

文章编号: 0258-7106(2009)06-0793-10

西藏班公湖岛弧带含硫化镍超基性岩的 源区性质与基底背景*

江军华, 王瑞江, 曲晓明, 辛洪波

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要 青藏高原班公湖-怒江成矿带上的超基性岩型硫化镍矿化是近年来在西藏地区发现的矿化新类型。文章根据成矿带西段班公湖地区含镍超基性岩体的岩石地球化学和 Sr、Pb 同位素分析结果, 论述了含镍超基性岩浆的源区性质及生成条件, 并根据锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄测定结果, 探讨了藏西北地区的基底背景。研究发现, 班公湖地区的含镍超基性岩体以富集大离子不相容元素 Rb、Th、U、Sr、Pb, 亏损 Ba、K 为特点, 高场强元素亏损 Nb、Ti, 富集 Ta, 稀土元素相对球粒陨石亏损强烈, 但轻稀土元素相对富集。这些特点一致反映出含矿岩浆产生于受俯冲沉积物熔体交代的富集型岩石圈地幔源区。岩浆的生成深度较浅, 为尖晶石二辉橄榄岩相, 源区部分熔融程度较低, 大体在 10% 左右。岩石中集中出现一批 24.79 亿年的残留锆石年龄, 标志着当时班公湖中特斯洋盆沉积物的物源区较为单一, 主要来自太古代末—元古代初的古老基底, 并且推测太古代与元古代之交(25 亿年)有可能是藏西北的一个古陆壳快速生长期。

关键词 地质学, 含镍超基性岩, 地幔源区, 部分熔融, 班公湖岛弧带, 藏北高原

中图分类号: P618.63

文献标志码: A

Provenance nature and basement background of nickel-sulfide-bearing ultrabasic rocks in Bangong Lake island arc zone, Tibet

JIANG JunHua, WANG RuiJiang, QU XiaoMing and XIN HongBo

(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The nickel sulfide mineralization of ultrabasic rocks in Bangong Lake-Nujiang metallogenic belt of western Qinghai-Tibet Plateau constitute a new type of ore deposit discovered in Tibet in recent years. Based on litho-geochemistry and a Sr-Pb isotopic analysis of the nickel-bearing ultrabasic rocks in the Bangong Lake within the west segment of the metallogenic belt, this paper describes the characteristics and formation conditions of magma sources of these rocks and, according to the zircon U-Pb LA-ICP-MS dating data, deals with the basement background of northwest Tibet. The results indicate that the Ni-bearing ultrabasic rocks are enriched in large-ion incompatible elements Rb, Th, U, Sr, Pb and high strength field element Ta but depleted in Ba, K(LILE) and Nb, Ti (HFSE) in the primitive mantle-normalized trace element patterns, exhibiting a strong REE depletion but a slight LREE enrichment in the chondrite-normalized REE patterns. All these features indicate consistently that the ore-bearing magma was derived from an enriched lithospheric mantle source which had been metasoma-

* 本文是“十一五”国家科技支撑计划项目(编号 2006BAB01A05)和中国地质调查局大调查项目(编号:1212010818097)联合资助的阶段
性成果

第一作者简介 江军华,男,1984年生,在读硕士,矿产普查与勘探专业。Email:jiangjh07@163.com

收稿日期 2009-09-14;改回日期 2009-11-03。张绮玲编辑。

tized by the subducted sedimentary melt, and that the magma originated from a source with low extent of partial melting (about 10%) at a shallow depth of the spinel lherzolite facies. In addition, a group of residual zircon ages of 2.48 Ga in the rocks indicates a relative simple source of sediments in the mid-Tethys ocean of Bangong Lake area at that time, which probably came mainly from the Late Archean-Early Proterozoic basement. It is thus inferred that the changing period from Archean to Proterozoic (ca. 2.5 Ga) might have been a rapid growing period of ancient continental crust in northwestern Tibet.

Key words: geology, nickel-bearing ultrabasic rocks, mantle source, partial melting, Bangong Lake island arc zone, northern Tibet plateau

近年来的工作发现地处藏北高原的班公湖-怒江缝合带上产有超基性岩型硫化镍矿(曲晓明等, 2009),为西藏地区的地质找矿开辟了新的方向。该缝合带规模巨大,以基性-超基性岩为代表的蛇绿混杂岩广泛分布(图1)。超基性岩体数量很多,成矿潜力很大。由于该带的硫化镍矿化类型是西藏高原近年来发现的新矿化类型,人们对它们的成矿构造环境、含矿岩浆性质、来源以及分异演化过程都还知之甚少,而这些信息对于整个成矿带的资源潜力评价和找矿勘查都是十分重要的。本文根据笔者近年来对班公湖地区含硫化镍超基性岩体做的一些初步分析结果(包括岩石地球化学、Sr、Pb同位素及锆石U-Pb年龄),分析了班公湖地区含硫化镍超基性岩浆的源区性质和生成条件,并根据残留锆石的年龄分布探讨了藏西北地区的基底背景。由于蛇绿岩超基性岩体极少发生岩浆硫化镍矿化,班公湖地区成为蛇绿岩超基性岩硫化镍矿化的新亮点,在岩浆硫化物矿床的分类中增添了一个不成熟的例证。在Naldrett最新的对岩浆铜镍硫化物矿床分类中,专门增添了一类与蛇绿岩(洋壳)大地构造背景有关的混杂苦橄-拉斑玄武岩铜镍硫化物矿床类型(李文渊等, 2008),因此,对蛇绿岩型镍矿化的研究具有重要的理论和实际意义。

1 班公湖-怒江缝合带地质背景

班公湖-怒江缝合带夹持于北面的羌塘地块和南面的拉萨地块之间,以一系列东西向展布的近线状蛇绿岩碎块为标志(图1)整个缝合带的蛇绿岩在东西向断续分布,绵延逾2 000 km,而在南北向的分布一般为几十公里,在西段狮泉河和东段安多一带,蛇绿岩的横向展布宽度达200余公里。因此,对于该缝合带是代表着一个单一的洋盆俯冲带(Girardeau et al., 1985; Coward et al., 1988),还是包

含着由多条洋生弧分割的多个洋盆俯冲(Mei et al., 1981; Srimal, 1986; Pearce et al., 1988; Dunlap et al., 2002),人们还持有不同的意见。Kapp等(2003)坚持单一洋盆向北俯冲的观点,把狮泉河一带多条蛇绿混杂岩的重复出现归因于洋盆闭合后由北向南的多次逆掩推覆作用。然而,从笔者去年路线剖面调查发现的岛弧型花岗岩的时空分布看,狮泉河一带班公湖-怒江缝合带应该包括3条俯冲带:北面的一条位于班公湖至日土县城一带,南北宽十几公里,东西向延伸百余公里,向东一直到多不杂矿区以北都有零星的蛇绿岩碎块出露;中间的一条位于狮泉河-改则-洞错一线的北侧,南北宽十几公里,但沿走向延伸长达400多公里,且连续性较好,这条蛇绿岩带应该是班公湖-怒江缝合带的主俯冲带;南面的一条位于改则县南面约20 km的拉果错湖北岸,宽几公里,沿北西西-南东东向延伸,长50 km,向北陡倾(Wang et al., 2008)。

2 含硫化镍超基性岩

班公湖地区的超基性岩型硫化镍矿位于班公湖西南侧,由十几个含硫化镍矿化的超基性岩体组成,岩体大小从几十米到几百米不等,形态上多呈透镜体,沿NW向展布(图1),围岩主要为侏罗系砂板岩。这一带基性-超基性岩体很多,这十几个含矿岩体是从50多个被调查的岩体中经过室内显微镜研究分辨出来的,因为在野外露头 and 手标本上都看不出矿化。含矿超基性岩普遍具有强烈的蛇纹石化,有的已完全变为蛇纹岩,蚀变稍轻一些的尚有柱粒状辉石和碎粒状橄榄石残留。另外,岩石中也常见碳酸盐矿物沿裂隙或解理缝交代分布。岩石中副矿物有铬尖晶石、锆石、磷灰石等。金属矿物有铬铁矿、磁铁矿及硫镍矿等。此外,岩石在蛇纹石化过程中有大量次生金属物质析出。从残留矿物组合和

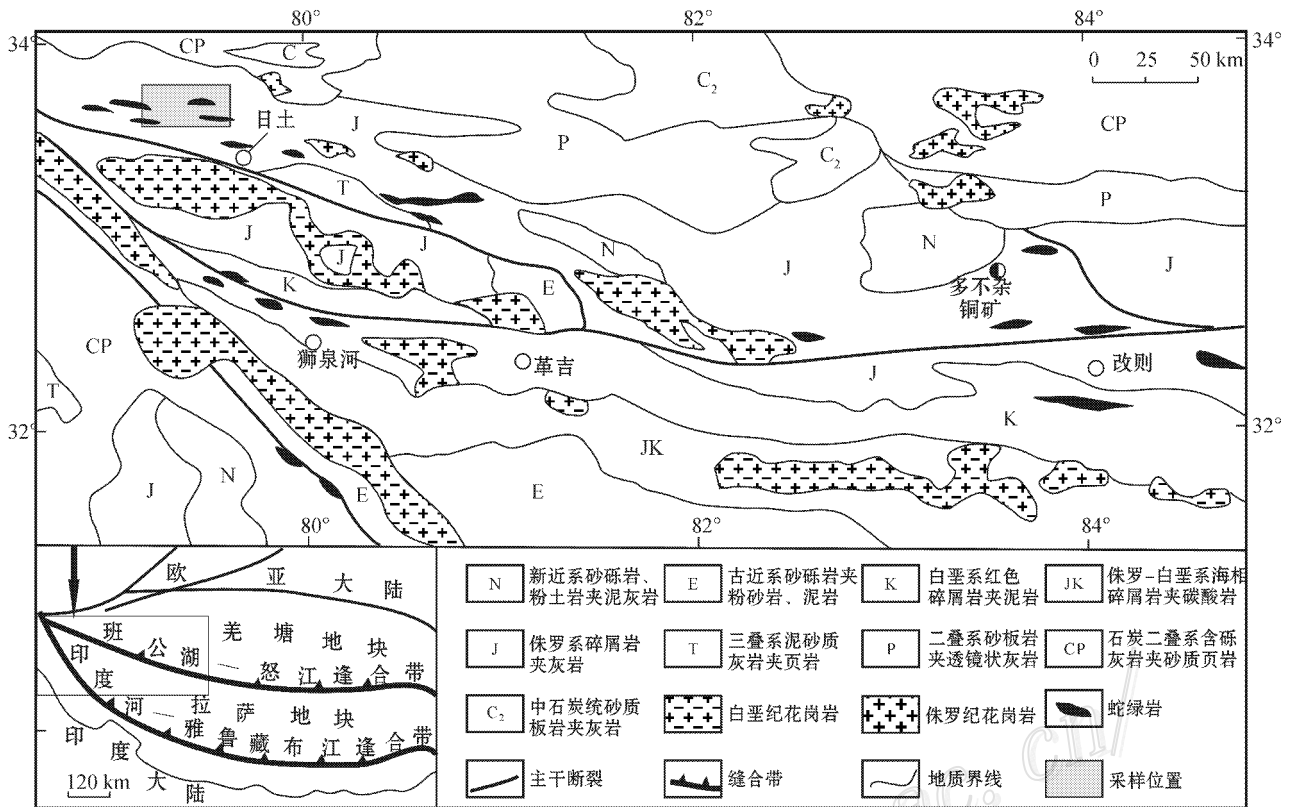


图 1 西藏班公湖岛弧带地质图(据 1:150 万地质图修改 2004)

Fig. 1 Geological map of Bangong Lake island arc belt (modified after 1:1 500 000 Geological Map, 2004)

保留的原岩结构看,含矿岩体的岩性应为橄榄岩或辉橄岩。

3 岩石地球化学

3.1 分析方法

本次样品选自含硫化镍超基性岩单元,样品的常量元素、微量元素和稀土元素分析是在北京核工业地质分析研究中心完成的,常量元素采用 PHILLIPS PW-2404 型 X-荧光光谱仪分析,精度好于 1%;微量元素和稀土元素采用 ICP-MS 测定,仪器型号是 ELEMENT-2 质谱仪,分析精度好于 2%,分析流程见(Qu et al., 2004)。

Sr 和 Pb 同位素分析是在中国地质科学院地质研究所同位素实验室采用 MAT261 固体同位素质谱计测定的。先将样品碾磨成 200 目粉末,用 HF + HNO₃ 溶解,蒸干后再用 HCl 溶解。其中 Sr 采用常规的离子交换技术,Sr 同位素测定用 ⁸⁸Sr/⁸⁶Sr = 8.37521 进行质量分馏校正,用 NBS987 作标样,流程空白为 10⁻⁹~10⁻¹¹g;Pb 采用离子交换柱分离,然后

测定 Pb 同位素,仪器用 NBS981 校准,流程空白为 10⁻⁹g,分析精度好于 0.05%。分析结果见表 1。

3.2 常量元素

从表 1 可以看出,班公湖岛弧带含镍超基性岩常量元素除 Fe₂O₃、CaO 变化较大外,其他成分含量都比较稳定。其中 SiO₂ 介于 32.57%~39.83% 之间,Al₂O₃、FeO 含量偏低(分别为 0.53%~0.83% 和 2.34%~2.83%),而 Fe₂O₃(除一个为 7.95% 外,其余均 >11%)和 MgO(27.45%~31.62%)的含量较高,TiO₂(0.02%~0.03%)及碱性元素含量都较低。全岩 Mg[#] 很高且稳定(为 95~96),明显要高于蛇绿岩中变质橄榄岩的值(Mg[#] = 89~91)。总体来看,含硫化镍超基性岩 MgO 含量偏高,而 Al₂O₃、Na₂O、K₂O 明显偏低,具有相对富镁、贫铝碱的特征。

3.3 微量元素

班公湖岛弧带含镍超基性岩的微量元素特征可以从其原始地幔标准化的蛛网图上反映出来(图 2a)。在图中大离子不相容元素 Rb、Th、U、Sr、Pb 明显是富集的,Ba 和 K 亏损;高场强元素 Nb 和 Ti 明显亏损,同时 Ta 高度富集。这种分布型式总体上符

表 1 西藏班公湖地区含镍超基性岩常量元素、微量元素、稀土元素及 Sr、Pb 同位素分析结果

Table 1 Analytical results of major elements, trace elements, rare earth elements and Sr, Pb isotopic composition in Ni-bearing ultrabasic rocks from Bangong lake area, Tibet

分析项目	BGH-20	BGH-21	BGH-25	BGH-26
$\sum(B)/\%$				
SiO ₂	32.57	39.37	39.83	39.18
TiO ₂	0.02	0.02	0.02	0.03
Al ₂ O ₃	0.53	0.62	0.81	0.83
Fe ₂ O ₃	7.95	11.18	11.36	11.53
FeO	2.41	2.76	2.83	2.34
MgO	27.45	31.60	31.10	31.62
CaO	10.71	10.99	0.87	0.61
Na ₂ O	0.14	0.05	0.05	0.05
K ₂ O	0.02	0.02	0.02	0.02
MnO	0.10	0.11	0.12	0.12
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.01
烧失量	17.38	12.38	12.17	12.87
合计	99.3	109.12	99.2	99.21
Mg [#]	95	95	95	96
$\sum(B) \times 10^{-6}$				
Ba	2.516	1.813	2.435	0.955
Be	0.011	0.012	0.04	0.028
Sc	6.844	6.722	6.414	7.346
Ti	56.4	31.55	27.2	53.45
V	32.32	30.38	25.74	27.00
Cr	3138	2941	2092	2415
Mn	437.1	445.9	444.9	508.1
Co	96.84	100.2	95.78	98.17
Ni	1866	2173	2207	2129
Cu	3.094	4.843	3.269	4.05
Pb	0.176	0.701	0.507	0.659
Zn	36.32	39.99	29.3	35.43
Ga	0.876	0.649	0.519	0.767
Ru	0.70	0.40	3.00	1.10
Sr	149.7	10.63	9.10	7.353
Y	0.231	0.164	0.216	0.395
Zr	0.396	0.337	0.469	1.113
Hf	0.013	0.008	0.013	0.026
Nb	0.057	0.059	0.059	0.123
Ta	0.07	0.10	0.05	0.07
U	0.471	0.192	0.122	0.02
Th	0.068	0.038	1.319	0.228
Mo	0.204	0.218	0.225	0.376
Bi	0.002	0.004	0.043	0.008
Sn	—	0.009	—	—
Sb	0.27	0.367	0.393	0.434
La	0.134	0.30	0.283	0.186
Ce	0.28	0.546	0.502	0.394
Pr	0.032	0.053	0.053	0.044
Nd	0.114	0.156	0.192	0.189
Sm	0.018	0.026	0.034	0.031
Eu	0.01	0.01	0.01	0.02

续表 1

Cont. Table 1

分析项目	BGH-20	BGH-21	BGH-25	BGH-26
Gd	0.03	0.03	0.04	0.06
Tb	0.00	0.00	0.01	0.01
Dy	0.024	0.024	0.036	0.065
Ho	0.007	0.005	0.007	0.014
Er	0.019	0.014	0.018	0.044
Tm	0.003	0.003	0.003	0.006
Yb	0.028	0.02	0.026	0.052
Lu	0.006	0.005	0.005	0.009
\sum REE	0.705	1.192	1.219	1.124
单位为 1				
δ Eu	1.32	1.10	0.83	1.41
Nb/Ta	0.81	0.59	1.18	1.76
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.00237	0.0419	0.1257	0.0643
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.707076	0.707343	0.707281	0.707126
<i>I</i> _{Sr}	0.707070	0.707232	0.706949	0.706956
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	19.400	19.339	18.592	18.632
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	15.800	15.642	15.653	15.615
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	38.481	38.518	38.084	38.533

注: Mg[#] 单位为 1; *I*_{Sr} 即为 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr); “—” 为未检出者。

合岛弧岩浆的特征,但又存在着差异。具体表现在:① Ba 亏损意味着进入岩浆源区的俯冲组分是熔体而不是流体,因为自俯冲板片释放出来的流体含 Ba 是很高的;② K 没有发生富集说明岩浆源区可能有富 K 矿物金云母残留;③ Ta 明显富集而不是像在典型的岛弧岩浆作用中与 Nb 一起亏损,说明岩浆的生成深度较浅,源区有大量的角闪石残留;④ Pb 高度富集是俯冲沉积物进入岩浆源区的重要证据,因为在俯冲带环境中,沉积物最富 Pb。

3.4 稀土元素

图 2b 展示了班公湖岛弧带含镍超基性岩的稀土元素球粒陨石标准化分布曲线。从图中可以看出,这些含镍岩体虽然稀土元素都是亏损的,但轻稀土元素还是明显富集,缺少负 Eu 异常,中稀土至重稀土元素没有发生分馏,呈平缓或下凹的分布型式。这些特点一方面说明岩体不是生成于洋中脊环境,它们与轻稀土元素亏损的洋中脊型(MORB)蛇绿岩截然不同;另一方面说明岩浆源区缺少石榴子石残留相,也没有发生斜长石的明显分离,中稀土至重稀土元素部分的下凹反映源区应该有角闪石残留。

3.5 Sr、Pb 同位素

班公湖含硫化镍超基性岩的 Sr、Pb 同位素列于表 1。其中 *I*_{Sr}、⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 和 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 分别变化于 0.706949~0.707232、0.00237~0.1257 和 0.707076

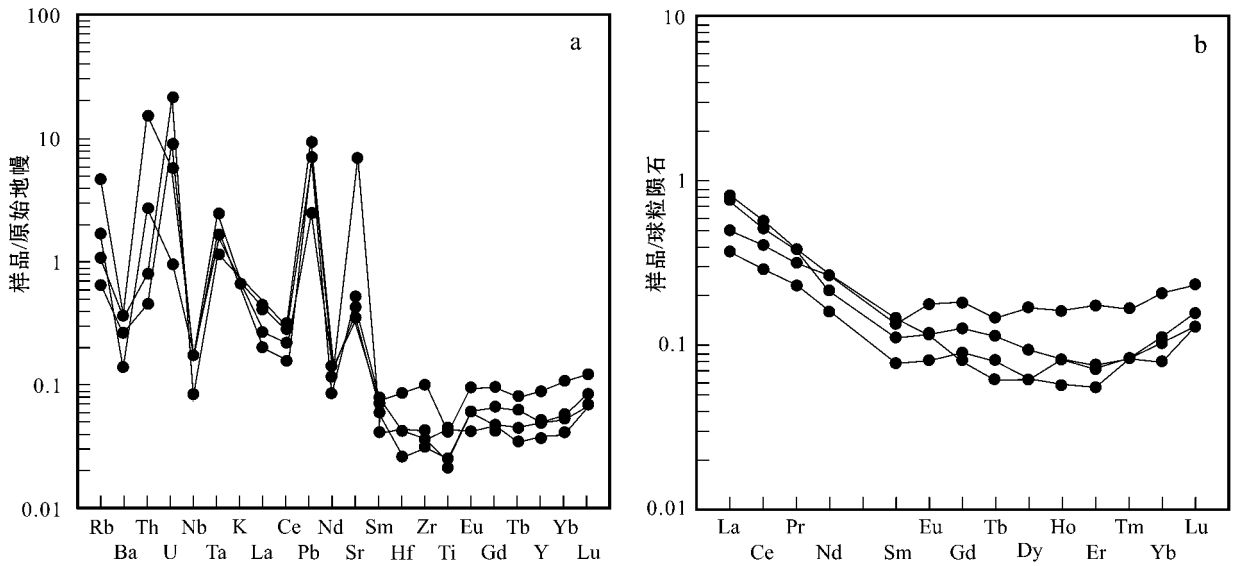


图2 班公湖岛弧带含镍超基性岩微量元素蛛网图(a)和稀土元素球粒陨石标准化分布曲线(b)

Fig. 2 Primitive mantle-normalized trace elements patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of Ni-bearing ultrabasic rocks from Bangong Lake island arc belt

~0.707343 之间, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别变化于 18.592~19.4、15.612~15.8 和 38.084~38.533 之间。在 Pb 构造模式图上(图略)样品分布比较分散,从上地壳到地幔均有,说明源区中随大洋俯冲作用混入的俯冲组分比较多,而且不均一。一般而言,3%~5% 俯冲组分的加入就能极大地改变源区 Pb 同位素组成特征。班公湖含硫化镍超基性岩的放射性成因 Sr、Pb 同位素含量高,暗示了源区含有较多的俯冲物质。

4 锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年龄

本文锆石样品先用常规的重力和磁选方法分选出重砂,在双目镜下挑纯锆石。将挑纯的锆石样品用环氧树脂粘结于玻璃片上制成靶,抛光至厚度的 1/3~1/2 使其内部结构暴露,然后进行反射光、透射光和阴极发光照相。阴极发光在中国地质科学院北京离子探针中心完成,定年分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室采用 LA-ICP-MS 法完成,测定时间采用 10 Hz 的激光频率、80 mJ 的激光强度和 30 μm 的激光束直径,以 91500、NIST610、GJ-1 和 BCR-2 作为外部标样。样品的同位素比值和元素含量采用 Glitter 程序,普通铅校正采用 Anderson(2002) ComPb-Corr[#]3-15 方法,年龄计算采用 ISOPLLOT3 程

序,具体实验方法见 Yuan 等(2004)文献。测试结果见表 2。

从锆石的阴极发光影像看(图 3),班公湖含镍超镁铁质岩中的锆石颜色较深,主要呈短椭圆状-浑圆状,棱角不明显,具有磨圆特征,表明它们经过一定距离的搬运与磨圆作用。岩浆韵律环带不清,边缘部分为亮白色,大小介于 50~150 μm 之间,长宽比约为 1.2~2.0,为典型的碎屑成因。U 含量为 112.19×10^{-6} ~ $1\ 023.63 \times 10^{-6}$ 、Th 含量 59.57×10^{-6} ~ 531.96×10^{-6} ,Th/U 比值介于 0.11~1.87 之间。除个别点(BGH14、BGH15)外,大多数测点放射性 Pb 含量很高,为 108.35×10^{-6} ~ 948.11×10^{-6} ,表现为残留碎屑锆石的特征。

班公湖含镍超基性岩残留锆石年龄跨度很大,从 3 571.8~76.2 Ma(根据经验对晚于 1 000 Ma 的样品采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,早于 1 000 Ma 的样品采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄)不等(图 4a)。在不一致曲线图上(图 4b), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄集中在 2349.2~2538.2 Ma 之间(BGH1—BGH7),其中的点 BGH1—BGH6 位于谐和线上侧,而点 BGH7 位于谐和线下方,表明有铅的丢失,该点有非常一致的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,可以解释为锆石形成的上限年龄,即锆石形成要早于 2349.2 Ma。由于点 BGH7 和其他 6 个点计算加权平均年龄时产生较大的误差,

表 2 班公湖地区含镍超基性岩锆石 U-Pb LA-ICP-MS 测年结果

Table 2 Results of zircon U-Pb LA-ICP-MS dating in ultrabasic rocks of Bangong Lake area

点号	$\epsilon(B) \times 10^{-6}$				年龄/Ma					
	^{238}U	^{232}Th	$^{206}\text{Pb}^*$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
BGH1	191.91	85.82	117.82	0.45	2462.3	19.2	2477	8.4	2494.5	15.8
BGH2	243.85	95.91	156.66	0.39	2476.2	17.9	2507.4	7.4	2545.5	15.3
BGH3	169.14	59.57	108.35	0.35	2458.1	18.5	2493.8	7.9	2537.4	15.6
BGH4	601.37	101.02	401.59	0.17	2538.2	19.8	2532.6	9.0	2525.2	16.4
BGH5	263.23	104.5	163.54	0.40	2457.3	18.4	2483.6	7.8	2515.5	15.4
BGH6	285.57	125.82	180.27	0.44	2495.6	18.0	2504.4	7.5	2514.8	15.1
BGH7	327.39	109.87	183.27	0.34	2349.2	18.66	2342.5	7.8	2334.5	14.59
BGH8	424.94	479.59	135.29	1.13	1238.6	25.74	1258.5	8.03	1270	8.75
BGH9	243.04	65.66	31.04	0.27	1054.7	49.31	728.4	12.02	626.8	5.77
BGH10	467.41	225.32	51.62	0.48	543	33.78	537.8	5.74	536.5	3.92
BGH11	112.19	209.69	130.66	1.87	3127.6	17.51	3153.7	8.48	3194.2	19.79
BGH12	680.1	73.76	948.11	0.11	3571.8	15.33	3517.7	7.12	3423	19.11
BGH13	908.61	214.82	560.17	0.24	2659.1	16.2	2719.7	6.6	2801.7	16.0
BGH14	1023.63	531.96	15.10	0.52	167.5	71.1	79.1	2.3	76.2	0.7
BGH15	449.2	73	15.49	0.16	331.8	60.0	191.2	4.4	180	1.6

注： $^{206}\text{Pb}^*$ 为放射性铅含量，年龄加权平均值置信度为95%。

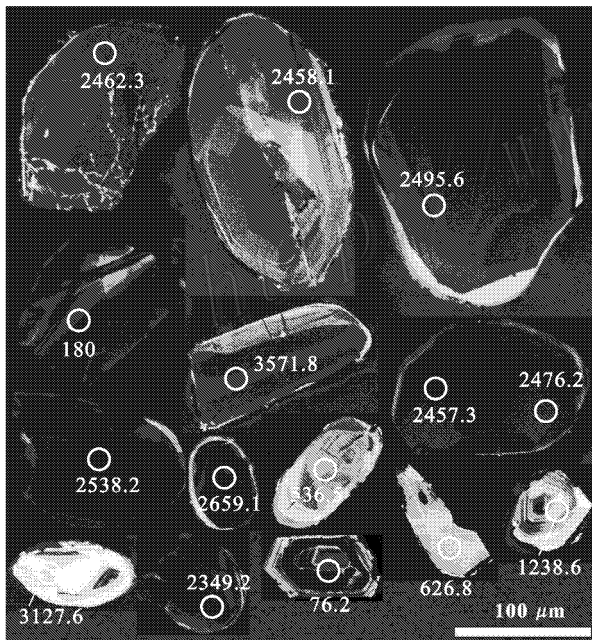


图 3 班公湖地区超基性岩锆石 CL 图像

Fig.3 CL images of zircon from ultrabasic rocks in Bangong Lake area, Tibet

在最后计算时已经被排除，由 6 个点 (BGH1-6) 的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 谐和年龄得到加权平均年龄为 (2479 ± 31) Ma ($1\sigma, n=6, \text{MSWD}=22$)，代表了岩浆的结晶年龄。

5 讨论

5.1 地幔源区的性质

作为蛇绿岩套中的超镁铁质单元，其岩浆源区无疑为地幔。班公湖岛弧带的含镍超基性岩富集放射成因同位素，在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上 (图 5a)，它们的岩浆源区接近 EM II 型富集地幔，表明地幔源区受过地壳组分的交代富集。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ -1/Sr 图中 (图 5b)，含矿岩体呈水平分布而不是成正相关，排除了它们受地壳混染的可能性 (Orozco-Esquivel et al., 2007)。微量元素比值 Pb/Ce-Pb 图 (图 5c) 进一步表明这些交代组分来自深海沉积物。 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (图 5d) 显示这些交代组分与印度洋深海浊积岩是一致的。Guo 等 (2007) 把藏南冈底斯造山带具有相似同位素组成的碰撞后埃达克岩解释为俯冲沉积物熔体对印度洋 MORB 交代的结果。本文的 Sr、Pb 同位素信息与微量元素蛛网图 (图 2a) 所反映的情况是一致的，都说明班公湖岛弧带的含硫化镍矿化的超基性岩浆是由受过俯冲沉积物熔体交代的富集地幔源区部分熔融生成的。根据 Pearce 等 (1984) 对世界各地蛇绿岩生成环境的研究，将蛇绿岩分为 SSZ (supra-subduction-zone) 型和 MOR

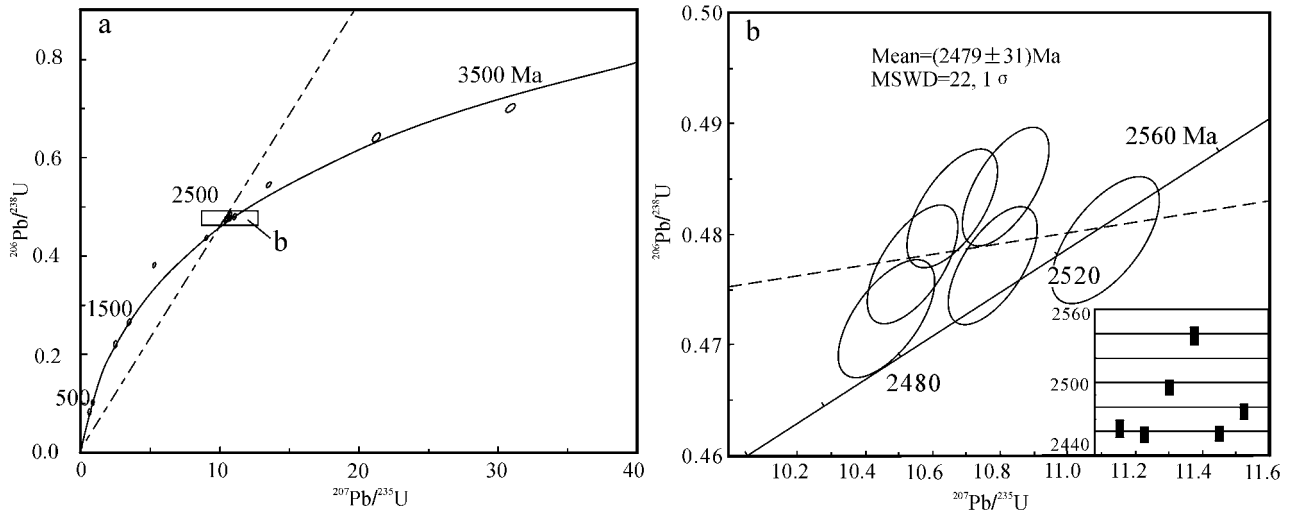


图 4 西藏班公湖地区含镍超基性岩锆石 U-Pb 年龄谐和曲线图

Fig. 4 Concordia diagrams of zircon U-Pb ages for ultrabasic rocks in Bangong Lake area, Tibet

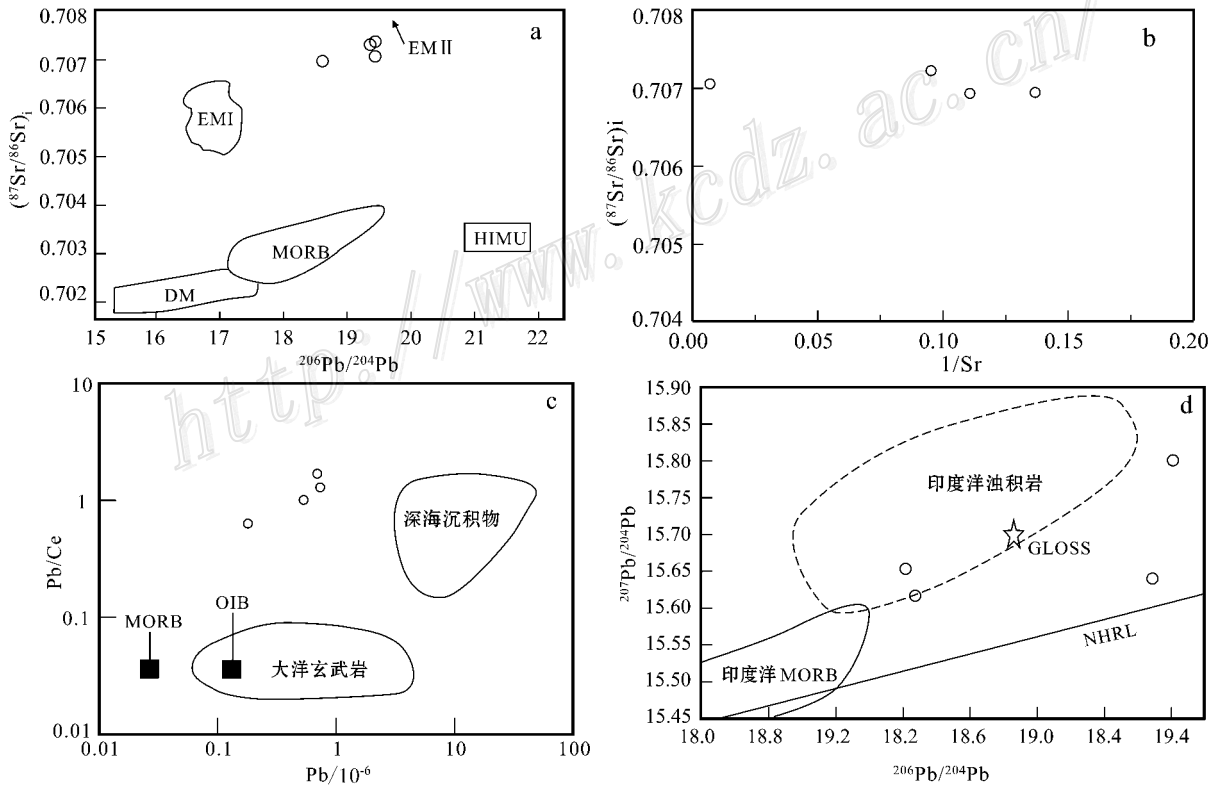


图 5 班公湖岛弧带含镍超基性岩微量元素和同位素比值图

a. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图; b. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $1/\text{Sr}$ 图; c. Pb/Ce - Pb 图; d. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图

EM I—富集地幔 I; EM II—富集地幔 II; DM—亏损地幔; HIMU—高 U/Pb 比值地幔; MORB—大洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩; GLOSS—全球俯冲沉积物; NHRL—北半球参考线

Fig. 5 Diagrams showing trace elements and isotopic composition of Ni-bearing ultrabasic rocks in Bangong Lake island arc zone
EM I—Enriched Mantle I; EM II—Enriched Mantle II; DM—Depleted Mantle; HIMU—High U/Pb-value Mantle; MORB—Mid-Ocean Ridge Basalt; OIB—Oceanic Island Basalt; GLOSS—Globe subducting sediment; NHRL—Northern Hemisphere Reference Line

(mid-ocean ridge)型蛇绿岩两种类型,世界上大多数蛇绿岩为前一类型。从前面分析来看班公湖岛弧带的这些含镍超基性岩应属于 SSZ 型。史仁灯等(2005)对本地区蛇绿岩的研究也表明班公湖地区存在 SSZ 型和 MOR 型两种类型的蛇绿岩。这种蛇绿岩超基性岩型岩浆硫化镍矿化,目前仅在菲律宾 Zambales 出现过(李文渊等,2008,其资料引自 Naldrett)。Zambales 蛇绿岩按岩石单元分,主要由 Coto 浅成火山岩, Coto 岩墙和 Acoje 浅成火山岩组成(Yumul et al.,1998)按产出位置分,主要由 Cabangan、San Antonio 和 Masinloc 三个山丘组成,其中前两者分别与组成后者的 Coto 地块和 Acoje 地块有成因联系(Yumul,1996;Yumul et al.,1998)。据研究,Coto 地块(包括 Coto 浅成火山岩和 Coto 岩墙)具有过渡性洋中脊岛弧性质,而 Acoje 地块更多显示为岛弧性质。这种含有不同地幔源区性质的蛇绿岩产于与俯冲作用有关的边缘盆地,也属于 SSZ 型蛇绿岩(Yumul,1996;2001)。在 Acoje 地块的壳幔序列发生了硫化镍和铬铁矿矿化,同时还富集了铂族元素,其源区岩浆成分为携带了高 PGE 含量的高 Mg 玄武岩到玻安岩质成分,是第二或第三阶段的熔融产物(Yumul et al.,1997;Yumul,2001)。

5.2 源区的部分熔融条件

班公湖岛弧带含镍超基性岩富集轻稀土元素,中稀土元素和重稀土元素呈平缓或下凹的分布型式(图 2b),说明它们的地幔源区缺少石榴子石残留相,

即源区不属于榴辉岩相。微量元素 Nb 亏损, Ta 明显富集,不同于正常的岛弧岩浆作用。许多研究(Tiepolo et al.,2000;Foley et al.,2002)表明,当岩浆源区有低 Mg 角闪石残留时, Nb 比 Ta 优先进入角闪石,形成的部分熔体 Nb/Ta 比值显著增高,并同时造成 Ti 亏损,金红石残留则产生相反的现象(Green,1995)。由此说明,班公湖岛弧带含镍超基性岩浆的源区应该是角闪岩相。在 Dy/Yb-K/Yb × 1000 图中(图 6a)这些含硫化镍岩浆位于尖晶石二辉橄榄岩熔融曲线下侧。在 La/Sm-Sm/Yb 图中(图 6b)也一样,它们位于尖晶石橄榄岩熔融曲线附近,说明这些含镍超基性岩的源区为尖晶石二辉橄榄岩(或橄榄岩)稳定区,形成深度较浅。其残留矿物组合除了尖晶石和角闪石外,可能还有一些金云母,因为岩浆中 K 也是亏损的。从图 6a 看,地幔源区熔融程度较低,大体在 10%左右。

5.3 残留锆石中包含的基底信息

微量元素和 Sr、Pb 同位素分析表明班公湖岛弧带的含镍超基性岩属于 SSZ 型蛇绿岩,岩浆源区受过俯冲沉积物熔体的交代。本节提出基底组分,是因为笔者在对含镍超基性岩(样品号:BGH-20)进行锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年时,发现了很多残留锆石(表 2)。一般而言,强蚀变事件对锆石 U-Pb 年龄会产生影响,但正如前面所述,班公湖含镍超基性岩主要发生了蛇纹石化和碳酸盐化蚀变,两者均为中低温蚀变,其蚀变温度远低于锆石 U-Pb 同位素封闭

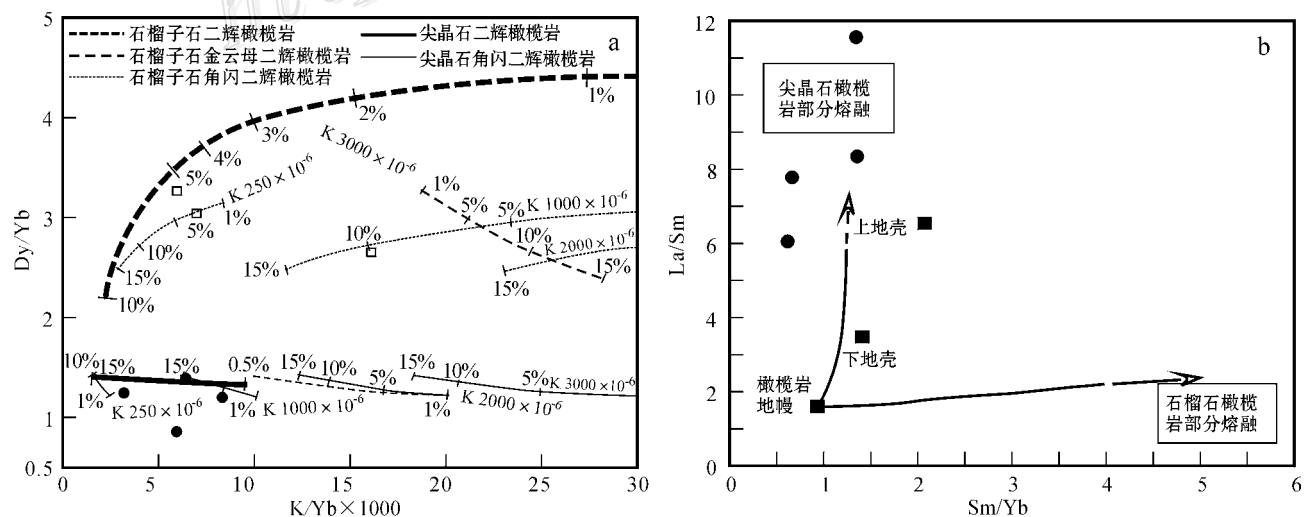


图 6 班公湖岛弧带含镍超基性岩微量元素比值图

a. Dy/Yb-K/Yb × 1000 图; b. La/Sm-Sm/Yb 图

Fig. 6 Diagrams of trace element ratios in Bangong Lake island arc zone

温度($>900^{\circ}\text{C}$),因此不会改变锆石的 U-Pb 同位素组成。实验已经证明即使在麻粒岩相变质作用下,锆石的 U-Pb 同位素体系也难以发生重置(Kroner et al., 1994; 谢桂青等, 2001)因此,班公湖含镍超基性岩蚀变事件不会影响锆石 U-Pb 年龄的可靠性。

该样品获得的锆石年龄跨度很大(图 4a、表 2),从最古老的残留锆石 3571.8 Ma 到最年轻的锆石 76.2 Ma。有意义的是在太古代与元古代的交点(25 亿年)附近形成一致线群集年龄(图 4b),6 个测点的加权平均年龄为(2479 ± 31)Ma,说明不仅藏南普兰地区和藏北双湖地区存在太古代物质(多吉等, 2007; 王国芝等, 2001)藏西北部班公湖地区也存在古老至 35 亿年的太古代陆核,而且在太古代与元古代的交点上(24.79 亿年左右)有一次重要的陆壳快速生长事件。这些残留锆石在班公湖含硫化镍超基性岩中集中出现,说明该陆壳是班公湖中特提洋盆沉积时的主要物源区,且源区较为单一,否则的话,残留锆石的年龄很难如此集中。

6 结 论

(1) 西藏班公湖地区的含硫化镍超基性岩富集大离子不相容元素 Rb、Th、U、Sr、Pb 和高场强元素 Ta, 亏损 Ba、K 和 Nb、Ti。稀土元素含量低($\Sigma\text{REE} = 0.705 \times 10^{-6} \sim 1.219 \times 10^{-6}$),但轻稀土元素相对富集,中-重稀土元素缺少分馏。这些地球化学特征显示出明显的俯冲组分痕迹,是俯冲沉积物熔体对岩石圈地幔交代富集的结果,成因类型属于 SSZ 型蛇绿岩。

(2) 班公湖含硫化镍超基性岩富含放射成因 Sr、Rb 同位素, $I_{\text{Sr}} = 0.706949 \sim 0.707232$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.592 \sim 19.400$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.615 \sim 15.800$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.084 \sim 38.533$ 。在同位素和微量元素综合分析图上反映出班公湖含硫化镍超基性岩是印度洋型浊积岩与 MORB 型地幔混合的结果。

(3) 班公湖含硫化镍超基性岩中-重稀土元素缺少分馏(球粒陨石标准化分布曲线平缓), Nb/Ta 比值低(0.59~1.76),反映了岩浆源区深度较浅,源区缺少高压的石榴子石相残余,代之以角闪石残留相为主,含矿岩浆是在尖晶石-二辉橄榄岩相条件下低程度(约 10%)部分熔融形成的。

(4) 班公湖含硫化镍超基性岩中富含残留锆石,

最古老的 U-Pb LA-ICP-MS 年龄在 35~32 亿年之间,在 24.79 亿年附近群集形成一致线年龄,说明藏西北地区存在太古代陆核,并且在太古代与元古代的交点处有一个陆壳快速增长时期。

志 谢 野外工作期间得到了成都理工大学李佑国、罗伟等人的大力支持和帮助,审稿人对本文提出了宝贵的意见,中国地质调查局西安地质调查中心提供了有关资料,谨致谢忱。

References

- Anderson T. 2002. Correction of Common Lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 1982: 59-79.
- Coward M P, Kidd W S F, Pan Y, Shackleton R M and Zhang H. 1988. The structure of the 1985 Tibet geotraverse, Lhasa to Golmud [A]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A327*, 307-336.
- Dunlap W J and Wysoczanski R. 2002. Thermal evidence for early Cretaceous metamorphism in the Shyok suture zone and age of the Khardung volcanic rocks, Ladakh, India [J]. *Journal of Asia Earth Science*, 20: 481-490.
- Duo J, Wen C Q, Guo J C, Fan X P and Li X W. 2007. Discovery of detrital zircon about 4.1 Ga in Tibet [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52 (1): 19-22 (in Chinese).
- Foley S, Tiepolo M and Vannucci R. 2002. Rutile-melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas [J]. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 64: 933-938.
- Gao Y F, Wei R H, Ma P X, Hou Z Q and Yang Z S. 2009. Post-collisional ultrapotassic Volcanism in the Tangra Yumco-Xurucuo graben, south Tibet: Constraints from geochemistry and Sr-Nd-Pb isotope [J]. *Lithos*, 110: 129-139.
- Guo Z F, Wilson M and Liu J Q. 2007. Post-collisional adakites in south Tibet: Products of partial melting of subduction-modified lower crust [J]. *Lithos*, 96: 205-224.
- Girardeau J, Marcoux J, Fourcade E, Bassoulet J P and Tang Y K. 1985. Xainxa ultramafic rocks, central Tibet, China: Tectonic environment and geodynamic significance [J]. *Geology*, 13: 330-333.
- Green T H. 1995. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical processes in the crust-mantle system [J]. *Chemical Geology*, 120: 347-359.
- Kapp P, Murphy M A, Yin A and Harrison T M. 2003. Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution of the Shiquanhe area of western Tibet [J]. *Tectonics*, 22(4): 1029. doi: 10.1029/2001TC001332.
- Kroner A, Jaeckel P and Williams I S. 1994. Pb-loss patterns in zircons from a high-grade metamorphic terrain as revealed by different dating methods: U-Pb and Pb-Pb ages for igneous and metamorphic

- zircons from northern Sri Lanka[J]. *Precambrian Research*, 66 : 151-181.
- Li W Y, Zhang Z W and Wang W (editor in chief). 2008. Translated by China Geological Survey Bureau of Geological Survey Center in Xi'an. *Magmatic sulphide deposits: Geology, geochemistry and exploration*[R]. 1-560. (Original work by Naldrett A J. 2004. *Magmatic sulphide deposits: geology, geochemistry and exploration*. Publisher: Springer. 1-728.)
- Mei H J, Liu X N, Chi J X, Zhang G Y and Wu M J. 1981. On ophiolite system on Qinghai-Xizang plateau with particular reference to its genesis in West Xizang[A]. *Geological and ecological studies of Qinghai-Xizang plateau*[C]. Beijing: Science Press. 545-556.
- Orozco-Esquivel T, Petrone C M, Ferrari L, Tagami T and Manetti P. 2007. Geochemical and isotopic variability in lavas from the eastern Trans-Mexican volcanic belt: Slab detachment in a subduction zone with varying dip[J]. *Lithos*, 93 : 149-174.
- Pearce J A, Lippard S J and Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra subduction zone ophiolites[A]. In: *Marginal basin geology*[M]. London: Blackwell Scientific Publications. 77-94.
- Pearce J A and Deng W M. 1988. The ophiolites of the Tibet geotraverse, Lhasa to Golmud (1985) and Lhasa to Kathmandu (1986) [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, A327 : 215-238.
- Qu X M, Hou Z Q and Li Y G. 2004. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau[J]. *Lithos*, 74 : 131-148.
- Qu X M, Zhao Y Y, Wang R J, Li Y G, Xin H B, Dai J J, Jiang J H and Chen H. 2009. Discovery of magmatic nickel sulfide mineralizations in Bangong Lake-Nujiang metallogenic belt, Qinghai-Tibet plateau[J]. *Mineral Deposits*, 28(6) : 727-734 (in Chinese with English abstract).
- Shi R D, Yang J S, Xu Z Q and Qi X X. 2005. Recognition of MOR- and SSZ-type ophiolites in the Bangong Lake ophiolite mélange, western Tibet: Evidence from two kinds of mantle peridotites[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(5) : 397-408 (in Chinese with English abstract).
- Srimal N. 1986. India-Asia collision: Implications from the geology of the eastern Karakoram[J]. *Geology*, 14 : 523-527.
- Tiepolo M, Vannucci R, Oberti R, Foley S, Bottazzi P and Zanetti A. 2000. Nb and Ta incorporation and fractionation in titanian pargasite and kaersutite: Crystal-chemical constraints and implications for natural systems[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 176(2) : 185-201.
- Wang G Z and Wang C S. 2001. The disintegration and times determination of the basement metamorphic rocks in Qiangtang, Tibet[J]. *Science in China (Series D)*, 31 : 77-82 (in Chinese).
- Wang W L, Aitchison J C, Lo C H and Zeng Q G. 2008. Geochemistry and geochronology of the amphibolite blocks in ophiolitic melange along Bangong-Nujiang Suture, Central Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Science* 33 : 122-138.
- Xie G Q, Hu R Z, Jiang G H and Zhao J H. 2001. Evaluation of the genesis of zircons and U-Pb isotopic dating [J]. *Geology-Geochemistry*, 29(4) : 64-70 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, Li H M, Günther D and Wu F Y. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3) : 353-370.
- Yumul G P. 1996. Varying mantle sources of supra-subduction zone ophiolites: REE evidence from the Zambales ophiolite complex, Luzon, Philippines[J]. *Tectonophysics*, 262 : 243-262.
- Yumul G P and Dimalanta C B. 1997. Geology of the Southern Zambales Ophiolite Complex, (Philippines): Juxtaposed terranes of diverse origin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15 : 413-421.
- Yumul G P, Dimalanta C B, Faustino D V and Jesus J V. 1998. Translation and docking of an arc terrane: Geological and geochemical evidence from the southern Zambales Ophiolite Complex, Philippines [J]. *Tectonophysics*, 293 : 255-272.
- Yumul G P. 2001. The Acoje block platiniferous dunite horizon, Zambales ophiolite complex, Philippines: Melt type and associated geochemical control[J]. *Resource Geology*, 51(2) : 165-174.

附中文参考文献

- 多吉, 温春齐, 郭建慈, 范小平, 李小文. 2007. 西藏 4.1 Ga 碎屑锆石年龄的发现[J]. *科学通报*, 52(1) : 19-22.
- 李文渊, 张照伟, 王伟, 主编. 中国地质调查局西安地质调查中心译. 2008. 岩浆硫化物矿床地质、地球化学和勘查[M]. 1-560. (原著为 Naldrett A J. 2004. *Magmatic sulphide deposits: geology, geochemistry and exploration*. Springer Pub. House. 1-728.)
- 曲晓明, 赵元艺, 王瑞江, 李佑国, 辛洪波, 代晶晶, 江军华, 陈华. 2009. 西藏班公湖-怒江成矿带发现硫化镍矿[J]. *矿床地质*, 28(6) : 727-734.
- 史仁灯, 杨经绥, 许志琴. 2005. 西藏班公湖存在 MOR 型和 SSZ 型蛇绿岩-来自两种不同地幔橄辉岩的证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 24(5) : 397-408.
- 王国芝, 王成善. 2001. 西藏羌塘基底变质岩系的解体和时代厘定[J]. *中国科学(D 辑)*, 31 : 77-82.
- 谢桂青, 胡瑞忠, 蒋国豪, 赵军红. 2001. 锆石的成因和 U-Pb 同位素定年的某些进展[J]. *地质地球化学*, 29(4) : 64-70.