

·专题研究·

班公湖 MOR 型蛇绿岩 Re-Os 同位素特征对班公湖—怒江特提斯洋裂解时间的制约

黄启帅^{1,2}, 史仁灯¹, 丁炳华³, 刘德亮^{1,2}, 张晓冉^{1,2}, 樊帅权^{1,2}, 支霞臣³

(1. 中国科学院 青藏高原研究所 大陆碰撞与高原隆升实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学技术大学 地球与空间科学学院, 合肥 230026)

摘要: 西藏北部班公湖 MOR 型蛇绿岩主要由角砾状的地幔橄榄岩和玄武岩组成, 其中地幔橄榄岩主要是低 $Cr^{\#}$ 尖晶石相含单斜辉石(Cpx)方辉橄榄岩和少量不含 Cpx 的方辉橄榄岩, 玄武岩具有 MORB 地球化学特点。岩石地球化学特征和二元混合模拟计算表明, 含 Cpx 方辉橄榄岩是由较为亏损的方辉橄榄岩与玄武质熔体发生反应再富集形成的, 玄武质熔体和方辉橄榄岩的混合比例为 1:9 至 1:4。9 个含 Cpx 方辉橄榄岩样品(含 5 个重复测试样)的 Re 和 Os 含量分别为 $0.19 \times 10^{-9} \sim 1.49 \times 10^{-9}$ 和 $2.91 \times 10^{-9} \sim 5.40 \times 10^{-9}$, $^{187}Re/^{188}Os$ 变化范围为 $0.169 \pm 0.009 (2\sigma) \sim 1.833 \pm 0.183 (2\sigma)$, $^{187}Os/^{188}Os$ 变化范围相对较小, 介于 $0.12113 \pm 0.00044 \sim 0.12853 \pm 0.00036 (2\sigma)$ 之间。含 Cpx 方辉橄榄岩的 Re-Os 参考等时线年龄为 254 ± 28 Ma。由于不同比例熔体的加入造成橄榄岩具有不同的 Re/Os 比值, 因而不同含 Cpx 方辉橄榄岩样品具有不同 $^{187}Os/^{188}Os$ 比值。样品的 Re 含量与烧失量中的 H_2O 没有相关性, 说明蛇纹石化对样品 Re-Os 体系的影响可以忽略, Re-Os 同位素体系在低温地质作用下能够保持相对封闭。参考等时线年龄可能代表亏损方辉橄榄岩与玄武质熔体发生反应的时间, 即含 Cpx 方辉橄榄岩的形成年龄, 它表明在该时期特提斯洋经历了一次构造热事件。这一构造岩浆热事件的时间与早期定义的班公湖—怒江特提斯洋的裂解时间晚二叠世至早三叠世较为一致, 推测本文 MOR 型蛇绿岩地幔橄榄岩的 Re-Os 同位素年龄可能代表班公湖—怒江特提斯洋开始裂解的时间。

关键词: Re-Os 同位素 地幔橄榄岩 蛇绿岩 班公湖 西藏

中图分类号: P588.12⁺5; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)04-0465-14

Re-Os isotopic evidence of MOR-type ophiolite from the Bangong Co for the opening of Bangong-Nujiang Tethys Ocean

HUANG Qi-shuai^{1,2}, SHI Ren-deng¹, DING Bing-hua³, LIU De-liang^{1,2}, ZHANG Xiao-ran^{1,2},
FAN Shuai-quan^{1,2} and ZHI Xia-chen³

(1. Key Laboratory of Continental Collision and Plateau Uplift, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The MOR-type Bangong Co ophiolite in northwest Tibet is a tectonic mélangé mainly consisting of brecciated peridotites and MORB-affinity basalts. The mantle peridotites are composed of clinopyroxene-bearing harzburgites (cpx-harzburgites) and minor clinopyroxene-free harzburgites classified in terms of petrography,

收稿日期: 2012-03-20; 修订日期: 2012-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972056 40930316 41172059)

作者简介: 黄启帅(1985-), 男, 博士研究生, 构造地质学专业, E-mail: huangqishuai@itpcas.ac.cn; 通讯作者: 史仁灯(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 蛇绿岩与岩石圈地幔演化, E-mail: shirendeng@itpcas.ac.cn.

mineralogy and geochemistry. Geochemical data suggest that the cpx-harzburgites were formed via a refertilization process, which occurred at low melt/peridotite ratios (1:9 to 1:4) and under the interaction between basaltic melts and clinopyroxene-free harzburgites. The authors performed a Re-Os isotopic study of 9 cpx-harzburgites, which display a relatively narrow range in Os concentrations and Os isotopes, with Os ranging from 2.91×10^{-9} to 5.40×10^{-9} and $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ranging from 0.12113 ± 0.00044 (2σ) to 0.12853 ± 0.00036 (2σ). Measured Re concentrations range from 0.19×10^{-9} to 1.49×10^{-9} and $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ range from 0.169 ± 0.009 (2σ) to 1.833 ± 0.183 (2σ). The positive correlation defined by cpx-harzburgites (five solid circle points) in the isochron diagram ($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ versus $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$) yields an apparent age of 254 ± 28 Ma. The peridotite-melt interaction at the low melt/rock ratios could result in an obvious increase in peridotite Re abundances and Re/Os ratio, and then the decay of ^{187}Re to ^{187}Os produced a modification of the $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ ratios. Serpentinization seemed to have had little effect on the Re-Os system, which is considered to have been a closed system during the low temperature process. Therefore, this pseudo-isochron age may reflect the melt/rock reaction between cpx-free harzburgites and basaltic melts. In addition, this pseudo-isochron age is consistent with the opening age of Neo-Tethys defined earlier, and hence provides evidence for the initiation of the Bangong-Nujiang Tethys Ocean in Late Permian-Early Triassic period.

Key words: Re-Os isotope; mantle peridotites; ophiolite; Bangong Co; Tibet

地幔橄榄岩是蛇绿岩不可或缺的重要组成单元,是古大洋扩张裂解过程中地幔发生部分熔融的残留相(Coleman, 1977),因而其形成时代可以直接反映古大洋发生裂解的时间。由于亲石元素同位素体系(Rb-Sr 和 Sm-Nd)很难准确界定地幔橄榄岩的形成时代,随着测试分析技术的进步,Re-Os 同位素体系已成为研究地幔熔融分异过程和岩石定年的有力工具(Shirey and Walker, 1998; Rudnick and Walker, 2009)。Re、Os 是强亲铁元素,在地幔部分熔融过程中,作为强相容元素的 Os 残留于地幔,而作为中等不相容元素的 Re 部分进入熔体相,因而使地壳和地幔的 Re/Os 比值和 Os 同位素组成产生很大的差异(Allegre and Luck, 1980),加之地幔橄榄岩中的 Re-Os 同位素体系具有很强的抗后期地质作用改造的能力(Shirey and Walker, 1998),这为 Re-Os 同位素体系在超基性岩研究中的应用打下了基础。有学者已经尝试利用 Re-Os 同位素体系测定了我国东部大陆岩石圈的年龄,并取得了较高质量的 Re-Os 同位素等时线年龄数据(Gao *et al.*, 2002)。Re-Os 同位素体系的假等时线年龄也可应用于界定地幔热事件发生的时间和橄榄岩成岩年龄(Saal *et al.*, 2001)。

班公湖-怒江缝合带是青藏高原北部一条重要的板块边界(常承法等, 1973; 潘桂棠等, 2004; 任纪舜等, 2004),其形成时代对探讨青藏高原早期的构造演化具有直接的指示意义,但是关于该缝合带

所代表的特提斯洋开启和关闭时间的认识并未达成一致。早期研究认为大多数蛇绿岩形成于洋中脊环境,因而其时代直接代表特提斯洋的扩张时间,例如:王希斌等(1987)根据班公湖蛇绿岩熔岩夹层中放射虫硅质岩的时代认为班公湖-怒江特提斯洋形成于中晚侏罗世,邱瑞照等(2004)根据该带中段改则地区辉长岩全岩 Sm-Nd 法定年认为该区特提斯洋于早侏罗世开启,任纪舜等(2004)总结最新的 1:25 万区调报告研究成果认为班公湖-怒江缝合带与藏南雅鲁藏布江缝合带代表的均为形成于晚二叠世—早三叠世的新特提斯洋,与 Suess 早年的经典定义是一致的。存在上述不同认识的原因主要是对该带蛇绿岩的成因类型研究程度不够深入,例如夹有放射虫硅质岩的熔岩和用于定年的辉长岩的形成构造背景不清楚,所以放射虫和辉长岩年龄代表的是 MOR 型还是 SSZ 型蛇绿岩形成的时代,是代表特提斯大洋的开启还是由扩张转为俯冲消减的时间,这些都尚存疑义。在班公湖地区,根据蛇绿岩上部熔岩同位素年代学和放射虫时代(王希斌等, 1987; 邱瑞照等, 2004; 史仁灯等, 2005; Shi, 2007)得出的特提斯洋的年龄都比缝合带两侧大陆斜坡相沉积物的时代(任纪舜等, 2004)年轻,原因是因为在缝合带中保存较好、较多的是形成于俯冲带上的 SSZ 型蛇绿岩,而不是代表班公湖-怒江特提斯主洋盆扩张形成的 MOR 型蛇绿岩,这与全球蛇绿岩保存类型特点(Stern, 2004)一致。那么如何界定特提斯洋扩

张裂解的时间呢?

本文在野外和镜下观察的基础上,对班公湖蛇绿岩中的橄榄岩和玄武岩进行了主量和微量元素分析,进而对含 Cpx 方辉橄榄岩进行了 Re-Os 同位素分析,并在研究地幔橄榄岩成因的基础上,尝试利用 Re-Os 同位素体系来界定班公湖 MOR 型蛇绿岩的地幔橄榄岩年龄,进而探讨班公湖-怒江特提斯洋的扩张时间。

1 地质背景和样品特征

班公湖蛇绿岩位于班公湖-怒江蛇绿岩带的西端部分,分布于班公湖以南、日土县城北约 10 km,出露较为完整,主要由地幔橄榄岩、辉长岩、辉绿岩墙、枕状熔岩和块状熔岩组成,以构造岩块形式侵位于侏罗纪砂岩、页岩地层中。侏罗系与夹杂在其中的外来二叠纪灰岩岩块构成滑混层,蛇绿岩与该

滑混层及其他岩石一起构成班公湖蛇绿混杂岩(图 1)。根据地幔橄榄岩和熔岩的岩石学、矿物学以及地球化学特点,在该混杂岩中厘定出一套 SSZ 型蛇绿岩,主要由块状高 $Cr^{\#}$ (>0.60) 尖晶石相方辉橄榄岩、辉长岩、辉绿岩、枕状玄武岩、玄武安山岩和玻安岩系火山岩组成(史仁灯等 2005)。另外,在班公湖地区还存在一种各组成单元均为角砾状的蛇绿岩,主要由角砾状的地幔橄榄岩和玄武岩组成(图 2),其中地幔橄榄岩是低 $Cr^{\#}$ 尖晶石相单斜辉石(Cpx)方辉橄榄岩和少量不含 Cpx 的方辉橄榄岩,二者呈混杂堆积,玄武岩具有 MORB 地球化学特点(史仁灯等 2005)。这套蛇绿岩与大西洋中脊附近诸多钻孔(如:LEG37 的 334 钻孔,LEG45 的 395 钻孔,LEG82 的 556、558 钻孔,LEG82 的 556、558 钻孔)岩芯中的玄武岩和地幔橄榄岩[低 $Cr^{\#}$ (<0.60) 尖晶石相方辉橄榄岩] (Juteau *et al.*, 1990) 产出特征较为相似。

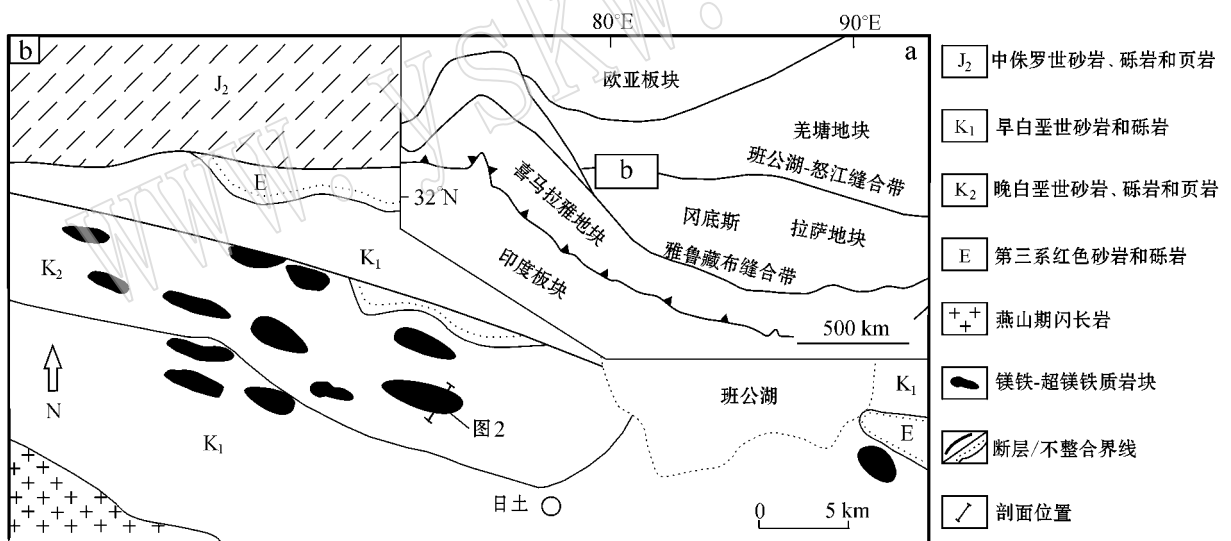


图 1 青藏高原主体构造单元 (a) 和西藏班公湖蛇绿混杂岩出露位置及地质背景 (b) 简图

Fig. 1 Schematic map of the Bangong Co-Nujiang River suture zone (a) and the distribution of the Bangong Co ophiolite (b) in northern Tibet

用于 Re-Os 同位素分析的主要样品即为出露在班公湖地区的角砾状含 Cpx 方辉橄榄岩,它主要由橄榄石 (80%, 体积比,下同) 斜方辉石 (15%) 单斜辉石 (2%) 黄褐色尖晶石和磁铁矿 (3%) 组成。其中橄榄石的 F_o 值为 90.8~91.8,尖晶石的 $Cr^{\#}$ 值为 0.20~0.25,分别与大西洋中脊地幔橄榄岩的橄榄石 F_o 值 (90.2~91.1) 和尖晶石的 $Cr^{\#}$ 值 (0.16~

0.60) 接近,均属于低 $Cr^{\#}$ (<0.60) 尖晶石相方辉橄榄岩。可见,出露在班公湖地区的角砾状含 Cpx 方辉橄榄岩,在产出特征、矿物组成以及矿物成分特征上,与大西洋中脊附近产出的低 $Cr^{\#}$ 尖晶石相方辉橄榄岩较为相似,推测班公湖蛇绿岩中的这一类地幔橄榄岩形成于洋中脊,是 MOR 型蛇绿岩的地幔橄榄岩(史仁灯等,2005; Shi *et al.*, 2008)。

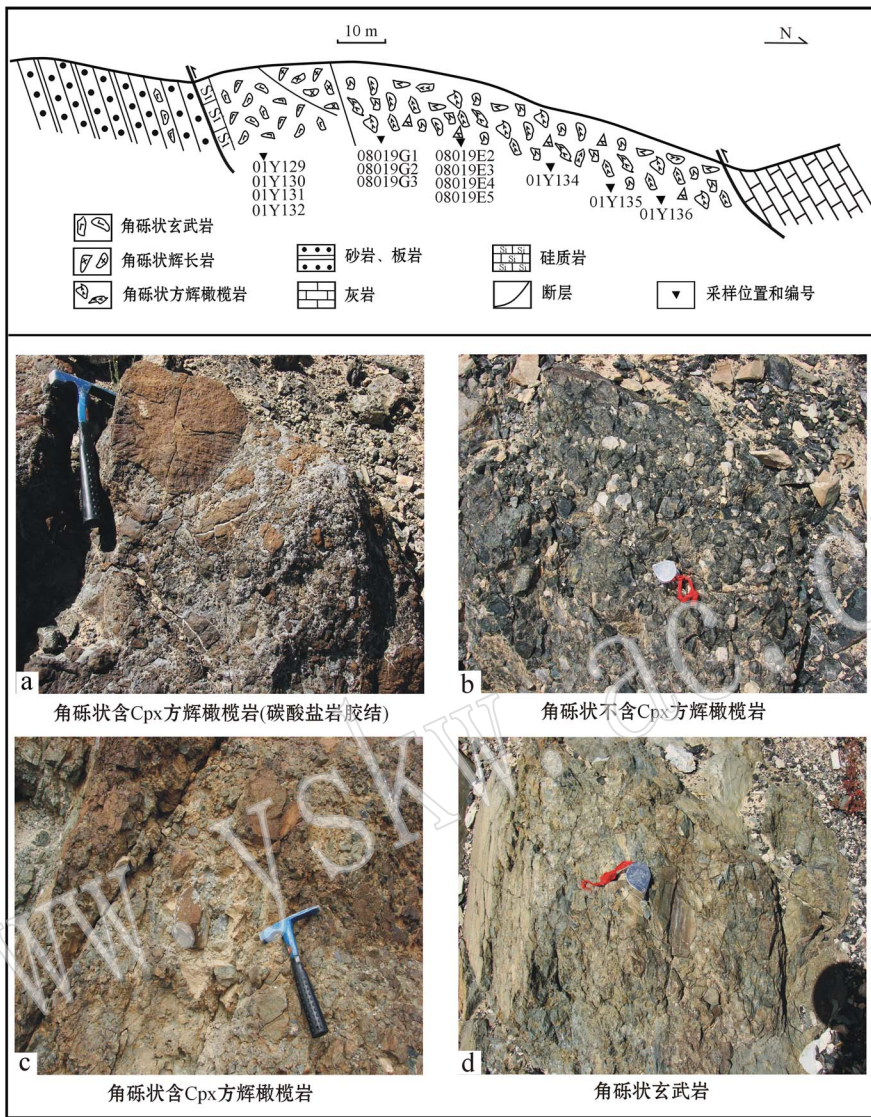


图 2 班公湖 MOR 型蛇绿岩剖面图和照片

Fig. 2 Section of the MOR-type Bangong Co ophiolite massif and field photos

2 分析方法

主量元素及 S 在中国地质科学院廊坊物化探研究所采用溶片法-X 射线荧光光谱 (XRF) 和容量法 (VOL) 完成, S 的检出限为 50×10^{-6} , 微量元素采用 ICP-MS 完成。

全岩 Re-Os 同位素稀释法测试在中国科学技术大学地球与空间科学学院和中国科学院广州地球化学研究所同位素实验室完成, 分析方法详见文献 (Shirey and Walker, 1995; 孟庆等, 2004; Jin *et al.*, 2004)。中国科学技术大学地球与空间科学学

院 Re-Os 同位素分析实验流程为: ①溶样, 精确称量 2 g 左右全岩粉末 (<200 目) 装入 Carius 管, 在冷冻状态下依次加入 Os、Re 稀释剂、3 mL 12 N HCl 和 6 mL 15 N HNO₃, 密封后装入不锈钢套, 在 230°C 加热 24 h, 冷却后将 Carius 管放入超声波振荡仪振荡 10 min, 使样品与混合酸充分接触, 再在 230°C 加热 24 h; ②分离 Os, Os 的分离提纯采用两次蒸馏法。开管后先用小型蒸馏装置提取 Os, 用高纯 N₂ 气将 OsO₄ 从样品溶解液中吹出, 用高纯高浓 HBr 吸收, 使 OsO₄ 还原为 OsBr₆²⁻ (Nagler and Frei, 1997); ③纯化 Os, 用微蒸馏法纯化 Os (Birck *et al.*, 1997), 最后将含 Os 溶液浓缩至 1~2 μL; ④ Os 同位素测

试,用负离子热电离质谱法(NTIMS)测定(Creaser *et al.*, 1991; Völkering *et al.*, 1991);⑤提取和纯化 Re, Re 的提取和纯化用 AG1×8 型阴离子交换树脂,依次用 3 mL、10 mL 和 3 mL 0.8 N HNO₃ 清洗树脂。将分离 Os 后的残液在 115℃ 蒸干,加 5 mL 0.4 N HNO₃ 加热溶解,溶液离心 30 min,将清液上柱。用 6 mL 和 3 mL 0.8 N HNO₃ 淋洗交换柱,用 5 mL 8 N HNO₃ 洗脱 Re。洗脱液在 115℃ 电热板上蒸干,加 1 mL 2% HNO₃ 溶解,用 ID-SN-ICPMS 测定 Re(Morgan *et al.*, 1991);⑥测试 Re。Re 的测定采用南京大学地球科学系的 Finnigan MAT Element II 型 ICP-MS 仪器,¹⁸⁵Re/¹⁸⁷Re 比值的测量精度为 1% 左右。Os 同位素测定采用中国科学院大学地球和空间科学学院的 Finnigan MAT262 质谱仪,¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 的测量精度优于 0.04%, Os 同位素测量值都经过了质量分馏校正和氧同位素组成校正(郑磊等, 2004),全流程 Re、Os 本底分别为 2 pg 和 5 pg, Os 空白的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值为 0.17, 数据都经过了空白校正。部分样品 Re-Os 同位素分析在中国科学院广州地球化学研究所 Re-Os 同位素实验室完成,测试流程详见文献(Li *et al.*, 2010)。

3 分析结果

班公湖蛇绿岩地幔橄榄岩及熔岩的主量和微量元素测试结果见表 1。

班公湖 MOR 型蛇绿岩含 Cpx 方辉橄榄岩的 Re、Os 含量分别为 $0.19 \times 10^{-9} \sim 1.61 \times 10^{-9}$ 和 $2.91 \times 10^{-9} \sim 5.40 \times 10^{-9}$, ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os 比值为 $0.169 \pm 0.009 \sim 1.833 \pm 0.183(2\sigma)$, ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值为 $0.12113 \pm 0.00044 \sim 0.12853 \pm 0.00036(2\sigma)$ (表 2)。

在¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os-¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os 图解(图 3)上,分析的 5 个样品点(实心圆点)的参考等时线年龄为 254 ± 28 Ma (MSWD = 0.96), 初始值为 $0.12145 \pm 0.00033(2\sigma)$ 。它们与 4 个第一次测试结果合在一起, 9 个数据同样具有很好的线性回归关系, 回归平方和(R^2)达到 0.9233, 获得的等时线年龄为 259 ± 53 Ma (MSWD = 7.6), 初始值为 $0.12095 \pm 0.00075(2\sigma)$, 与前者相比,除了年龄误差和 MSWD 值较大外,等时线年龄十分接近,而且¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 初始值在误差范围内保持一致,说明数据较为可

靠。含 Cpx 方辉橄榄岩的参考等时线年龄 254 ± 28 Ma, 可能代表它的形成时间。

4 讨论

4.1 含 Cpx 方辉橄榄岩成因——再富集模式

蛇绿岩中的地幔橄榄岩与造山带中的橄榄岩、深海橄榄岩一样,其成因存在两种观点之争。传统观点认为,这些地幔橄榄岩与克拉通内部火山岩中的橄榄岩包体一样,都代表原始地幔部分熔融的残留部分(Frey *et al.*, 1985; Hartmann and Hans Wedepohl, 1993; Burnham *et al.*, 1998)。另一种观点认为这些橄榄岩可以由熔体与残留相岩石混合(Obata and Nagahara, 1987; Elthon, 1992)或是再反应形成(Kelemen *et al.*, 1992; Niu, 1997; Takazawa *et al.*, 2000; Zhou *et al.*, 2005)。最近,一些研究成果表明,诸如日本 Horoman 岩体(Saal *et al.*, 2001)、挪威西部石榴石橄榄岩(Brueckner and Medaris, 1998; Beyer *et al.*, 2006)、著名的法国 Lherz 二辉橄榄岩(Le Roux *et al.*, 2007)以及中国西部柴北缘的石榴石橄榄岩(Shi *et al.*, 2010),可能都是由相对亏损的方辉橄榄岩或纯橄岩加入 Ca、Al、Fe 等物质再富集(refertilization)形成的。

笔者(史仁灯等, 2005; Shi *et al.*, 2008)曾根据全岩 REE 含量模拟计算,认为班公湖 MOR 型蛇绿岩中含 Cpx 方辉橄榄岩可能为对流上地幔抽取 10%~15% 玄武质岩浆后的残留物,并受到熔体/流体的交代影响。本文在全岩主微量元素研究的基础上,结合 Re-Os 同位素分析结果,认为班公湖蛇绿岩中含 Cpx 方辉橄榄岩与国际上其它地区由熔体/岩石反应形成的地幔橄榄岩较为相似,可能是由较为亏损的方辉橄榄岩与富含 Ca、Al、Fe 等物质的熔体经不同比例混合而成。

4.1.1 主量和微量元素证据

班公湖地区 MOR 型蛇绿岩中的地幔橄榄岩主要由含 Cpx 的方辉橄榄岩和少量不含 Cpx 的方辉橄榄岩组成,它们在化学组成上表现出明显的不同。不含 Cpx 的方辉橄榄岩的 Al₂O₃ 和 CaO 含量极低,分别为 0.31%~0.63% 和 0.04%~0.08%, TiO₂ 含量小于 0.01%, 具有较高的 Mg[#] 指数(92.21~92.51)。在 Mg/Si-Mg[#] 图解(图 4)上,不含 Cpx 方辉橄榄岩落在 Archon 地幔区域(Griffin *et al.*, 1999)。

表 1 班公湖蛇绿岩地幔橄辉岩及熔岩的主量($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)组成

Table 1 Geochemical analyses of peridotite and basalt samples from the Bangong Co ophiolite

岩性	不含 Cpx 方辉橄辉岩										含 Cpx 方辉橄辉岩										角砾状玄武岩				
	08019E2	08019E3	08019E4	08019E5	01Y134	01Y135	01Y136	08019G1	08019G2	08019G3	重复样	08019G3	重复样	01Y129	01Y130	01Y131	01Y132								
SiO ₂	46.35	46.49	46.12	46.00	45.66	45.76	45.84	44.38	45.51	45.39	45.39	45.39	49.35	48.45	49.14	51.12									
Al ₂ O ₃	0.39	0.31	0.63	0.63	1.94	1.63	1.83	2.57	2.72	2.38	2.38	2.38	13.67	12.74	13.36	14.82									
MgO	44.96	45.26	45.31	45.18	41.49	42.02	41.41	39.97	38.42	39.61	39.61	39.61	9.83	11.96	10.63	8.54									
FeO	1.38	1.70	1.69	1.38	3.01	3.03	2.91	4.06	4.01	3.94	3.94	3.94	7.99	7.60	8.19	6.66									
Fe ₂ O ₃	6.66	6.06	5.99	6.57	5.43	5.31	5.54	5.64	5.56	5.47	5.47	5.47	2.28	2.62	2.09	1.94									
CaO	0.08	0.04	0.06	0.05	1.60	1.34	1.60	2.93	2.87	2.35	2.35	2.35	7.02	7.00	7.15	8.16									
TiO ₂	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24	1.68	1.62	1.71	1.30									
Cr ₂ O ₃	0.33	0.34	0.38	0.42	0.42	0.42	0.43	0.33	0.31	0.33	0.33	0.33	0.06	0.05	0.06	0.05									
LOI	12.71	12.63	12.67	12.91	10.02	10.27	10.35	8.12	8.49	8.52	8.52	8.52	3.00	3.62	2.85	1.61									
Mg [#]	92.21	92.44	92.51	92.32	90.90	91.09	90.89	89.20	88.95	89.40	89.40	89.40	64.05	68.68	65.72	64.91									
Cr [#]	52.75	58.58	43.81	46.13	21.87	24.99	23.30	14.35	12.95	15.08	15.08	15.08	0.56	0.53	0.54	0.42									
Lu	0.005	0.005	0.005	0.008	0.020	0.020	0.020	0.062	0.038	0.036	0.036	0.036	0.420	0.390	0.410	0.290									
Sc	6.02	5.15	7.27	6.65	9.53	9.35	7.95	13.19	12.82	12.58	12.58	12.58	26.90	25.70	27.70	26.20									
V	27.16	31.89	29.26	32.53	112.00	114.00	108.00	74.95	72.64	72.63	72.63	72.63	260.00	244.00	264.00	216.00									
Y	0.25	0.19	0.19	0.28	0.73	0.58	0.76	3.59	2.83	2.43	2.43	2.43	27.30	26.10	27.50	19.60									
S	102.70	87.90	85.30	80.80			200.00		181.00			199.00													

表 2 班公湖蛇绿岩含 Cpx 方辉橄榄岩和玄武岩 Re-Os 同位素组成

Table 2 Os isotopic compositions and Re-Os abundances of peridotites and basalts in the Bangong Co ophiolite

编号	$\alpha(\text{Re}) \times 10^{-9}$	$\alpha(\text{Os}) \times 10^{-9}$	Re/Os	$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$	2 σ	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	2 σ	t_{RD}/Ga	t_{MA}/Ga
01Y135	1.49	3.91	0.38	1.833	0.183	0.128 34	0.000 57	-0.03	0.01
01Y135*	1.61	5.25	0.31	1.733	0.147	0.128 53	0.000 36	-0.06	0.02
01Y136*	0.73	3.58	0.20	0.986	0.092	0.125 96	0.000 42	0.31	-0.22
08019G1	0.22	3.25	0.07	0.319	0.029	0.122 13	0.000 32	0.86	3.68
08019G1*	0.19	3.02	0.06	0.311	0.029	0.122 61	0.000 35	0.79	3.13
08019G2	0.19	3.48	0.05	0.256	0.020	0.121 13	0.000 44	1.00	2.60
08019G2*	0.20	3.01	0.07	0.318	0.033	0.122 91	0.000 43	0.75	3.18
08019G3	0.22	2.91	0.08	0.364	0.032	0.121 91	0.000 26	0.89	7.10
08019G3*	0.19	5.40	0.04	0.169	0.009	0.122 19	0.000 55	0.85	1.43
01Y131	-	0.05	-	-	-	0.355 48	0.001 56	-	-

注：① 样品 01Y-136 首次测试失败，无任何数据；② Re-Os 同位素模式年龄计算依据顽火辉石球粒陨石模型；③ 带 * 者为同一样品的重复测试数据；④ “-” 为未测。

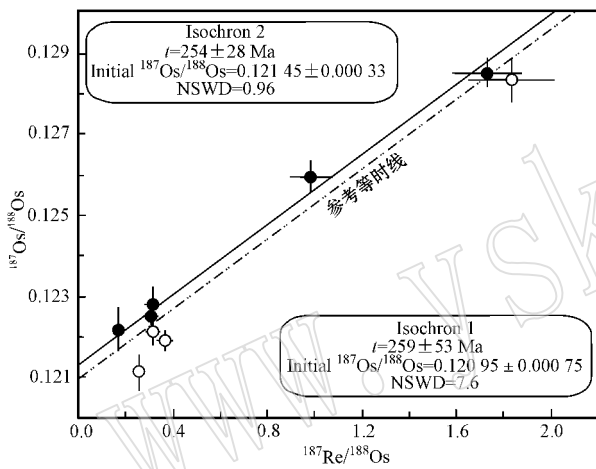


图 3 班公湖蛇绿岩中含 Cpx 方辉橄榄岩 Re-Os 等时线
Fig. 3 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ - $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ isochron diagram for Cpx-bearing harzburgites from the Bangong Co ophiolite

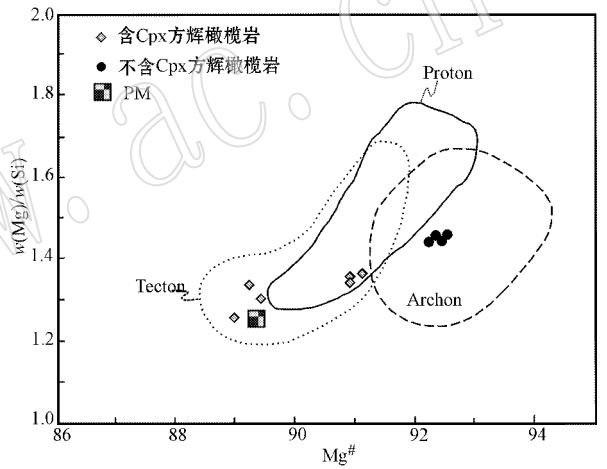


图 4 班公湖蛇绿岩中地幔橄榄岩的 Mg/Si - Mg[#] 图解
(底图依据 Griffin 等, 1999, 原始地幔值来自 McDonough and Sun, 1995)

Fig. 4 Mg/Si versus Mg[#] in the peridotites from the Bangong Co ophiolite (after Griffin *et al.*, 1999; primitive mantle values after McDonough and Sun, 1995)

含 Cpx 方辉橄榄岩相对饱满, Al₂O₃ 和 CaO 含量分别为 1.63% ~ 2.57% 和 1.34% ~ 2.93%, TiO₂ 含量分为两组, 一组含量大于 0.02%, 另一组含量约为 0.24%, 高于 PM 估计值 (McDonough and Sun, 1995), 也明显高于不含 Cpx 的方辉橄榄岩。Mg[#] 介于 89.2 ~ 91.1 之间, 明显低于不含 Cpx 的方辉橄榄岩。在 Mg/Si - Mg[#] 图解 (图 4) 上, 大多数含 Cpx 方辉橄榄岩落在相对饱和的 Proton 和 Tecton 岩石圈地幔区域 (Griffin *et al.*, 1999)。

在主量和微量元素与 Mg[#] 指数的变异图解 (图 5) 上, 含 Cpx 方辉橄榄岩的数据点均位于由玄武岩和不含 Cpx 的方辉橄榄岩作为两个端员的不同比例的混合线上。也就是说这种相对饱满的含 Cpx 的方辉橄榄岩可以由亏损的不含 Cpx 的方辉橄榄岩与相

对富集的熔岩 (如玄武岩) 按不同比例混合而成 (Beyer *et al.*, 2004, 2006; Le Roux *et al.*, 2007)。同样在 MgO/SiO₂ - SiO₂ 图解 (图 6) 上, 含 Cpx 方辉橄榄岩并没有沿着原始地幔岩部分熔融残留的趋势线分布, 而是落在不含 Cpx 的方辉橄榄岩和熔岩的混合线上。

综合以上图解中的混合比例, 推测含 Cpx 方辉橄榄岩可以由熔岩和不含 Cpx 的方辉橄榄岩按照 1:4 至 1:9 的比例混合而成。

4.1.2 Re-Os 同位素证据

部分熔融形成的残留地幔橄榄岩通常具有较低的 Re/Os 比值, 代表岩石亏损程度的 Mg[#] 通常与

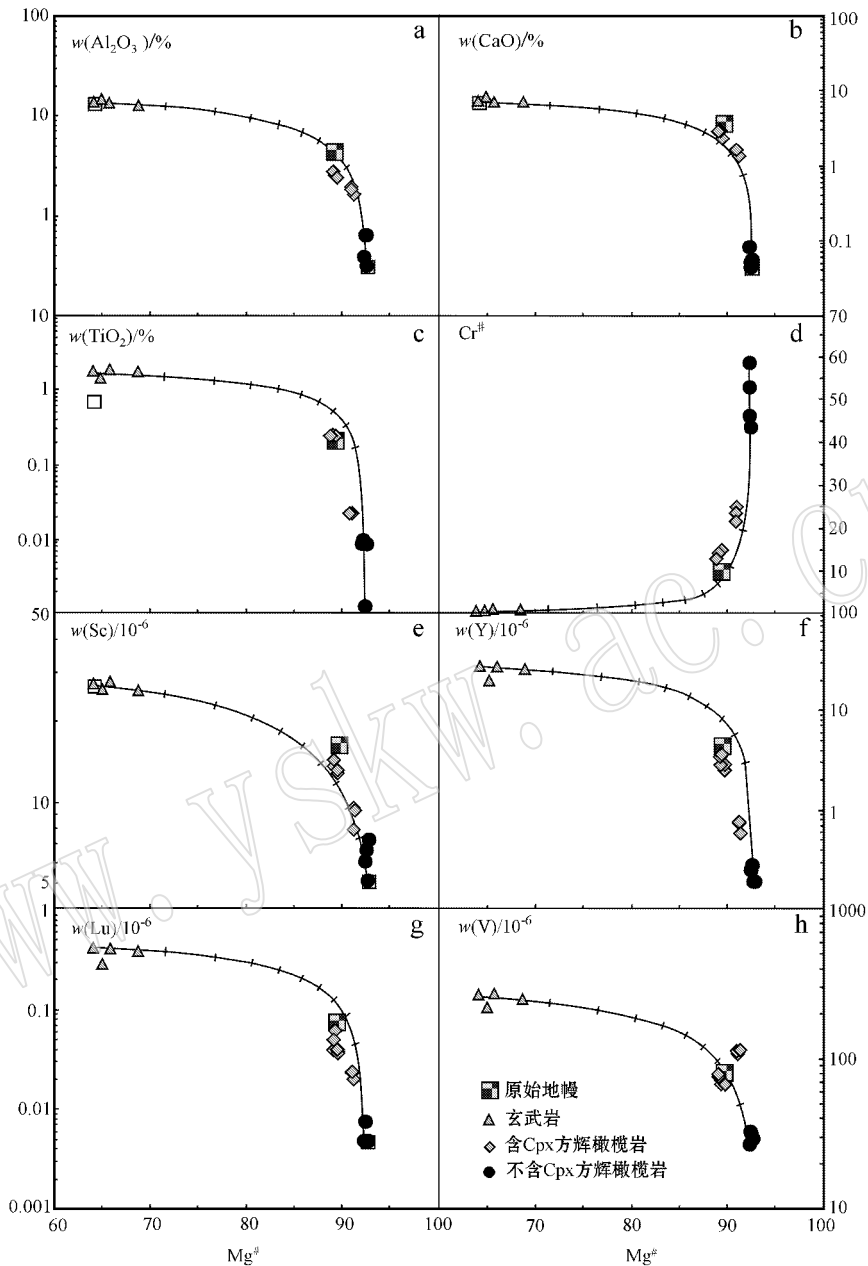


图 5 班公湖蛇绿岩地幔橄榄岩和玄武岩的主微量元素二元混合图解

Fig. 5 Whole-rock major and trace element abundances versus $Mg^{\#}$ for the peridotites and basalts from the Bangong Co ophiolite

Re/Os 比值呈负相关。本文含 Cpx 方辉橄榄岩样品 01Y135 和 01Y136 具有较高的 $Mg^{\#}$ 值, 而 Re 含量和 Re/Os 比值也明显高于其它样品, $Mg^{\#}$ 值与 Re/Os 比值呈正相关, 这与部分熔融机制形成的残留橄榄岩的情况不符, 因此推测可能受到了后期熔体加入的影响。含 Cpx 方辉橄榄岩样品的 $^{187}Os/^{188}Os$ 比值低于原始上地幔 (PUM) 的估计值 (Meisel *et al.*,

2001), 而 01Y135 和 01Y136 样品的 $^{187}Re/^{188}Os$ 远高于 PUM 的估计值, 也表明样品中有高 Re/Os 比值的物质加入 (Carlson, 2005; Harvey *et al.*, 2006)。样品 01Y-135 及其重复测试的数据也显示, 部分含 Cpx 方辉橄榄岩的 $^{187}Os/^{188}Os$ 比值高于青藏高原特提斯洋地幔估算值 0.128 1 (Shi *et al.*, 2007), 进一步说明有高 $^{187}Re/^{188}Os$ 比值的物质加

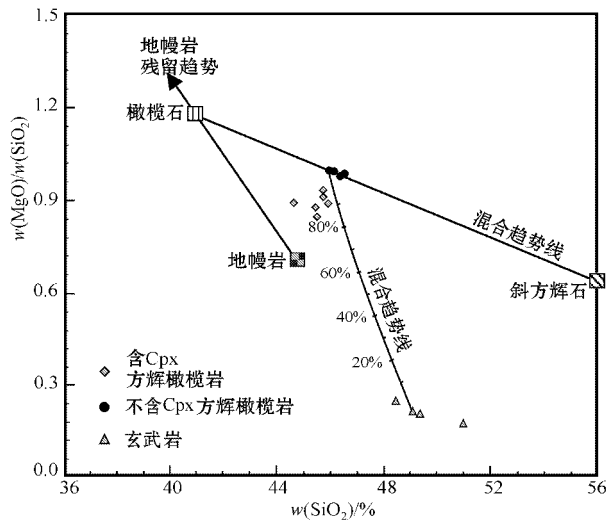


图 6 班公湖蛇纹岩地幔橄榄岩及熔岩的 $MgO/SiO_2 - SiO_2$ 图解(底图据 Walter, 1998)

Fig. 6 MgO/SiO_2 versus SiO_2 for the peridotites and basaltic lavas from the Bangong Co ophiolite (after Walter, 1998)

入。已有研究表明(e. g. Becker *et al.*, 2001; Zhang, 2008), 熔体与残留橄榄岩的反应会造成橄榄岩的 Re-Os 体系的变化(Re 加入或者 Os 的带出), 当熔体/岩石比例较小时(< 1 或 ≈ 1), 会造成橄榄岩的 Re 含量显著增加和 ^{187}Os 有限增加, 这与含 Cpx 方辉橄榄岩的 Re-Os 同位素特征是吻合的。含 Cpx 方辉橄榄岩可能经历了早期部分熔融和后期的熔体与橄榄岩相互作用。

4.2 成岩年龄

Re-Os 同位素体系不仅可以有效地示踪地幔部分熔融事件和壳幔物质运移, 而且在合适的地质条件下可以获得 Re-Os 同位素等时线年龄, 例如国内汉诺坝二辉橄榄岩和加拿大 Slave 克拉通橄榄岩中金刚石的硫化物包体均获得了质量较高的 Re-Os 同位素等时线年龄(Gao *et al.*, 2002; Westerlund *et al.*, 2006)。本文得到的班公湖地区 MOR 型蛇纹岩中含 Cpx 方辉橄榄岩 Re-Os 同位素参考等时线年龄为 254 ± 28 Ma(图 2), 这个年龄能否代表含 Cpx 方辉橄榄岩的成岩年龄? 首先要考虑蛇纹石化和风化作用及熔体/地幔岩相互作用对橄榄岩 Re-Os 同位素组成的影响。

4.2.1 蛇纹石化和海底风化作用对 Re-Os 体系的影响

蛇纹岩中的橄榄岩与深海橄榄岩一样, 普遍遭

受蛇纹石化和海底风化作用。最近, 有研究表明深海橄榄岩的新鲜内核和风化边部的 Os 含量保持一致, 这可能与蛇纹石化过程中的还原环境不易导致 Os 迁移有关(Büchl *et al.*, 2002; van Acken *et al.*, 2008)。但是在海床上采集的橄榄岩比深部洋壳中橄榄岩的 Re 含量要高, 并且岩石风化边缘的 Re 含量低于内核, 所以认为海底风化作用可能会造成 Re 丢失(Liu *et al.*, 2008), 蛇纹石化会造成深海橄榄岩中的 Re 含量增加(Harvey *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2009), 也就是说海底风化作用和蛇纹石化对橄榄岩中的 Re 含量影响是相反的, 然而这两种作用往往又同时作用于深海和蛇纹岩中的橄榄岩, 即后期蚀变作用对橄榄岩中的 Re 影响程度如何并不明确。

对于橄榄岩来说, 蛇纹石化与海底风化作用主要是由海水在不同条件下与橄榄岩发生的蚀变作用, 因此可以根据发生蚀变的橄榄岩中的水含量与 Re 及 Re/Os 比值的相关性来判断海水对橄榄岩中 Re 的影响。本文含 Cpx 方辉橄榄岩的烧失量(LOI, 主要是 H_2O)与 Re 含量及 Re/Os 比值并没有明显的正相关性(图 7a、7b), 而且样品 01Y-135 与 01Y-136 具有相近的蛇纹石化程度(LOI 分别为 10.27 和 10.35), Re 含量却相差 1 倍(1.49×10^{-9} 和 0.73×10^{-9}), $^{187}Os/^{188}Os$ 也相差较大(0.12853 和 0.12596), 说明数据反映的是橄榄岩本身的 Re-Os 同位素特点, 未受到蛇纹石化的影响或是影响程度很小。这与早先 Burnham 等(1998)认为蛇纹石化对 Re-Os 同位素体系的影响很小、蛇纹石化程度与蚀变过程中易迁移的元素含量并没有相关性的结论(Burnham *et al.*, 1998)是一致的。

虽然 Snow 和 Reisberg(1995)认为深海风化作用会造成橄榄岩 $^{187}Os/^{188}Os$ 大于 5% 的增长, 但 Liu 等(2008)通过对北冰洋 Gakkel 洋脊深海橄榄岩的 Os 同位素组成对比研究, 认为相比新鲜内核, 橄榄岩的蚀变边 $^{187}Os/^{188}Os$ 最大增长值约在 2%(Snow and Reisberg, 1995; Liu *et al.*, 2008)。对海水(Re 含量 8.04×10^{-12} , Os 含量 1.00×10^{-14} , $^{187}Os/^{188}Os = 1.05$) (Anbar *et al.*, 1992; Levasseur *et al.*, 1998)与深海橄榄岩(Re 含量 0.5×10^{-9} , Os 含量 3.3×10^{-9} , $^{187}Os/^{188}Os = 0.125$) (Snow and Reisberg, 1995)进行简单的二元混合计算, 发现当混合比例 $> 10^3$ 时, 橄榄岩的 $^{187}Os/^{188}Os$ 比值才会发生明显改变(图 7c、7d, 椭圆内为海水/橄榄岩混合比

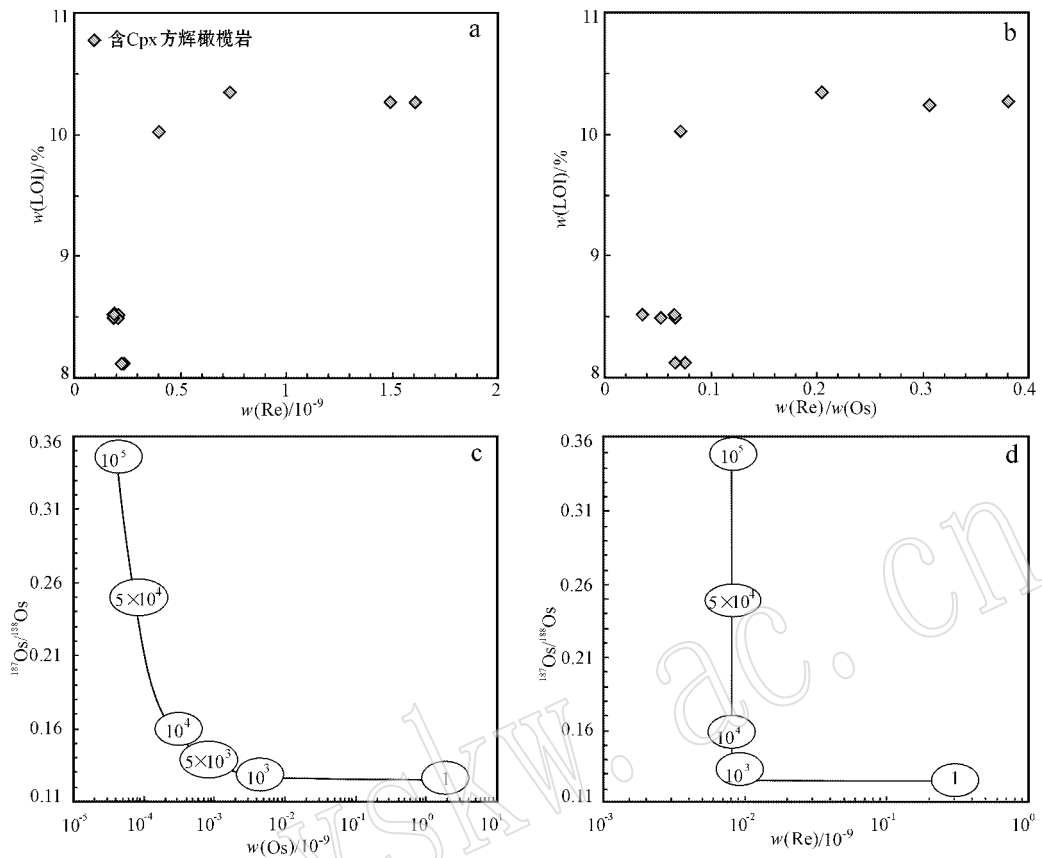


图 7 Re 含量(a)和 Re/Os 比值(b)与 LOI 相关图及海水与橄榄岩二元混合图解(c,d)

Fig. 7 Re abundances(a) and Re/Os(b) versus loss on ignition(LOI), Os abundances(c) and Re abundances(d) versus $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, the curve represents mixing between abyssal peridotites and sea water, whereas circled numbers donote the water-rock ratio

例)。看来本文中 8%~10% 的蛇纹石化不会显著改变橄榄岩的 Re 和 Os 含量,也不会显著改变 Re/Os 和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值,蛇纹石化对于本文研究的橄榄岩 Re-Os 体系的影响可以忽略。

4.2.2 熔/岩作用对 Re-Os 同位素体系的影响

蛇纹岩中的地幔橄榄岩在部分熔融作用形成的熔体抽离以后,会受到熔体的再富集作用(Müntener *et al.*, 2004; Beyer *et al.*, 2006; Le Roux *et al.*, 2007; van Acken *et al.*, 2008; Shi *et al.*, 2010)。那么这种熔体的再富集作用对地幔橄榄岩 Re 和 Os 含量、Re/Os 比值以及 Os 同位素组成的影响程度如何?

玄武质熔体的运移对残留地幔橄榄岩 Re 和 Os 含量的影响取决于熔体的 S 饱和程度及其与橄榄岩中初始硫化物的反应, S 不饱和的熔体会造成硫化物分解(Reisberg *et al.*, 2005; Ackerman *et al.*, 2009),而 S 饱和的熔体会生成新的硫化物(Alard *et*

al., 2000; Luguët *et al.*, 2003)。在高熔/岩比的开放体系条件下,熔岩反应会造成橄榄岩中硫化物、Re 和 Os“流失”,橄榄岩的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 组成也会受熔体组成影响(Becker *et al.*, 2001; Büchl *et al.*, 2002; Büchl *et al.*, 2004; Reisberg *et al.*, 2005)。而在低熔/岩比条件下,熔体渗透可能会形成新的硫化物,造成橄榄岩 Re 含量显著增高,但放射成因的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值增加有限,即从熔体中进入到橄榄岩中的 ^{187}Os 含量有限(Becker *et al.*, 2001; Ackerman *et al.*, 2009)。如前所述,本文含 Cpx 方辉橄榄岩是由玄武质熔体与方辉橄榄岩按 1:9 到 1:4 的比例混合而成,属于低熔/岩比的反应,将熔岩(01Y131)和 9 个橄榄岩样品的 Os 同位素测量值进行简单二元混合计算,结果表明大部分样品的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值增量在 0.2% 至 0.8% 之间,即熔体的加入对橄榄岩 Os 同位素组成的初始值影响很小。样品的 S 和 Os 含量与深海橄榄岩和造山带橄榄岩

的含量(Reisberg *et al.*, 2005)相当, S 含量高于亏损方辉橄榄岩的, 表明玄武质熔体的渗透可能形成了新的硫化物, 造成橄榄岩 Re 含量显著增高, Os 含量无明显变化(Reisberg *et al.*, 2005; Ackerman *et al.*, 2009; Harvey *et al.*, 2010)。含 Cpx 方辉橄榄岩具有不同的 Re/Os 比值, 经过时间积累, ^{187}Re 经过 β 衰变成 ^{187}Os , 形成具有不同 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 和 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值的样品, 笔者即从中获得了上述 Re-Os 同位素参考等时线年龄。

综上所述, 蛇纹石化和海底风化对橄榄岩 Re-Os 同位素体系影响可以忽略, 说明 Re-Os 同位素体系在低温地质作用下保持相对封闭。班公湖 MOR 型蛇绿岩中含 Cpx 方辉橄榄岩是由玄武质熔体和相对亏损的方辉橄榄岩按不同比例混合而成, 这种熔/岩作用会造成橄榄岩 Re 含量增高且 Re/Os 比值不等, 而橄榄岩的初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 变化较小。随着时间积累, 放射性成因 ^{187}Os 在含 Cpx 方辉橄榄岩中与 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 成比例增长, 形成了本文的参考等时线(图 3)。在发生熔/岩反应之前, 残留相橄榄岩的初始 Os 同位素是一致或接近的, 这与其它同位素体系一样, 是获得等时线年龄的必要假设条件。本文熔/岩反应形成的橄榄岩具有不同的 Re/Os 比值, Re-Os 数据显示较好的相关性, 数据点相对较分散, 满足获得 Re-Os 同位素体系等时线年龄的基本条件。Saal 等(2001)发现日本 Horoman 岩体橄榄岩也具有这种 Re-Os 同位素参考等时线, 并通过与 Sm-Nd 同位素年龄对比, 认为该假等时线年龄代表 MORB 熔体与亏损岩石圈地幔发生反应的时间。同样, 本文含 Cpx 方辉橄榄岩的 Re-Os 同位素等时线也是假等时线, 可以代表玄武质熔体与亏损方辉橄榄岩发生熔/岩反应的时间(Zhang, 2008; Rudnick and Walker, 2009)。

4.3 构造意义

依据古地理资料重建的板块构造模型显示, 随着古特提斯洋消减, 基梅里大陆从冈瓦纳大陆北缘裂开分离, 新特提斯洋逐渐打开(Sengor, 1987; Metcalfe, 2002; Stampfli and Borel, 2002)。但是, 关于班公湖-怒江特提斯洋的认识尚有异议。

潘桂棠等(2004)根据 1:25 万区域地质调查结果, 认为班公湖-怒江缝合带代表冈瓦纳大陆的北部边界, 即古特提斯洋。而任纪舜等(2004)则认为班公湖-怒江洋和雅鲁藏布洋同属于新特提斯大洋, 它们打开的时间大致相当, 在三叠纪演化成为大洋。

雅鲁藏布江、班公湖-怒江带东段的罗布萨和东巧蛇绿岩豆荚状铬铁矿中 Os-Ir 合金的 Re 亏损年龄(t_{RD})年龄指示二者代表的特提斯洋在早三叠世同时开启(Shi *et al.*, 2007), 这与 Sengör(1987)的认识一致。其它地区的研究也表明班公湖-怒江所属的特提斯大洋的打开具有穿时性, 在印度和阿拉伯板块地区打开的时间为中晚二叠世(Stampfli and Borel, 2002)。冈瓦纳大陆北缘的岩浆活动多为早二叠世晚期—晚二叠世(Pogue *et al.*, 1992; Spring *et al.*, 1993; Garzanti *et al.*, 1999; Lapierre *et al.*, 2004; Zhu *et al.*, 2010), 可能与班公湖-怒江所属的特提斯大洋裂解于晚二叠世至早三叠世裂解有关, 这也得到了古地磁方面研究的支持(Besse *et al.*, 1998; Muttoni *et al.*, 2009)。

本文玄武质熔体与亏损方辉橄榄岩发生熔岩反应的时间(254 ± 28 Ma)表明在该时期特提斯洋经历了一次构造热事件。这个构造岩浆热事件的时间与班公湖-怒江特提斯洋早期定义的裂解时间晚二叠世至早三叠世较为一致, 推测本文中 MOR 型蛇绿岩地幔橄榄岩的 Re-Os 同位素年龄可能代表班公湖-怒江特提斯洋开始裂解的时间。由于早期研究表明青藏高原新特提斯洋地幔为顽火辉石球粒陨石型(Shi *et al.*, 2007), 依据该模型计算的 Re 亏损年龄为 1.0 Ga, 与该带中东段东巧蛇绿岩地幔橄榄岩中包含的 Rodinia 超大陆岩石圈地幔的信息较为一致(Shi *et al.*, 2007), 推测青藏高原班公湖-怒江特提斯洋是在 Rodinia 超大陆基础上于晚二叠世至早三叠世期间开始裂解的。

5 结论

(1)班公湖-怒江蛇绿岩带西端班公湖地区出露有 MOR 型蛇绿岩, 通过主量和微量元素模拟计算, 推测含 Cpx 方辉橄榄岩是由玄武质熔体和相对亏损的方辉橄榄岩按 1:4 至 1:9 不同比例混合形成的。

(2)含 Cpx 方辉橄榄岩的 Re-Os 同位素参考等时线年龄为 254 ± 28 Ma, 代表着亏损方辉橄榄岩与玄武质熔体发生熔/岩反应的时间。这一构造热事件的年龄可能对应着班公湖-怒江特提斯洋裂解的时间, 为证明班公湖-怒江特提斯洋在晚二叠世至早三叠世裂解提供了 Re-Os 同位素年龄证据。

(3)含 Cpx 方辉橄榄岩的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始值为 0.12145 ± 0.00033 (2σ), 依据顽火辉石球粒陨石

模型计算的 Re 亏损年龄 (t_{RD}) 为 1.0 Ga, 与该带中东段东巧蛇绿岩中铬铁矿 Re -Os 同位素揭示的信息一致, 推测班公湖-怒江特提斯洋是在 Rodinia 超大陆基础上裂解形成的。

致谢 样品 Re -Os 同位素分析得到中国科学院广州地球化学研究所许继峰研究员和李杰博士的大力帮助, 评审专家提出了建设性的修改意见, 在此一并表示感谢。

References

- Ackerman L, Walker R J, Puchtel I S, *et al.* 2009. Effects of melt percolation on highly siderophile elements and Os isotopes in subcontinental lithospheric mantle: A study of the upper mantle profile beneath Central Europe [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73: 2 400~2 414.
- Alard O, Griffin W L, Lorand J P, *et al.* 2000. Non-chondritic distribution of the highly siderophile elements in mantle sulphides [J]. *Nature*, 407: 891~894.
- Allegre C J and Luck J M. 1980. Osmium isotopes as petrogenetic and geological tracers [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 48: 148~154.
- Anbar A D, Creaser R A, Papanastassiou D A, *et al.* 1992. Rhenium in seawater: confirmation of generally conservative behaviour [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56: 4 099~4 103.
- Becker H, Shirey S B and Carlson R W. 2001. Effects of melt percolation on the Re -Os systematics of peridotites from a Paleozoic convergent plate margin [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 188: 107~121.
- Besse J, Torcq F, Gallet Y, *et al.* 1998. Late Permian to Late Triassic palaeomagnetic data from Iran: constraints on the migration of the Iranian block through the Tethyan Ocean and initial destruction of Pangaea [J]. *Geophysical Journal International*, 135: 77~92.
- Beyer E E, Brueckner H K, Griffin W L, *et al.* 2004. Archean mantle fragments in proterozoic crust, western Gneiss Region, Norway [J]. *Geology*, 32: 609~612.
- Beyer E E, Griffin W L and O'Reilly S Y. 2006. Transformation of Archean lithospheric mantle by refertilization: evidence from exposed peridotites in the Western Gneiss Region, Norway [J]. *Journal of Petrology*, 47: 1 611~1 636.
- Birck J L, Barman M R and Capmas F. 1997. Re -Os Isotopic Measurements at the Femtomole Level in Natural Samples [J]. *Geostandards Newsletter*, 21: 19~27.
- Brueckner H K and Medaris L G. 1998. A tale of two orogens: the contrasting T-P-t history and geochemical evolution of mantle in high- and ultrahigh-pressure metamorphic terranes of the Norwegian Caledonides and the Czech Variscides [J]. *Schweizerische Mineralogische Und Petrographische Mitteilungen*, 78: 293~307.
- Burnham O M, Rogers N W, Pearson D G, *et al.* 1998. The petrogenesis of the eastern Pyrenean peridotites: An integrated study of their whole-rock geochemistry and Re -Os isotope composition [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: 2 293~2 310.
- Büchl A, Brüggemann G E, Batanova V G, *et al.* 2004. Os mobilization during melt percolation: The evolution of Os isotope heterogeneities in the mantle sequence of the Troodos ophiolite, Cyprus [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 3 397~3 408.
- Büchl A, Brugmann G E, Batanova V G, *et al.* 2002. Melt percolation monitored by Os isotopes and HSE abundances: a case study from the mantle section of the Troodos Ophiolite [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 204: 385~402.
- Carlson R W. 2005. Application of the Pt- Re -Os isotopic systems to mantle geochemistry and geochronology [J]. *Lithos*, 82: 249~272.
- Chang Chengfa and Zheng Xilan. 1973. Tectonic characteristics of Qomolangma area in the southern Tibet, China and discussing the formation of E-W extending mountains in Tibet Plateau [J]. *Science in China*, 16: 190~203 (in Chinese).
- Coleman R G. 1977. *Ophiolites* [M]. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1~25.
- Creaser R A, Papanastassiou D A and Wasserburg G J. 1991. Negative thermal ion mass spectrometry of osmium, rhenium and iridium [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 397~401.
- Elthon D. 1992. Chemical trends in abyssal peridotites—refertilization of depleted suboceanic mantle [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 97: 9 015~9 025.
- Frey F A, Suen C J and Stockman H W. 1985. The Ronda high-temperature peridotite-geochemistry and petrogenesis [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49: 2 469~2 491.
- Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, *et al.* 2002. Re -Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 198: 307~322.
- Garzanti E, Le Fort P and Sciunnach D. 1999. First report of Lower Permian basalts in South Tibet: tholeiitic magmatism during break-up and incipient opening of Neotethys [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17: 533~546.
- Griffin W L, O'Reilly S Y and Ryan C G. 1999. The composition and origin of sub-continental lithospheric mantle [A]. Fei Y, Bertka C M and Mysen B O. *Mantle Petrology: Field Observations and High-Pressure Experimentation: A Tribute to Francis F. (Joe) Boyd* [C]. *Geochemical Society Special Publications*, 6: 13~45.
- Hartmann G and Hans Wedepohl K. 1993. The composition of peridotite tectonites from the Ivrea Complex, northern Italy: Residues from melt extraction [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 1 761~1 782.
- Harvey J, Gannoun A, Burton K W, *et al.* 2006. Ancient melt extraction from the oceanic upper mantle revealed by Re -Os isotopes in abyssal peridotites from the Mid-Atlantic ridge [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 244: 606~621.
- Harvey J, Gannoun A, Burton K W, *et al.* 2010. Unravelling the ef-

- fects of melt depletion and secondary infiltration on mantle Re-Os isotopes beneath the French Massif Central [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74 : 293~320.
- Jin Y B, Zhi X C, Meng Q, *et al.* 2004. Re-Os dating of the Raobazhai ultra mafic massif in North Dabi [J]. *Chinese science bulletin*, 5 : 508~513.
- Juteau T, Cannat M and Lagabrielle Y. 1990. Serpentinized peridotites in the upper oceanic crust away from transform zones : a comparison of the results of previous DSDP and ODP legs [C]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 106 : 303~308.
- Kelemen P B, Dick H J B and Quick J E. 1992. Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle [J]. *Nature*, 358 : 635~641.
- Lapierre H, Samper A, Bosch D, *et al.* 2004. The Tethyan plume : geochemical diversity of Middle Permian basalts from the Oman rifted margin [J]. *Lithos*, 74 : 167~198.
- Le Roux V, Bodinier J L, Tommasi A, *et al.* 2007. The Lherz spinel lherzolite : Refertilized rather than pristine mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 259 : 599~612.
- Levasseur S, Birck J L and Allegre C J. 1998. Direct measurement of femtomoles of osmium and the $^{187}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ ratio in seawater [J]. *Science*, 282 : 272~274.
- Li J, Xu J F, Suzuki K, *et al.* 2010. Os, Nd and Sr isotope and trace element geochemistry of the Muli picrites : Insights into the mantle source of the Emeishan Large Igneous Province [J]. *Lithos*, 119 : 108~122.
- Liu C Z, Snow J E, Hellebrand E, *et al.* 2008. Ancient, highly heterogeneous mantle beneath Gakkel ridge, Arctic Ocean [J]. *Nature*, 452 : 311~316.
- Luguet A, Lorand J P and Seyler M. 2003. Sulfide petrology and highly siderophile element geochemistry of abyssal peridotites : A coupled study of samples from the Kane Fracture Zone (45° W 23° 20' N, MARK Area, Atlantic Ocean) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 : 1553~1570.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the earth [J]. *Chemical Geology*, 120 : 223~253.
- Meisel T, Walker R J, Irving A J, *et al.* 2001. Osmium isotopic compositions of mantle xenoliths : a global perspective [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65 : 1311~1323.
- Meng Qing, Zheng Lei, Xia Qionxia, *et al.* 2004. Study on Analytical Method for Re-Os Isotopic System in Mafic-Ultramafic Rocks [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 23 : 92~96 (in Chinese).
- Metcalfe I. 2002. Permian tectonic framework and palaeogeography of SE Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20 : 551~566.
- Morgan J W, Golightly D W and Dorrzapf A F. 1991. Methods for the separation of rhenium, osmium and molybdenum applicable to isotope geochemistry [J]. *Talanta*, 38 : 259~265.
- Muntener O, Pettke T, Desmurs L, *et al.* 2004. Refertilization of mantle peridotite in embryonic ocean basins : trace element and Nd isotopic evidence and implications for crust-mantle relationships [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 221 : 293~308.
- Muttoni G, Gaetani M, Kent D V, *et al.* 2009. Opening of the Neotethys Ocean and the Pangea B to Pangea A transformation during the Permian [J]. *Georabia*, 14 : 17~48.
- Nagler T F and Frei R. 1997. " Plug in " Os distillation [J]. *Schweizerische Mineralogische Und Petrographische Mitteilungen*, 77 : 123~127.
- Niu Y L. 1997. Mantle melting and melt extraction processes beneath ocean ridges : evidence from abyssal peridotites [J]. *Journal of Petrology*, 38 : 1047~1074.
- Obata M and Nagahara N. 1987. Layering of Alpine-type peridotite and the segregation of partial melt in the upper mantle [J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets*, 92 : 3467~3474.
- Pan Guitang, Zhu Dicheng, Wang Liquan, *et al.* 2004. Bangong Lake-Nu River suture zone-the northern boundary of Gondwanaland : Evidence from geology and geophysics [J]. *Earth Science Frontiers*, 11 : 371~382 (in Chinese).
- Pogue K R, Dipietro J A, Khan S R, *et al.* 1992. Late Paleozoic rifting in northern Pakistan [J]. *Tectonics*, 11 : 871~883.
- Qiu Ruizhao, Zhou Su, Deng Jinfu, *et al.* 2004. Dating of gabbro in the Shemalagou ophiolite in the western segment of the Bangong Co-Nujiang ophiolite belt, Tibet-with a discussion of the age of the Bangong Co-Nujiang ophiolite belt [J]. *Chinese Geology*, 31 : 262~268 (in Chinese).
- Reisberg L, Zhi X C, Lorand J P, *et al.* 2005. Re-Os and S systematics of spinel peridotite xenoliths from east central China : Evidence for contrasting effects of melt percolation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 239 : 286~308.
- Ren Jishun and Xiao Liwei. 2004. Lifting the mysterious veil of the tectonics of the Qinghai-Tibet Plateau by 1 : 250 000 geological mapping [J]. *Geological Bulletin of China*, 23 : 1~11 (in Chinese).
- Rudnick R L and Walker R J. 2009. Interpreting ages from Re-Os isotopes in peridotites [J]. *Lithos*, 112 : 1083~1095.
- Saal A E, Takazawa E, Frey F A, *et al.* 2001. Re-Os isotopes in the Horoman peridotite : Evidence for refertilization [J]. *Journal of Petrology*, 42 : 25~37.
- Sengor A M C. 1987. Tectonics of the Tethysides : orogenic collage development in a collisional setting [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 15 : 213~244.
- Shi R D. 2007. SHRIMP dating of the Bangong Lake SSZ-type ophiolite : Constraints on the closure time of ocean in the Bangong Lake-Nujiang River, northwestern Tibet [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52 : 936~941.
- Shi R D, Alard O, Zhi X C, *et al.* 2007. Multiple events in the Neotethyan oceanic upper mantle : Evidence from Ru-Os-Ir alloys in the Luobusa and Dongqiao ophiolitic podiform chromitites, Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 261 : 33~48.
- Shi R D, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2010. Evolution of the Liliangshan garnet peridotites in the North Qaidam UHP belt, Northern Tibetan Plateau : Constraints from Re-Os isotopes [J]. *Lithos*, 117 : 307~321.
- Shi Rendeng, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, *et al.* 2005. Recognition of

- MOR- and SSZ-type ophiolites in the Bangong Lake ophiolite mélangé, western Tibet: evidence from two kinds of mantle peridotites [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24: 397~408 (in Chinese with English abstract).
- Shi R D, Yang J S, Xu Z Q, *et al.* 2008. The Bangong Lake ophiolite (NW Tibet) and its bearing on the tectonic evolution of the Bangong-Nujiang suture zone [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 438~457.
- Shirey S B and Walker R J. 1995. Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analysis [J]. *Analytical Chemistry*, 67: 2 136~2 141.
- Shirey S B and Walker R J. 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 26: 423~500.
- Snow J E and Reisberg L. 1995. Os isotopic systematics of the MORB mantle: results from altered abyssal peridotites [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 133: 411~421.
- Spring L, Bussy F, Vannay J C, *et al.* 1993. Early Permian granitic dykes of alkaline affinity in the Indian High Himalaya of Upper Lahul and SE Zaskar: geochemical characterization and geotectonic implication [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 74: 251~264.
- Stampfli G M and Borel G D. 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 17~33.
- Stern R J. 2004. Subduction initiation: spontaneous and induced [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 226: 275~292.
- Takazawa E, Frey F A, Shimizu N, *et al.* 2000. Whole rock compositional variations in an upper mantle peridotite (Horoman, Hokkaido, Japan): Are they consistent with a partial melting process? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 695~716.
- Völkening J, Walczyk T G and Heumann K. 1991. Osmium isotope ratio determinations by negative thermal ionization mass spectrometry [J]. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 105: 147~159.
- van Acken D, Becker H and Walker R J. 2008. Refertilization of Jurassic oceanic peridotites from the Tethys Ocean—Implications for the Re-Os systematics of the upper mantle [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 268: 171~181.
- Walter M J. 1998. Melting of garnet peridotite and the origin of komatiite and depleted lithosphere [J]. *Journal of Petrology*, 39: 29~60.
- Wang Xibin, Bao Peisheng, Deng Wanming, *et al.* 1987. Tectonic Evolution of Himalayan Lithosphere—Tibet Ophiolite (3) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 138~214 (in Chinese).
- Westerlund K J, Shirey S B, Richardson S H, *et al.* 2006. A subduction wedge origin for Paleoproterozoic peridotitic diamonds and harzburgites from the Panda kimberlite, Slave craton: evidence from Re-Os isotope systematics [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152: 275~294.
- Zhang H F. 2008. Variation of Re-Os isotopic system during peridotite-melt interaction: Implication for the meaning of Re-Os isotopic age of Cenozoic mantle peridotites from the North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24: 2 457~2 467.
- Zheng Lei and Zhi Xiachen. 2004. Mass Fractionation Correction of Osmium Isotopic Compositions in Negative Thermal Ionization Mass Spectrometric Measurement [J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 25: 193~197 (in Chinese).
- Zheng L, Zhi X C and Reisberg L. 2009. Re-Os systematics of the Raobazhai peridotite massifs from the Dabie orogenic zone, eastern China [J]. *Chemical Geology*, 268: 1~14.
- Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, *et al.* 2005. REE and PGE geochemical constraints on the formation of dunites in the Luobusa ophiolite, Southern Tibet [J]. *Journal of Petrology*, 46: 615~639.
- Zhu D C, Mo X X, Zhao Z D, *et al.* 2010. Presence of Permian extension- and arc-type magmatism in southern Tibet: Paleogeographic implications [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122: 979~993.

附中文参考文献

- 常承法, 郑锡澜. 1973. 中国西藏南部珠穆朗玛峰地区地质构造特征以及青藏高原东西向诸山系形成的探讨 [J]. *中国科学*, 16: 190~203.
- 孟庆, 郑磊, 夏琼霞, 等. 2004. 镁铁-超镁铁岩铼-钨同位素体系分析方法 [J]. *岩矿测试*, 23: 92~96.
- 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 等. 2004. 班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据 [J]. *地学前缘*, 11: 371~382.
- 邱瑞照, 周肃, 邓晋福, 等. 2004. 西藏班公湖-怒江西段舍马拉沟蛇绿岩中辉长岩年龄测定-兼论班公湖-怒江蛇绿岩形成 [J]. *中国地质*, 31: 262~268.
- 任纪舜, 肖黎薇. 2004. 1:25 万地质填图进一步揭开了青藏高原大地构造的神秘面纱 [J]. *地质通报*, 23: 1~11.
- 史仁灯, 杨经绥, 许志琴, 等. 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: 397~408.
- 王希斌, 鲍佩声, 邓万明, 等. 1987. 喜马拉雅山构造演化——西藏蛇绿岩(3) [M]. 北京: 地质出版社, 138~214.
- 郑磊, 支磊. 2004. 负热电离质谱法测量 Os 同位素组成的质量分馏校正 [J]. *质谱学报*, 25: 193~197.