | 4.1 | 0.98 |
| 24 | SZK1501-14 | 8 | 5 | -3.7 | 208 | 7.09 | 1.1 |
| 25 | SZK1501-14 | 11~12 | 5~10 | -3.7 | 208 | 7.09 | 1.1 |
| 26 | SZK1501-14 | 7~8 | 5~10 | -1.9 | 238 | 3.95 | 0.97 |
| 27 | SZK1502-4 | 4~10 | 5~10 | -3.2 | 274 | 5.94 | 1 |
| 28 | SZK1502-4 | 4~10 | 5~10 | -3.7 | 266 | 6.67 | 1.03 |
| 29 | SZK1502-4 | 4~5 | 5 | -3.7 | 266 | 6.67 | 1.03 |
| 30 | SZK1502-4 | 10 | 5 | -4 | 266 | 7.09 | 1.05 |
| 31 | SZK1502-4 | 5~7 | 5~10 | -4 | 266 | 7.09 | 1.05 |
| 32 | SZK1502-4 | 5~10 | 5 | -4 | 266 | 7.09 | 1.05 |
| 33 | SZK1502-4 | 6~10 | 5~10 | -4 | 266 | 7.09 | 1.05 |
| 34 | SZK1502-4 | 10~13 | 5 | -4 | 266 | 7.09 | 1.05 |
| 35 | SZK1502-4 | 8 | 5 | -4 | 266 | 7.09 | 1.05 |
| 36 | SZK1502-4 | 11~12 | 5~10 | -3.2 | 282 | 5.93 | 0.99 |
| 37 | SZK1502-4 | 7~8 | 5~10 | -3 | 298 | 5.64 | 0.97 |
| 38 | SZK1502-4 | 4~10 | 5~10 | -1.3 | 249 | 2.98 | 0.93 |
| 39 | SZK1502-4 | 5 | 10 | -1.4 | 256 | 3.14 | 0.93 |
| 40 | SZK1502-4 | 5~20 | 5~10 | | 261 | | |
| 41 | SZK1504-10 | 4~10 | 10~20 | | 190 | | |
| 42 | SZK1504-10 | 7~8 | 5~10 | -2.3 | 178 | 4.57 | 1.05 |
| 43 | SZK1504-10 | 4~12 | 5~20 | | 180 | | |
| 44 | SZK1504-10 | 8~10 | 5~20 | -2.2 | 200 | 4.42 | 1.02 |
| 45 | SZK1504-10 | 20 | 10 | -1.4 | 256 | 3.15 | 0.93 |
| 46 | SZK1504-10 | 6~17 | 5~20 | -3.1 | 221 | 5.78 | 1.05 |
| 47 | SZK1504-10 | 9 | 10 | -2.3 | 201 | 4.57 | 1.03 |
| 48 | SZK1504-10 | 5~10 | 5 | | 251 | | |
| 49 | SZK1504-10 | 6~10 | 5~10 | -3.1 | 224 | 5.78 | 1.04 |
| 50 | SZK1504-10 | 10~13 | 5 | | 190.5 | | |
| 51 | SZK1504-10 | 8 | 5 | | 185 | | |
| 52 | SZK1504-10 | 11~12 | 5~10 | | 172 | | |
| 53 | SZK1504-10 | 7~8 | 5~10 | | 275 | | |

注：本次测试数据均来自那日尼亚矿区实测成矿期石英脉中原生包裹体，且均为气液（VL）两相包裹体。

表 3 那日尼亚铅锌矿床粗面岩 S-Pb 同位素分析结果

Table 3 Analytical results of S-Pb isotopes of trachyte from the Nariniya Pb-Zn deposit

| 样品原号 | NRNY-2 -2 | NRNY-2 -3 | NRNY-2 -4 | OZK002 -1 | OZK002 -1 |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 样品名 | 方铅矿 | 方铅矿 | 方铅矿 | 方铅矿 | 方铅矿 |
| 采样地点 | 那日尼亚 | 那日尼亚 | 那日尼亚 | 那日尼亚 | 那日尼亚 |
| $\delta^{34}\text{S}_{\text{cdt}}/\text{‰}$ | 0.8 | -0.1 | 0.3 | 1.3 | 1.8 |
| $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | 18.708 | 18.73 | 18.698 | | 18.74 |
| $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | 15.671 | 15.698 | 15.66 | | 15.713 |
| $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | 38.951 | 39.08 | 38.951 | | 39.145 |

Nb、Ti 等高场强元素(HFSE)(图 8a)。粗面岩岩球粒陨石(Sun and McDonough, 1989)标准化稀土(REE)

为右倾型配分模式, 稀土总量 $\Sigma \text{REE} = 379.41 \times 10^{-6} \sim 549.64 \times 10^{-6}$, 平均为 448.31×10^{-6} , $\text{LREE}/\text{HREE} = 27.31 \sim 29.58$, 轻稀土相对于重稀土强烈富集(图 8b), $\delta\text{Eu} = 0.84 \sim 0.94$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 $48.82 \sim 60.26$ 。

4.2 流体包裹体岩相学和测温结果

成矿期石英脉中均发育有一定数量的流体包裹体(图 9), 为富液相的气液两相包裹体, 未见其他类型包裹体。包裹体孤立或成群出现, 呈负晶形、椭圆状、浑圆状。包裹体个体相对细小, 长轴直径多在 $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间, 气体填充度较小, 在 $5\% \sim 10\%$ 之间。

本次研究共测得石英中流体包裹体初熔温度 3 个, 冰点温度 53 个, 均一温度 37 个, 所测包裹体完

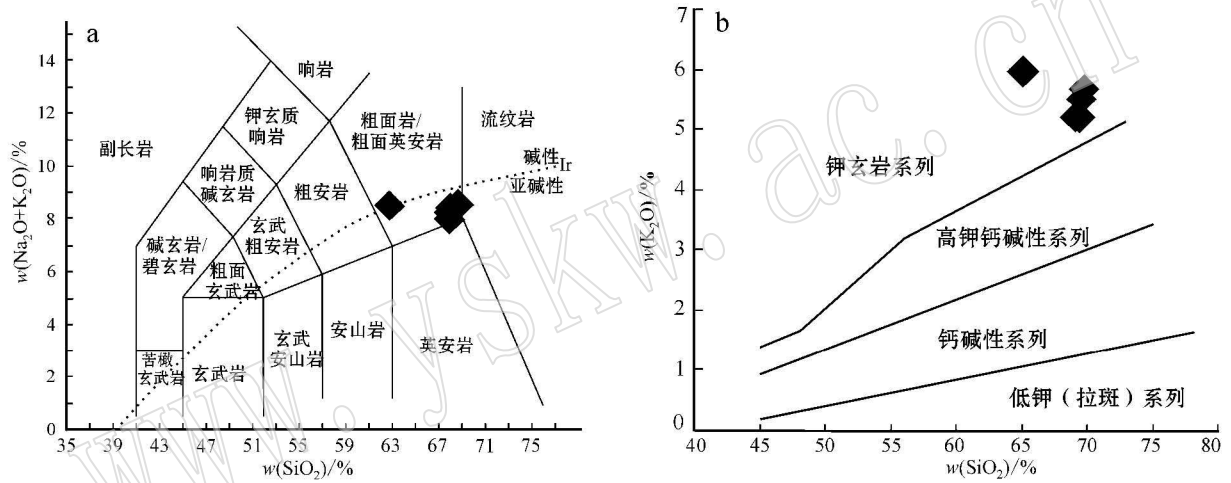


图 7 那日尼亚粗面岩全碱-硅(TAS)图(a, 据 Middlemost, 1994)和 K₂O-SiO₂ 图解(b, 底图据 Rollinson, 1993)
Fig. 7 TAS diagram (a, after Middlemost, 1994) and SiO₂-K₂O diagram (b, after Rollinson, 1993) of Nariniya trachyte

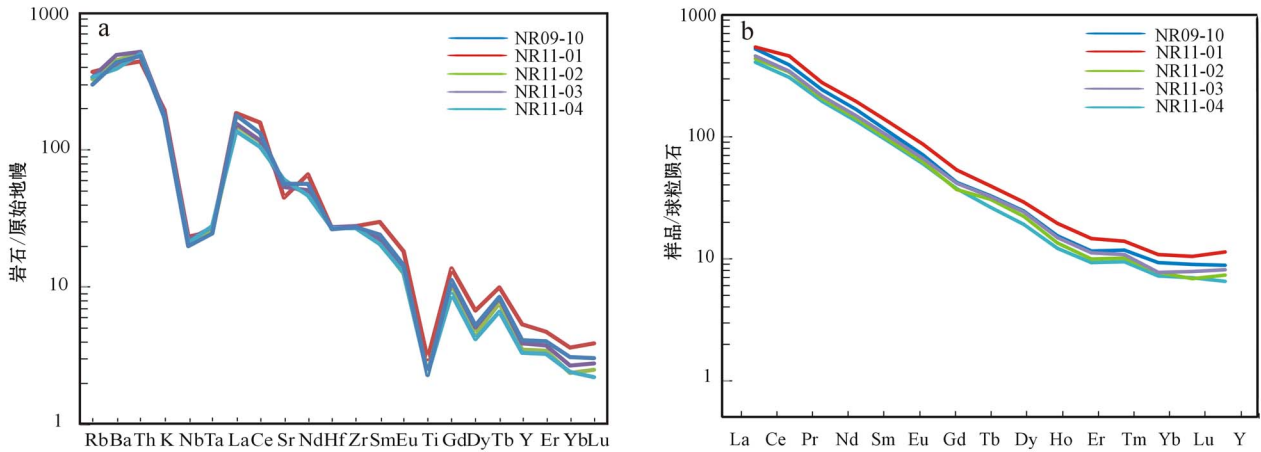


图 8 那日尼亚粗面岩微量元素地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化配分图(b)(标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)
Fig. 8 Trace element spider diagram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of Nariniya trachyte (data for normalization after Sun and McDonough, 1989)

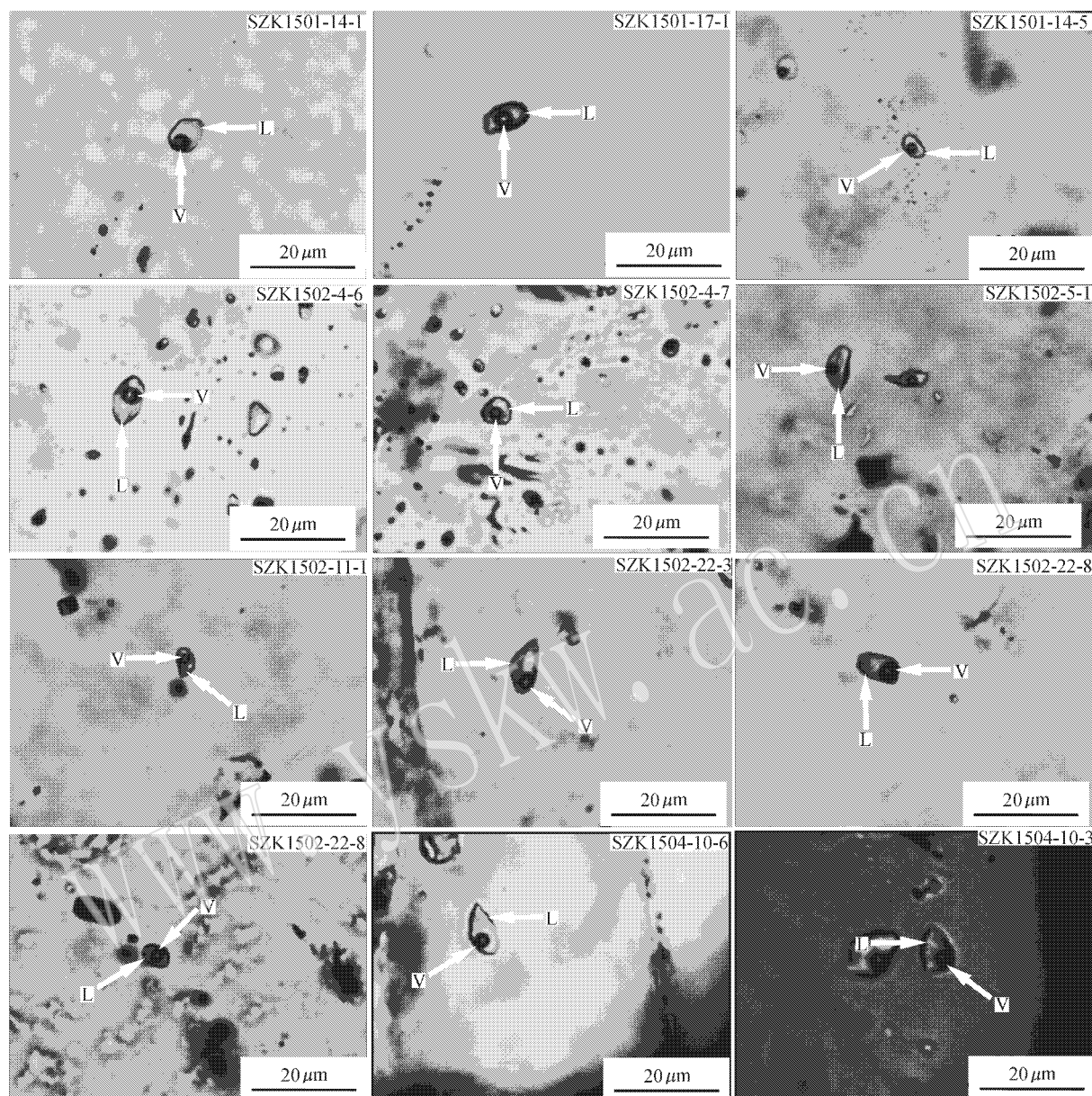


图 9 热液石英中的流体包裹体特征

Fig. 9 Microphotograph of fluid inclusions in hydrothermal quartz

全均一时都均一到液相,具体测温结果见表 2。3 个包裹体初熔温度为 -23°C 、 -30°C 、 -31°C ,故流体中盐类以 NaCl 为主,应含少量的 Ca^{2+} 或/和 Mg^{2+} (Roedder, 1963)。包裹体均一温度为 $170\sim 290^{\circ}\text{C}$,峰值在 $260\sim 270^{\circ}\text{C}$ (图 10a),盐度为 $3.0\%\sim 9.0\%$ (NaCl_{eq} 质量分数,下同) (Potter *et al.*, 1978) 峰值在 $7.0\%\sim 8.0\%$ (图 10b)。在盐度-温度投影图解中,数据点分布比较集中,且未见明显的相关性 (图 10c)。计算得到成矿流体密度为 $0.8\sim 0.9\text{ g/cm}^3$ (刘斌等, 1987),平均为 0.82 g/cm^3 。

4.3 方铅矿 S-Pb 同位素组成

分析结果显示,4 个方铅矿样品方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-0.1\text{‰}\sim 0.8\text{‰}$ (表 3),处于 0 值附近,且组成稳定,值域窄,具有正态分布特征。

方铅矿铅同位素组成: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.70\sim 18.74$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.66\sim 15.71$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.95\sim 39.15$ 。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中,本矿床样品投点落入了藏北钾质-超钾质岩石 Pb 同位素组成范围 (图 11a);在铅同位素 $\Delta\beta\text{-}\Delta\gamma$ 成因分类图解 (如图 11b) 上,本矿床样品投点在 3a 区域内,

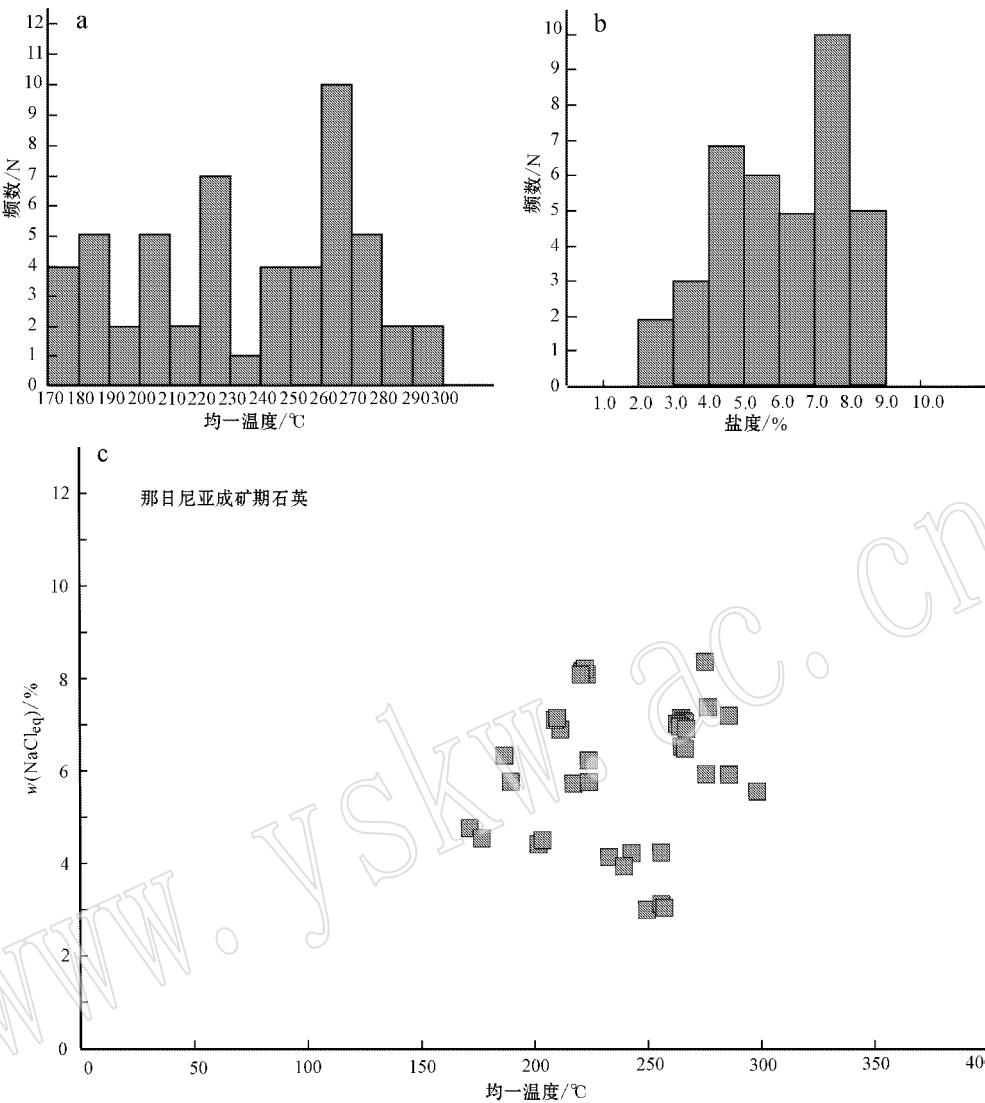


图 10 流体包裹体均一温度和盐度统计图解

Fig. 10 Diagrams of salinity and homogenization temperature of fluid inclusions

a—均一温度统计直方图；b—盐度统计直方图；c—盐度与均一温度关系图

a—histogram of homogenization temperature b—histogram of salinity c—diagrams of salinity versus homogenization temperature

即上地壳与地幔混合的俯冲带铅同位素组成范围内。

5 讨论

5.1 寄主岩浆起源

目前,涉及青藏高原碰撞后(超)钾质火山岩岩浆起源已有大量研究,且主要有如下几种观点:①起源于富集的岩石圈地幔(Turner *et al.*, 1996; 江东辉等, 2008);②起源于软流圈地幔,并受到下地壳物质的混染(Ding *et al.*, 2007);③起源于(拆沉

的)加厚下地壳,没有受到或受到岩石圈地幔物质的影响(Wang *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2008)。相比较,起源于加厚下地壳的钾质岩通常显示出高Sr低Y的埃达克质岩石地球化学特征(Hou *et al.*, 2004, 2012; Zheng *et al.*, 2012)。

本文开展的岩石主量元素分析显示,那日尼亚矿床赋矿围岩—查保玛组粗面岩为钾质火山岩,系羌塘地块上钾质火山岩的一部分。在Sr/Y—Y图解(图12)中,5个样品的数据投影点均落入冈底斯弧火山岩和林子宗火山岩分布区内,其中有部分数据点落入其与青藏高原埃达克质岩石分布区的重合区

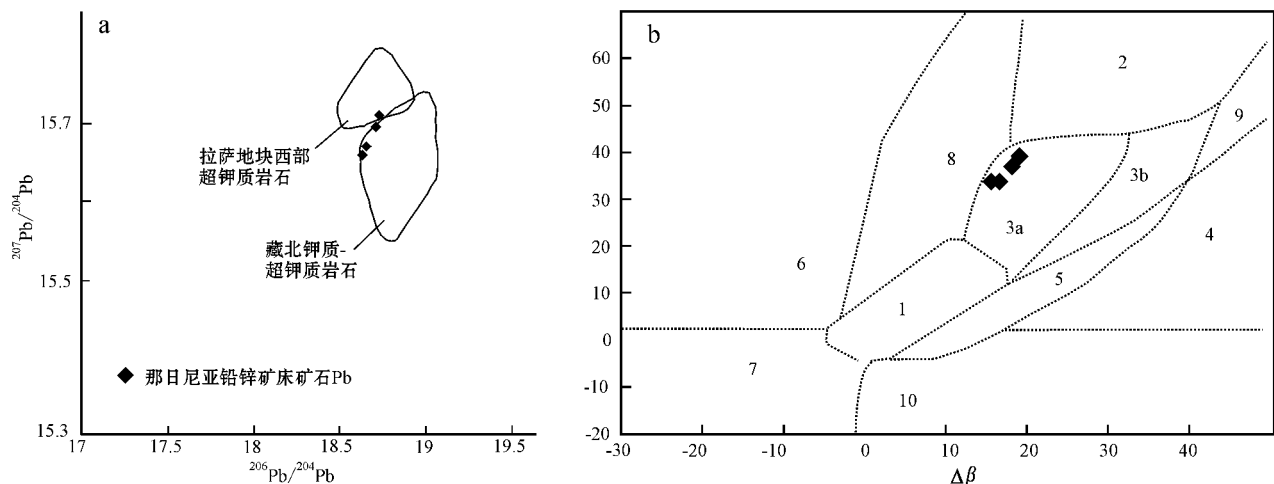


图 11 那日尼亚矿床矿石铅同位素组成 (a, 底图据赵志丹等, 2007) 和 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 成因分类图解 (b, 底图据朱炳泉, 1998)

Fig. 11 Plots of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a, after Zhao Zhidan *et al.*, 2007) and $\Delta\beta - \Delta\gamma$ diagram

(b, after Zhu Bingquan, 1998) of galena from the Nariniya deposit

1—地幔源铅; 2—上地壳铅; 3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅 (3a 岩浆作用, 3b 沉积作用); 4—化学沉积型铅; 5—海底热水作用铅; 6—中深变质作用铅; 7—深变质下地壳铅; 8—造山带铅; 9—古老页岩上地壳铅; 10—退变质铅; $\Delta\beta = 1000 \times (\beta/\beta_{M-1})$, $\Delta\gamma = 1000 \times (\gamma/\gamma_{M-1})$, β 和 γ 分别为样品和地幔的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$

1—mantle; 2—upper crust; 3—mantle and upper crust mixed subduction zones (3a magmatism, 3b deposition); 4—chemical deposition; 5—hydrothermal sediments on sea floor; 6—meddle to deep metamorphism; 7—hypometamorphic lower crust; 8—orogenic belt; 9—upper crust of old shale; 10—retrogressive metamorphism

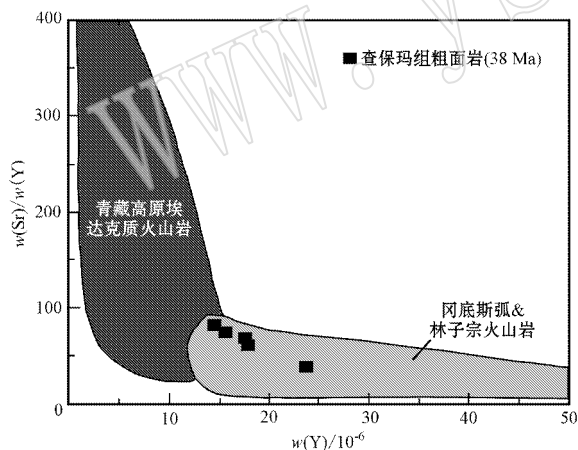


图 12 那日尼亚矿床查保玛组粗面岩 Sr/Y - Y 图解 (底图据 Hou *et al.*, 2004)

Fig. 12 Sr/Y versus Y diagrams of Nariniya trachyte (after Hou *et al.*, 2004)

域。因此, 总体上看, 那日尼亚粗面岩并未显示埃达克质岩石特征, 这意味着岩浆可能不是起源于(拆沉的)加厚下地壳, 而是起源于富集地幔或受下地壳物质混染的软流圈地幔。

5.2 矿床成因

沱沱河地区不仅发育那日尼亚铅锌矿床, 还发

育有大量其他铅锌矿床, 包括多才玛(也常称为茶曲帕查)大型矿床、宗隆巴、纳保扎陇、雀莫错等矿点, 这使得人们通常思考这些矿床成因是否相同, 是否属于同样的成矿系统。

从地质特征看, 那日尼亚矿床为火山岩容矿, 其脉石矿物中出现大量石英, 蚀变出现强烈的白云母化, 同时硫化物中还见少量黄铜矿。这与上述除那日尼亚矿床外的其他铅锌矿床形成显著差别, 那些矿床赋矿围岩为碳酸盐岩, 脉石矿物以方解石为主, 几乎不见石英, 也无白云母化, 蚀变是以碳酸盐化为主, 且不发育黄铜矿。前者显示出与岩浆活动有关热液脉状矿床的地质与矿化特点, 而后者显示出与岩浆活动无关的、与盆地流体活动有关的矿床特征(宋玉财等, 2011)。

从矿床地球化学特点看, 那日尼亚矿床方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值处于 0 附近且值域窄, 显示岩浆硫的特征(表 3), 指示硫化物中的硫可能直接来自于查保玛组火山岩。方铅矿 Pb 同位素组成, 在铅同位素成分图中(赵志丹等, 2007)落入藏北钾质-超钾质岩石 Pb 同位素组成范围, 区别于青藏高原新生代其他岩浆岩 Pb 同位素组成(图 11a)。在(朱炳泉, 1998)限定的铅同位素构造演化图解中, 也落入了“岩浆作用”范

围(图 11b) 这都表明矿床成矿金属最有可能来自寄主的岩浆岩。矿床成矿流体具中低温度和低盐度的特征,即无低温、高盐度盆地卤水的特点,也不像是斑岩成矿系统中高温、高盐度岩浆流体的特点,可能代表着岩浆系统驱动的地表水,通过地表水的循环萃取了钾质火山岩中的硫和铅等金属,最后随着岩浆进一步的降温,硫化物析出,在相对破碎的火山岩内形成矿化体。

总之,那日尼亚矿床是一个与查保玛组钾质火山岩岩浆活动有关的矿床,成矿物质来自岩浆岩本身,成矿流体可能来自地表水,在岩浆热能的驱动下,循环萃取岩浆岩中的成矿物质成矿。这也显示出那日尼亚矿床与多才玛等碳酸盐岩容矿的铅锌矿床不是一套成矿系统,后者代表的是区域盆地流体活动的产物,与岩浆活动无关。

6 结论

那日尼亚铅锌矿床的赋矿围岩——查保玛组粗面岩(也定名为粗面英安岩),为钾质火山岩,其岩浆起源于富集地幔或受下地壳物质混染的软流圈地幔。矿床矿体由一系列细脉状的矿石组成,硫化物主要是方铅矿和黄铁矿,也含少量闪锌矿和黄铜矿,脉石矿物中出现大量石英、方解石和白云石,围岩蚀变以白云母化和黄铁矿化为主,同时硫化物中还见少量黄铜矿。矿床硫和铅均来自赋矿的岩浆岩,成矿流体可能是岩浆活动驱动的地表水。那日尼亚铅锌矿床形成与赋矿的钾质火山岩岩浆活动有关,从而区别于区域上碳酸盐岩容矿的铅锌矿床,后者与区域盆地流体活动有关,两者不是一套成矿系统的产物。

致谢 在那日尼亚矿床工作期间,得到青海省第五地质矿产勘查院领导和现场工作人员的大力支持,表示衷心的感谢。

References

- Deng Wanming and Sun Hongjuan. 1998. Isotopic geochemistry and source of intraplate volcanic rocks in north Tibet[J]. *Earth Science Frontiers*, 5(4): 307~317 (in Chinese with English abstract).
- Ding Lin, Kapp Paul, Yue Yahui, *et al.* 2007. Postcollisional calc-alkaline lavas and xenoliths from the southern Qiangtang terrane, central Tibet[J]. *Earth and Planetary*, 254: 28~38.
- Ding Lin, Kapp Paul, Zhong Dalai, *et al.* 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction[J]. *Journal of Petrology*, 44(10): 1833~1865.
- Hou Zengqian and Cook N J. 2009. Metallogeneses of the Tibetan collisional orogen: A review and introduction to the special issue[J]. *Ore Geology Reviews*, 36: 2~24.
- Hou Zengqian, Gao Yongfeng, Qu Xiaoming, *et al.* 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 220: 139~155.
- Hou Zengqian, Song Yucai, Li Zheng, *et al.* 2008. Thrust-controlled, sediments-hosted Pb-Zn-Ag-Cu deposits in eastern and northern margins of Tibetan orogenic belt: Geological features and tectonic model[J]. *Mineral Deposits*, 27(2): 123~144 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Zheng Yuanchuan, Yang Zhiming, *et al.* 2012. Contribution of mantle components within juvenile lower-crust to collisional zone porphyry Cu systems in Tibet[J]. *Miner Deposita*, 48: 173~192.
- Jiang Donghui, Liu Jiaqi and Ding Lin. 2008. Geochemistry and petrogenesis of Cenozoic potassic volcanic rocks in the Hoh Xil area, northern Tibet plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 279~290 (in Chinese with English abstract).
- Li Yalin, Wang Chengshan, Zhao Xixi, *et al.* 2012. Cenozoic thrust system, basin evolution, and uplift of the Tanggula Range in the Tuotuohe region, central Tibet[J]. *Gondwana Research*, 22: 482~492.
- Liu Bin and Duan Guangxian. 1987. The Density and isochoric formulae for NaCl-H₂O fluid inclusions (Salinity ≤ 25 wt %) and their application[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 7(4): 345~352 (in Chinese).
- Liu Shen, Hu Ruizhong, Feng Caixia, *et al.* 2008. Cenozoic high Sr/Y volcanic rocks in the Qiangtang terrane, northern Tibet: geochemical and isotopic evidence for the origin of delaminated lower continental melts[J]. *Geol. Mag.*, 145(4): 463~474.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Sci. Rev.*, 37: 215~224.
- Potter R W I, Clyne M A and Brown D L. 1978. Freezing point depression of NaCl-H₂O solutions[J]. *Economic Geology*, 73: 284~285.
- Roedder E. 1963. Studies of fluid inclusion II. Freezing data and their interpretation[J]. *Econ. Geol.*, 58: 167~210.
- Rollinson H R. 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation[J]. *John Wiley and Sons*, 1~352.
- Song Yucai, Hou Zengqian, Yang Tiannan, *et al.* 2011. Sediment-hosted Himalayan base metal deposits in Sanjiang region: characteristics

- istics and genetic types[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30 (3): 355~380(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Implications ofr Mantle Composition and Processes , Magmatism and the Ocean Basins*[C]. Geological Society , London , Special Publications , 42 : 313~345.
- Turner S , Arnaud N , Liu J , *et al.* 1996. Post-collision shoshonitic volcanism on the Tibetan Plateau : Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts[J]. *Journal of Petrology* , 37(1): 45~71.
- Wang Qiang , Frank McDermott , Xu Jifeng , *et al.* 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area , northern Tibet : Lower-crustal melting in an intracontinental setting[J]. 33(6): 465~468.
- Zhao Zhidan , Mo Xuanxue , Nomade Sebastien , *et al.* 2006. Post-collisional ultrapotassic rocks in Lhasa Block , Tibetan Plateau : Spatial and temporal distribution and its ' implications[J]. *Acta Mineralogica Sinica* , 22(4): 787~794(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhidan , Mo Xuanxue , Dong Guochen , *et al.* 2007. Pb isotopic geochemistry of Tibetan Plateau and its implications[J]. *Geoscience* , 22(4): 787~794(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yuanchuan , Hou Zengqian , Li Qiuyun , *et al.* 2012. Origin of Late Oligocene adakitic intrusives in the southeastern Lhasa terrane : evidence from in situ zircon U-Pb dating , Hf-O isotopes , and whole-rock geochemistry[J]. *Lithos* , 148 , 296~311.
- Zhu Bingquan. 1998. The Isotopic System Theory and Application in Earth Science-and on the Crust-Mantle Evolution in China[M]. Science Press : 1~330(in Chinese).

附中文参考文献

- 邓万明,孙宏娟. 1998. 青藏北部板内火山岩的同位素地球化学与源区特征[J]. *地学前缘*, 5(4): 307~317.
- 侯增谦,宋玉财,李 政,等. 2008. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型:成矿基本特征与构造控矿模型[J]. *矿床地质*, 27(2): 123~144.
- 江东辉,刘家麒,丁 林. 2008. 青藏高原北部可可西里地区新生代钾质火山岩地球化学特征及成因[J]. *岩石学报*, 24(2): 279~290.
- 刘 斌,段光贤. 1987. NaCl-H₂O 包裹体的密度式和等容式及其应用[J]. *矿物学报*, 7(4): 345~352.
- 宋玉财,侯增谦,杨天南,等. 2011. “三江”喜马拉雅期沉积岩容矿贱金属矿床基本特征与成因类型[J]. *岩石矿物学杂志*, 30(2): 123~144.
- 赵志丹,莫宣学, Nomade Sebastien, 等. 2006. 青藏高原拉萨地块碰撞后超钾质岩石的时空分布及其意义[J]. *岩石学报*, 22(4): 787~794.
- 赵志丹,莫宣学,董国臣,等. 2007. 青藏高原 Pb 同位素地球化学及其意义[J]. *现代地质*, 21(2): 265~274.
- 朱炳泉. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 科学出版社, 1~330.