

西藏那曲蛇绿岩地幔源区的碳质球粒陨石型 Os 同位素特征及其意义

黄启帅^{①②}, 史仁灯^①, 刘德亮^{①②}, 张晓冉^{①②}, 樊帅权^{①②}, 丁林^①

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

E-mail: huangqishuai@itpcas.ac.cn

2012-04-10 收稿, 2012-07-04 接受

国家重点基础研究发展计划(2011CB403101)和国家自然科学基金(41172059, 40972056, 40930316)资助

摘要 尖晶石具有高 Os 低 Re 含量的特性, 能够抵抗变质、蚀变和风化作用对其 Os 同位素组成的影响, 其 Os 同位素组成的测量值可以代表形成时的初始 Os 同位素组成. 本文尝试用同一堆晶序列纯橄岩中尖晶石 Os 同位素组成和辉长岩中锆石年龄来反演地幔源区的 Os 同位素组成, 为认识大洋岩石圈的形成和演化提供重要证据. 西藏那曲蛇绿岩是新特提斯蛇绿岩的一部分, 位于班公湖-怒江缝合带中段, 形成于成熟的弧后盆地, 其中发育同一堆晶序列的纯橄岩和辉长岩. 辉长岩中锆石 U-Pb 年龄为 183.7 ± 1 Ma. 纯橄岩的全岩和分选出的尖晶石的 Os 同位素组成非常一致, 排除了后期混染作用的影响, 可以代表对流上地幔 Os 同位素组成. 与碳质球粒陨石对比, 尖晶石的 γ_{Os} 为 $-0.2 \sim -0.3$, 表明那曲蛇绿岩的地幔源区为碳质球粒陨石型对流上地幔. 因此, 青藏高原大陆岩石圈主体属于残留的特提斯大洋岩石圈, 是由中生代软流圈地幔顶部转化形成. 这是首次运用能准确定年的堆晶岩中尖晶石 Re-Os 同位素组成来反演蛇绿岩地幔源区性质的研究实例.

关键词

Re-Os 同位素
尖晶石
蛇绿岩
那曲
西藏

蛇绿岩是一套包括地幔橄榄岩、堆晶岩、岩墙群和熔岩的超镁铁质-镁铁质岩石组合, 代表着古老大洋岩石圈的残留^[1]. 蛇绿岩地幔源区的地球化学属性的研究, 对探讨古大洋岩石圈的形成及地幔演化具有重要的意义^[2,3]. Re-Os 同位素体系为研究地幔的熔融和分异过程提供了新的地球化学工具^[4,5]. 对蛇绿岩的 Os 同位素组成研究, 可以有效地指示地幔源区性质, 并能识别出亲石元素同位素体系所不能示踪的地球化学信息, 为蛇绿岩的深入研究提供有力的手段.

蛇绿岩中的地幔橄榄岩代表着对流上地幔部分熔融的残留相, 可以直接揭示地幔源区的信息. 然而, 众多研究表明蛇绿岩中地幔橄榄岩的 Os 同位素组成有明显的差异^[6-13], 这可能是因为地幔橄榄岩经历了

多期的部分熔融作用, 而后期的熔体渗透、硫化物交代或熔岩反应改造也会造成其 Os 同位素组成的显著差异^[14-16]. 近期研究表明, 软流圈地幔中存在再循环的难熔大陆岩石圈地幔, 这可能是因为大陆裂解初期大陆岩石圈地幔残留在大洋岩石圈地幔中, 并参与俯冲再循环^[10,17-22]. 由于蛇绿岩中地幔橄榄岩包含有亏损难熔的古大陆岩石圈地幔^[6,8], 导致地幔橄榄岩的全岩 Re-Os 同位素特征难以准确示踪形成蛇绿岩的对流上地幔性质.

同位素地球化学认为对流上地幔在部分熔融过程中熔体相和残留相是完全平衡的, 因此可以通过熔体相的同位素组成来反演源区的地球化学性质^[23]. 前人试图通过洋中脊玄武岩的 Re-Os 同位素特征来反演地幔源区性质, 但是洋中脊玄武岩中的 Os 含量

英文版见: Huang Q S, Shi R D, Liu D L, et al. Os isotopic evidence for a carbonaceous chondritic mantle source for the Nagqu ophiolite from Tibet and its implications. *Chin Sci Bull*, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-012-5384-8

仅几十个 ppt, 极易受到高 Os 同位素组成的海水或高 Os 含量的锰结核等后期混染作用的影响^[24-26], 而且 Re/Os 比值和放射性成因 ¹⁸⁷Os 含量较高, 因而难以获得准确的地幔信息. 另外, 洋中脊玄武岩与残留相的深海橄榄岩的地球化学成分是否互补, 同位素组成是否平衡一直存在争议, 利用洋中脊玄武岩来代表原始岩浆成分去反演地幔源区特征是值得商榷的. 在完整的蛇绿岩剖面中, 上部熔岩和残留相地幔橄榄岩之间存在一套堆晶岩, 研究表明熔体相中的 PGE 和 Re 主要赋存在下部的堆晶岩中^[27]. 熔体相早期分离结晶形成的堆晶纯橄岩中的尖晶石不仅具有高 Os 低 Re 含量, 不易受到后期混染作用的影响^[28-30], 而且及时准确地记录了对流上地幔的源区性质, 可以运用于大洋岩石圈地幔性质的研究.

本文选择了西藏那曲蛇绿岩中同一堆晶序列的纯橄岩和辉长岩, 利用纯橄岩全岩及其中尖晶石的 Re-Os 同位素组成的测量值, 以及根据辉长岩中锆石年龄界定纯橄岩和尖晶石结晶时间, 通过与球粒陨石

对比, 探讨那曲蛇绿岩的地幔源区的地球化学性质.

1 地质概况及样品

班公湖-怒江缝合带是青藏高原北部一条重要的板块边界, 由班公湖、东巧、那曲、丁青等多个蛇绿岩体组成. 那曲蛇绿岩位于班公湖-怒江缝合带中段, 那曲县城西北约 20 km(图 1). 蛇绿岩以岩块形式构造侵位在侏罗纪木嘎岗日群地层中, 岩块主要以代表岩石圈地幔的方辉橄榄岩为主, 并有少量的堆晶杂岩, 二者为断层接触. 已有研究表明该地区蛇绿岩形成于成熟的弧后盆地^[31-34].

本区堆晶岩发育完整的堆晶序列, 底部为纯橄岩, 顶部为层状辉长岩, 之间可见橄榄辉石岩和辉石岩等堆晶条带(图 1). 整个堆晶岩层连续性非常好, 垂向厚约 30 m. 纯橄岩和辉长岩为渐变过渡关系(图 2), 有序结晶的矿物组合代表着它们是由同一个大的岩浆房结晶分异形成^[35]. 用于本文研究的样品采自同一堆晶序列中的纯橄岩(样品号 09039)和辉长岩

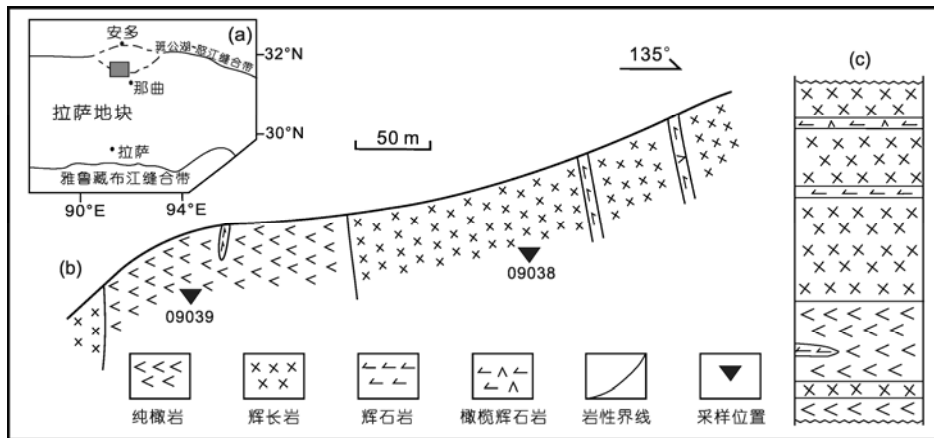


图 1 西藏那曲蛇绿岩地质图

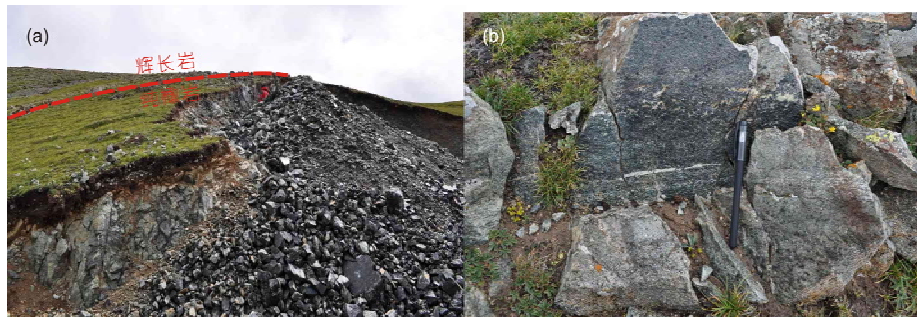


图 2 那曲蛇绿岩堆晶岩中纯橄岩与辉长岩接触关系(a)和堆晶辉长岩(b)

(样品号 09038).

2 分析方法及结果

用于分选锆石的辉长岩约 15 kg, 用于分选尖晶石的两个纯橄岩样品重约 10 kg, 分选工作是在河北省区域地质调查研究所完成, 整个分选流程使用的装置可彻底清洗, 避免了混染. 将待测锆石以环氧树脂固定, 抛光至暴露出锆石中心面, 在光学显微镜下分别用反射光、透射光照相, 并在中国科学院地质与地球物理研究所扫描电子显微镜实验室进行了锆石阴极发光(CL)照相. 在中国科学院青藏高原研究所 LA-ICPMS 实验室进行了锆石 U-Pb 定年, 使用美国

New Wave 科技有限公司 UP 193 nm ArF 准分子激光器, 载气为 He, 激光频率 8 Hz, 剥蚀时间 40 s. 质谱仪为美国 Agilent 科技有限公司 7500a 型质谱仪. 年龄分析使用的标准锆石为 Plešovice 锆石, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $337.13 \pm 0.37 \text{ Ma}$ ^[36]. 普通铅校正后^[37], 单个数据点的分析误差为 1σ . 采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄, 其加权平均值为 95% 的置信度, 获得了 7 颗锆石的可靠年龄数据(表 1). 锆石 Th/U 比值为 0.13~1.15, 均大于 0.10, 为岩浆锆石^[38], 与锆石的 CL 图像指示结果是一致的. 在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上(图 3), 7 颗锆石的年龄均接近于谐和线, 本文采用锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权年龄为 $183.7 \pm 1 \text{ Ma}$.

表 1 西藏那曲蛇绿岩辉长岩锆石 U-Pb 年龄分析结果^{a)}

分析点号	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
										年龄(Ma)	误差
38-01	0.71	0.04964	1.8	0.19811	1.7	0.02896	0.8	0.00698	0.9	184	1
38-02	0.79	0.04684	2.0	0.18705	1.9	0.02898	0.8	0.00677	0.9	184	1
38-03	0.13	0.04988	5.8	0.19695	5.6	0.02865	1.4	0.00738	6.6	182	3
38-04	0.24	0.04708	4.4	0.18593	4.2	0.02866	1.2	0.00683	4.4	182	2
38-05	1.03	0.05029	4.4	0.20200	4.2	0.02915	1.2	0.00711	1.7	185	2
38-06	0.44	0.04998	3.0	0.19856	2.9	0.02883	1.0	0.00709	1.8	183	2
38-07	1.15	0.04988	3.7	0.19807	3.6	0.02882	1.0	0.00745	1.3	183	2

a) 表中误差均为 1σ

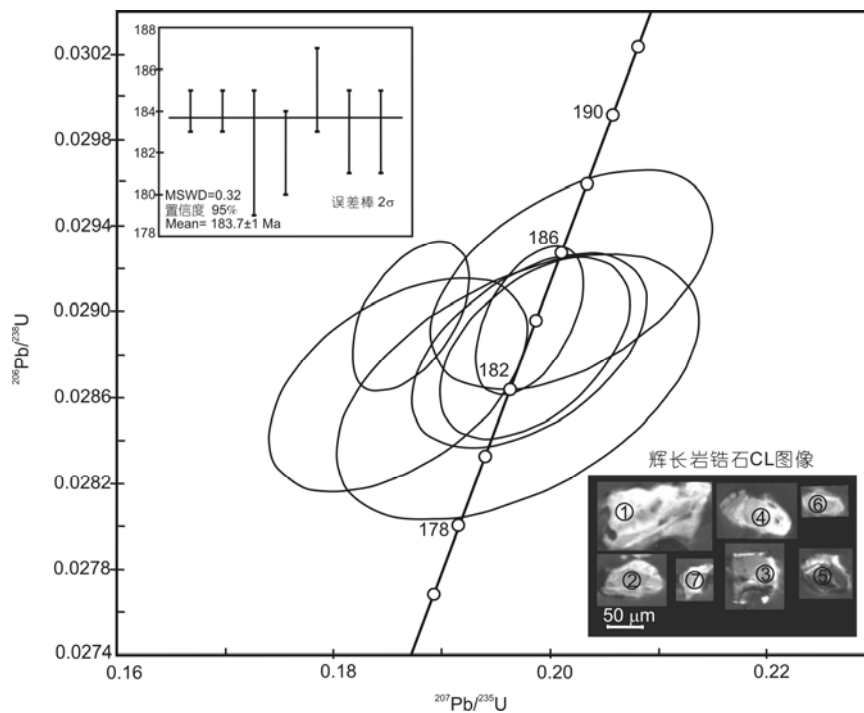


图 3 辉长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图
CL 图像中的数字代表着测试点号

纯橄岩全岩和尖晶石的 Re-Os 同位素分析是在中国科学院广州地球化学研究所 Re-Os 同位素实验室完成的, 分析方法详见文献[4,39], 该实验室测试的 Re-Os 同位素数据已经大量发表^[10,21,40-42]. 实验流程: 精确称量全岩 1.5 g(<200 目粉末), 尖晶石 0.2 g 左右装入 Carius 试管, 分别加入 ¹⁸⁵Re 和 ¹⁹⁰Os 稀释剂, 然后加入 2.5 mL 10.8 mol/L HCl, 冷冻以后再加入 7.5 mL 14 mol/L HNO₃, 封管后在 240 °C 溶样 24 h, 尖晶石溶样时间为 48 h. 用 CCl₄ 和 HBr 分离出 Os, 然后进行微蒸馏纯化^[43], 最后将 Os 的溶液浓缩至 3 μL, 在 Triton 负离子热电离质谱仪(NTIMS)上完成分析^[44,45]. Re 的提取和纯化通过 AG1×8 型阴离子交换树脂, Re 含量的分析是用 ICPMS 测试完成的. 全流程 Re 空白为 5~10 pg, Os 空白为 3~7 pg, 流程 Os 空白 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值为 0.20556, 对高 Os 含量的尖晶石和纯橄岩影响很小. 数据都经过了质量分馏和空白校正, 纯橄岩 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值变化范围为 0.12533~0.12603, 尖晶石 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 比值为 0.12536~0.12552 (表 2).

3 讨论

3.1 堆晶岩中尖晶石可以相对准确反演地幔源区的 Os 同位素组成

Re-Os 同位素资料揭示出在造山带橄橄榄岩、蛇绿岩中的地幔橄橄榄岩、现代大洋地幔橄橄榄岩中有古老岩石圈地幔的残留^[10,12,17,18,20,21,46-50], 这种极度亏损难熔岩石圈的存在, 导致运用蛇绿岩中地幔橄橄榄岩的 Re-Os 同位素特征难以准确地反映地幔源区的性质.

在扩张脊处, 对流上地幔上涌、减压发生部分熔融形成岩浆, 这种岩浆从源区中抽取并形成洋壳, 而与岩浆互补的熔融残留物形成岩石圈地幔^[51-54], 这种部分熔融形成岩浆以及洋壳的模式作为板块构

造理论的一个重要组成部分已经被人们普遍接受^[55-58]. 但是, 深海橄橄榄岩与洋中脊玄武岩的地球化学成分是否互补, 同位素组成是否平衡, 也就是洋中脊玄武岩能不能代表原始岩浆成分一直存在争论. 一种观点认为洋中脊玄武岩的成分变化与深海橄橄榄岩指示的地幔的不同熔融程度是相一致的, 认为这种部分熔融形成的洋中脊玄武岩就是原始岩浆, 并认为有两种源区: 一是源区在 2~3 GPa 下经过 20%~30%部分熔融形成的苦橄质岩浆; 另一是源区在相对较浅的部位(大约 1 GPa)经过约 10%~20%的部分熔融形成的拉斑质岩浆^[59]. 但是另一种观点认为熔融体与熔融残留体存在交代反应作用^[60-63], 因而认为现在看到的玄武岩和地幔橄橄榄岩并不是理想的化学成分呈互补关系的熔融体和熔融残留体, 所以洋中脊玄武岩并不能代表原始岩浆. 虽然后来有学者对这种岩浆形成机制做了很多工作, 但是研究对象均为洋中脊玄武岩, 认为玄武岩全岩地球化学成分是均一的, 是岩浆房混合均一过程的结果, 而不是反映其来自于均一的地幔源区熔融^[23,64,65], 也就是说用玄武岩反演地幔源区地球化学性质存在不确定性.

本文选择在空间位置上最接近地幔橄橄榄岩的早期堆晶岩为研究对象, 尝试用堆晶纯橄岩全岩及其中的尖晶石的 Re-Os 同位素组成反演地幔源区的地球化学性质. 在扩张脊岩浆形成过程中, 相对原始的对流上地幔具有更低的熔点会优先发生部分熔融, 而由于俯冲作用再循环到对流上地幔中的极度亏损的、难熔的岩石圈地幔, 在无水的情况下并不会发生部分熔融^[6,20], 因而对形成的熔体相的贡献是极小的, 甚至可以忽略. 而且 Sobolev 等人^[66,67]对俯冲进入上地幔的地壳进行了研究, 约 4%的榴辉岩加入到软流圈地幔. 通过混合计算, 对上地幔 Os 同位素组成的影响也仅为 0.5%, 在 Os 同位素的实验分析误差范围内, 对熔体相的 Os 同位素组成影响较小. 并且 Os 主

表 2 堆晶纯橄岩(09039)和尖晶石(SP)的 Re-Os 同位素特征

样品编号	Re (ppb)	Os (ppb)	¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os	2σ	¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os	2σ	γOs(183.7 Ma) ^{a)}
09039-7	0.023	4.743	0.023	0.002	0.12533	0.00043	-0.4
09039-10	0.018	0.958	0.093	0.010	0.12613	0.00041	0.1
09039-11	0.014	2.652	0.026	0.004	0.12603	0.00047	0.1
SP39-7	0.083	20.173	0.020	0.001	0.12536	0.00024	-0.3
SP39-11	0.046	10.859	0.021	0.002	0.12552	0.00035	-0.2

a) 碳质球粒陨石演化模型: ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os_{chon}=0.12700, ¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os_{chon}=0.40186^[41]. 1 ppb=1 ng/g

要赋存在硫化物和氧化物中^[4,68],堆晶岩中的硫化物和尖晶石在岩浆结晶分异早期形成,硫化物呈微小颗粒包体保存在尖晶石中^[28,29,69-71],不会受到后期混染作用的影响.所以根据堆晶纯橄岩中尖晶石 Os 同位素组成,可以相对准确反演蛇绿岩地幔源区的 Os 同位素组成特征.

那曲蛇绿岩堆晶纯橄岩全岩和尖晶石具有一致的 Os 同位素组成($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值分别为 0.12533~0.12603 和 0.12536~0.12552),明显不同于具有高放射性成因 Os 同位素比值的弧火山岩和地幔楔橄榄岩^[72-74],可以排除俯冲板片流体等后期混染作用对堆晶纯橄岩 Os 同位素组成的影响.同时,那曲堆晶岩尖晶石具有高 Os 含量与较低 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值的特点也表明堆晶岩中的尖晶石可能继承了地幔源区原生硫化物的 Os 同位素组成特点^[16,71,75],可以准确地反映地幔源区的性质.

3.2 那曲蛇绿岩地幔源区性质

尖晶石具有特别低的 Re/Os 比值,形成后由 ^{187}Re 衰变形成的 ^{187}Os 量极少,因此可以直接用尖晶石的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 观测值代表其形成时对流上地幔的初始 Os 同位素组成^[28].同一堆晶序列的辉长岩锆石年龄为 183.7 ± 1 Ma,可以代表纯橄岩中尖晶石形成的时间.通过与碳质球粒陨石对比^[4],尖晶石的 γ_{Os} 为 $-0.2\sim-0.3$ (表2),表明那曲蛇绿岩地幔源区的 Os 同位素组成是碳质球粒陨石型的.这与利用幔源橄榄岩包体和造山带橄榄岩获得的原始上地幔的 Os 同位素组成是一致的^[76],与那曲蛇绿岩形成于成熟弧后盆地构造环境也是相互支持的^[31,32].然而,本文对那曲蛇绿岩地幔源区的研究结果略低于东巧蛇绿岩地幔源区中近似顽火辉石球粒陨石的 Os 同位素组成估算值^[47].这种差异可能是地幔不均一性造成的,也有可能是由于估算方法的不同.本文直接利用辉长岩中锆石年龄来代表纯橄岩中尖晶石的形成时间.

那曲蛇绿岩堆晶岩中尖晶石 Os 同位素组成反演得到的地幔源区的 Os 同位素特征与碳质球粒陨石地

幔演化模型一致,说明其地幔源区包含有碳质球粒陨石型的对流上地幔源区^[77].与原始地幔 Os 同位素组成相比^[78,79],那曲蛇绿岩地幔源区的 Os 同位素组成是偏低的,可能代表着轻微亏损的软流圈地幔源区.特提斯蛇绿岩中镁铁质岩石的 Nd-Pb 同位素和地球化学组成研究也显示其来自具有印度洋 MORB 型同位素特征的亏损软流圈地幔源区^[80].Mo 等人^[81]对藏南林子宗火山岩的 Nd 同位素研究表明,部分火山岩的 $\epsilon_{\text{Nd}} > 0$,揭示火山岩原始源区是新生洋壳,因此可能来源于特提斯洋壳的部分熔融.Tapponnier 等人^[82]提出在青藏高原下部可能存在停滞的大洋板片,但是这并未得到 Zhao 等人^[83]对青藏高原岩石圈地球物理研究的证实.尽管青藏高原内部有类似安多微陆块等古老地体的存在^[84],但是地球物理上青藏高原岩石圈主体可能具有大洋岩石圈性质^[85].在印度陆块向亚洲陆块的碰撞过程中,亚洲大陆南缘经历了古生代到中生代的多次新生地壳和弧-陆碰撞的大陆增生过程^[85].本文研究的那曲蛇绿岩属于中生代早侏罗世成熟弧后盆地环境中新生的大洋地壳,经过与安多微陆块和拉萨地块的碰撞拼贴过程保存下来.西藏那曲蛇绿岩 Os 同位素组成与对流的软流圈地幔 Os 同位素特征一致,指示该弧后盆地已经演化进入成熟阶段,这样弧后地幔部分熔融所形成的玄武岩与洋中脊玄武岩在地球化学上具有相似性^[86].因此,青藏高原大陆岩石圈主体属于残留的特提斯大洋岩石圈,是由中生代软流圈地幔顶部转化形成.

4 结论

西藏那曲蛇绿岩形成于成熟的弧后盆地,其中发育一套完整序列的纯橄岩-辉长岩堆晶岩,辉长岩中锆石 U-Pb 年龄为 183.7 ± 1 Ma,纯橄岩全岩和其中尖晶石 Os 同位素组成测量值为 0.12533~0.12603.经过与碳质球粒陨石对比,尖晶石的 γ_{Os} 为 $-0.2\sim-0.3$,表明那曲蛇绿岩地幔源区为碳质球粒陨石型的对流上地幔.因此青藏高原大陆岩石圈是由中生代软流圈地幔顶部转化形成.

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,锆石 U-Pb 年龄测试得到中国科学院青藏高原研究所岳雅慧博士的帮助,评审专家的建设性评议极大地提高了本文的学术水平和科学意义,全体作者在此一并表示感谢.

参考文献

- 1 Coleman R G. The diversity of ophiolites. *Geol En Mijnbouw*, 1984, 63: 141–150
- 2 Mahoney J J, Frei R, Tejada M L G, et al. Tracing the Indian Ocean mantle domain through time: Isotopic results from Old West Indian, East Tethyan, and South Pacific seafloor. *J Petrol*, 1998, 39: 1285–1306
- 3 Dilek Y, Moores E M, Elthon D, et al. *Ophiolites and Oceanic Crust: New Insights from Field Studies and the Ocean Drilling Program*. Boulder: Geological Society of America Special Paper, 2000
- 4 Shirey S B, Walker R J. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1998, 26: 423–500
- 5 支霞臣. Re-Os 同位素体系和大陆岩石圈地幔定年. *科学通报*, 1999, 44: 2362–2371
- 6 Snow J E, Schmidt G, Rampone E. Os isotopes and highly siderophile elements (HSE) in the Ligurian ophiolites, Italy. *Earth Planet Sci Lett*, 2000, 175: 119–132
- 7 Becker H, Shirey S B, Carlson R W. Effects of melt percolation on the Re-Os systematics of peridotites from a Paleozoic convergent plate margin. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 188: 107–121
- 8 Büchl A, Brüggmann G E, Batanova V G, et al. Os mobilization during melt percolation: The evolution of Os isotope heterogeneities in the mantle sequence of the Troodos ophiolite, Cyprus. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68: 3397–3408
- 9 Saal A E, Takazawa E, Frey F A, et al. Re-Os isotopes in the Horoman peridotite: Evidence for refertilization? *J Petrol*, 2001, 42: 25–37
- 10 Shi R D, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Melt/mantle mixing produces podiform chromite deposits in ophiolites: Implications of Re-Os systematics in the Dongqiao Neo-tethyan ophiolite, northern Tibet. *Gondwana Res*, 2012, 21: 194–206
- 11 Luck J M, Allegre C J. Osmium isotopes in ophiolites. *Earth Planet Sci Lett*, 1991, 107: 406–415
- 12 Tsuru A, Walker R J, Kontinen A, et al. Re-Os isotopic systematics of the 1.95 Ga Jormua Ophiolite Complex, northeastern Finland. *Chem Geol*, 2000, 164: 123–141
- 13 van Acken D, Becker H, Walker R J. Refertilization of Jurassic oceanic peridotites from the Tethys Ocean—Implications for the Re-Os systematics of the upper mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 268: 171–181
- 14 Rudnick R L, Walker R J. Interpreting ages from Re-Os isotopes in peridotites. *Lithos*, 2009, 112: 1083–1095
- 15 Harvey J, Gannoun A, Burton K W, et al. Unravelling the effects of melt depletion and secondary infiltration on mantle Re-Os isotopes beneath the French Massif Central. *Geochim Cosmochim Acta*, 2010, 74: 293–320
- 16 Alard O, Luguët A, Pearson N J, et al. *In situ* Os isotopes in abyssal peridotites bridge the isotopic gap between MORBs and their source mantle. *Nature*, 2005, 436: 1005–1008
- 17 Hassler D R, Shimizu N. Osmium isotopic evidence for ancient subcontinental lithospheric mantle beneath the Kerguelen Islands, southern Indian Ocean. *Science*, 1998, 280: 418–421
- 18 Parkinson I J, Hawkesworth C J, Cohen A S. Ancient mantle in a modern arc: Osmium isotopes in Izu-Bonin-Mariana forearc peridotites. *Science*, 1998, 281: 2011–2013
- 19 Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Relict refractory mantle beneath the eastern North China block: Significance for lithosphere evolution. *Lithos*, 2001, 57: 43–66
- 20 Liu C Z, Snow J E, Hellebrand E, et al. Ancient, highly heterogeneous mantle beneath Gakkel ridge, Arctic Ocean. *Nature*, 2008, 452: 311–316
- 21 Shi R D, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Evolution of the Lüliangshan garnet peridotites in the North Qaidam UHP belt, Northern Tibetan Plateau: Constraints from Re-Os isotopes. *Lithos*, 2010, 117: 307–321
- 22 O'Reilly S Y, Zhang M, Griffin W L, et al. Ultradeep continental roots and their oceanic remnants: A solution to the geochemical “mantle reservoir” problem? *Lithos*, 2009, 112: 1043–1054
- 23 Hofmann A W. Sampling mantle heterogeneity through oceanic basalts: Isotopes and trace elements. In: Holland H D, Turekian K K, eds. *Treatise on Geochemistry*, Vol 2. New York: Elsevier, 2003. 61–101
- 24 Escrig S, Capmas F, Dupre B, et al. Osmium isotopic constraints on the nature of the DUPAL anomaly from Indian mid-ocean-ridge basalts. *Nature*, 2004, 431: 59–63
- 25 Schiano P, Birck J L, Allègre C J. Osmium-strontium-neodymium-lead isotopic covariations in mid-ocean ridge basalt glasses and the heterogeneity of the upper mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 150: 363–379
- 26 Roy-Barman M, Wasserburg G J, Papanastassiou D A, et al. Osmium isotopic compositions and Re-Os concentrations in sulfide globules from basaltic glasses. *Earth Planet Sci Lett*, 154: 331–347
- 27 Peucker-Ehrenbrink B, Hanghøj K, Atwood T, et al. Rhenium-osmium isotope systematics and platinum group element concentrations in oceanic crust. *Geology*, 2012, 40: 199–202

- 28 Suzuki K, Senda R, Shimizu K. Osmium behavior in a subduction system elucidated from chromian spinel in Bonin Island beach sands. *Geology*, 2011, 39: 999–1002
- 29 Walker R J, Nisbet E. ^{187}Os isotopic constraints on Archean mantle dynamics. *Geochim Cosmochim Acta*, 2002, 66: 3317–3325
- 30 Standish J J, Hart S R, Blusztajn J, et al. Abyssal peridotite osmium isotopic compositions from cr-spinel. *Geochem Geophys Geosyst*, 2002, 3: 1004–1027
- 31 王希斌, 鲍佩声, 邓万明, 等. 喜马拉雅山构造演化-西藏蛇绿岩(3)-矿物岩石化学. 北京: 北京出版社, 1987. 138–214
- 32 Zhou M F, Malpas J, Robinson P T, et al. The dynamothermal aureole of the Donqiao ophiolite (northern Tibet). *Can J Earth Sci*, 1997, 34: 59–65
- 33 夏斌, 徐力峰, 韦振权, 等. 西藏东巧蛇绿岩中辉长岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. *地质学报*, 2008, 82: 528–531
- 34 孙立新, 白志达, 徐德斌, 等. 西藏安多蛇绿岩中斜长花岗岩地球化学特征及锆石 U-Pb SHRIMP 年龄. *地质调查与研究*, 2011, 34: 10–15
- 35 Jaques A L. Petrology and petrogenesis of cumulate peridotites and gabbros from the marum ophiolite complex, Northern Papua New Guinea. *J Petrol*, 1981, 22: 1–40
- 36 Sláma J, Košler J, Condon D J, et al. Plešovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem Geol*, 2008, 249: 1–35
- 37 Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chem Geol*, 2002, 192: 59–79
- 38 Claesson S, Vetrin V, Bayanova T, et al. U-Pb zircon ages from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: A record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic. *Lithos*, 2000, 51: 95–108
- 39 Li J, Xu J F, Suzuki K, et al. Os, Nd and Sr isotope and trace element geochemistry of the Muli picrites: Insights into the mantle source of the Emeishan Large Igneous Province. *Lithos*, 2010, 119: 108–122
- 40 李杰, 钟立峰, 涂湘林, 等. 利用同一化学流程分析地质样品中的铂族元素含量和铼-钨同位素组成. *地球化学*, 2011, 40: 372–380
- 41 Li J, Liang X R, Xu J F, et al. Simplified technique for the measurements of Re-Os isotope by multicollector inductively coupled plasma mass spectrometry (MC-ICP-MS). *Geochem J*, 2010, 44: 73–80
- 42 郝艳丽, 黄启帅, 张晓冉, 等. 云南大理苦橄岩的 Re-Os 同位素特征: 对峨眉山大火成岩省成因的制约. *岩石学报*, 2011, 10: 2937–2946
- 43 Birck J L, Barman M R, Capmas F. Re-Os isotopic measurements at the femtomole level in natural samples. *Geostand News*, 1997, 21: 19–27
- 44 Creaser R A, Papanastassiou D A, Wasserburg G J. Negative thermal ion mass spectrometry of osmium, rhenium and iridium. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55: 397–401
- 45 Völkening J, Walczyk T, G. Heumann K. Osmium isotope ratio determinations by negative thermal ionization mass spectrometry. *Int J Mass Spectrom*, 1991, 105: 147–159
- 46 Harvey J, Gannoun A, Burton K W, et al. Ancient melt extraction from the oceanic upper mantle revealed by Re-Os isotopes in abyssal peridotites from the Mid-Atlantic ridge. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 244: 606–621
- 47 Shi R D, Alard O, Zhi X C, et al. Multiple events in the Neo-Tethyan oceanic upper mantle: Evidence from Ru-Os-Ir alloys in the Luobusa and Dongqiao ophiolitic podiform chromitites, Tibet. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 261: 33–48
- 48 Zheng J P, Yu C M, Lu F X, et al. Age and composition of peridotites: Implications for the lithospheric thinning accompanying with mantle replacement beneath the Eastern North China Craton. *Earth Sci Front*, 2007, 14: 87–97
- 49 Xu X S, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Re-Os isotopes of sulfides in mantle xenoliths from eastern China: Progressive modification of lithospheric mantle. *Lithos*, 2008, 102: 43–64
- 50 Griffin W L, Spetsium Z V, Pearson N J, et al. *In situ* Re-Os analysis of sulfide inclusions in kimberlitic olivine: New constraints on depletion events in the Siberian lithospheric mantle. *Geochem Geophys Geosyst*, 2002, 3: 1069–1093
- 51 O'Hara M J. The bearing of phase equilibria studies in synthetic and natural systems on the origin and evolution of basic and ultrabasic rocks. *Earth-Sci Rev*, 1968, 4: 69–133
- 52 Bottinga Y, Allegre C J. Thermal aspects of sea-floor spreading and the nature of the oceanic crust. *Tectonophysics*, 1973, 18: 1–17
- 53 Bottinga Y, Allegre C J, Thompson R N. Partial melting under spreading ridges [and discussion]. *Philos Trans R Soc London Ser A*, 1978, 288: 501–525
- 54 Walker D, Shibata T, DeLong S. Abyssal tholeiites from the Oceanographer Fracture Zone. *Contrib Mineral Petrol*, 1979, 70: 111–125
- 55 Niu Y L, Batiza R. An empirical method for calculating melt compositions produced beneath mid-Ocean Ridges: Application for axis and off-axis (Seamounts) melting. *J Geophys Res*, 1991, 96: 21753–21777
- 56 Niu Y L. Mantle melting and melt extraction processes beneath ocean ridges: Evidence from abyssal peridotites. *J Petrol*, 1997, 38: 1047–1074

- 57 Niu Y L, Batiza R. Chemical Variation trends at fast and slow spreading mid-Ocean Ridges. *J Geophys Res*, 1993, 98: 7887–7902
- 58 Niu Y L, Hekinian R. Spreading-rate dependence of the extent of mantle melting beneath ocean ridges. *Nature*, 1997, 385: 326–329
- 59 Baker M B, Stolper E M. Determining the composition of high-pressure mantle melts using diamond aggregates. *Geochim Cosmochim Acta*, 1994, 58: 2811–2827
- 60 Obata M, Nagahara N. Layering of Alpine-type peridotite and the segregation of partial melt in the upper mantle. *J Geophys Res*, 1987, 92: 3467–3474
- 61 Elthon D, Stewart M, Ross D K. Compositional trends of minerals in oceanic cumulates. *J Geophys Res*, 1992, 97: 15189–15199
- 62 Kelemen P B, Dick H J B, Quick J E. Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle. *Nature*, 1992, 358: 635–641
- 63 der Wal D V, Bodinier J L. Origin of the recrystallisation front in the Ronda peridotite by km-scale pervasive porous melt flow. *Contrib Mineral Petrol*, 1996, 122: 387–405
- 64 Huber C, Bachmann O, Manga M. Homogenization processes in silicic magma chambers by stirring and mushification (latent heat buffering). *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 283: 38–47
- 65 Leshner C E. Decoupling of chemical and isotopic exchange during magma mixing. *Nature*, 1990, 344: 235–237
- 66 Sobolev A V, Hofmann A W, Sobolev S V, et al. An olivine-free mantle source of Hawaiian shield basalts. *Nature*, 2005, 434: 590–597
- 67 Sobolev A V, Hofmann A W, Kuzmin D V, et al. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts. *Science*, 2007, 316: 412–417
- 68 Birck J L, Allègre C J. Contrasting Re/Os magmatic fractionation in planetary basalts. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 124: 139–148
- 69 Burton K W, Bourdon B, Birck J L, et al. Osmium isotope variations in the oceans recorded by Fe-Mn crusts. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 171: 185–197
- 70 Burton K W, Gannoun A, Birck J L, et al. The compatibility of rhenium and osmium in natural olivine and their behaviour during mantle melting and basalt genesis. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198: 63–76
- 71 Harvey J, Dale C W, Gannoun A, et al. Osmium mass balance in peridotite and the effects of mantle-derived sulphides on basalt petrogenesis. *Geochim Cosmochim Acta*, 2011, 75: 5574–5596
- 72 Widom E, Kepezhinskas P, Defant M. The nature of metasomatism in the sub-arc mantle wedge: Evidence from Re-Os isotopes in Kamchatka peridotite xenoliths. *Chem Geol*, 2003, 196: 283–306
- 73 Alves S, Schiano P, Capmas F, et al. Osmium isotope binary mixing arrays in arc volcanism. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198: 355–369
- 74 Sun W D, Bennett V C, Kamenetsky V S. The mechanism of Re enrichment in arc magmas: Evidence from Lau Basin basaltic glasses and primitive melt inclusions. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 222: 101–114
- 75 Alard O, Griffin W L, Pearson N J, et al. New insights into the Re-Os systematics of sub-continental lithospheric mantle from *in situ* analysis of sulphides. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 203: 651–663
- 76 Sun W D, Zhi X C, Peng Z C, et al. Os isotopic composition of the earth's primitive upper mantle. *Chin Sci Bull*, 1998, 43: 1575–1579
- 77 Morgan J W, Walker R J, Brandon A D, et al. Siderophile elements in Earth's upper mantle and lunar breccias: Data synthesis suggests manifestations of the same late influx. *Meteorit Planet Sci*, 2001, 36: 1257–1275
- 78 Meisel T, Walker R J, Irving A J, et al. Osmium isotopic compositions of mantle xenoliths: A global perspective. *Geochim Cosmochim Acta*, 2001, 65: 1311–1323
- 79 Meisel T, Walker R J, Morgan J W. The osmium isotopic composition of the Earth's primitive upper mantle. *Nature*, 1996, 383: 517–520
- 80 Xu J F, Castillo P R. Geochemical and Nd-Pb isotopic characteristics of the Tethyan asthenosphere: Implications for the origin of the Indian Ocean mantle domain. *Tectonophysics*, 2004, 393: 9–27
- 81 Mo X X, Niu Y L, Dong G C, et al. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong volcanic Succession in southern Tibet. *Chem Geol*, 2008, 250: 49–67
- 82 Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau. *Science*, 2001, 294: 1671–1677
- 83 Zhao W J, Kumar P, Mechie J, et al. Tibetan plate overriding the Asian plate in central and northern Tibet. *Nature Geosci*, 2011, 4: 870–873
- 84 Guynn J, Kapp P, Gehrels G E, et al. U-Pb geochronology of basement rocks in central Tibet and paleogeographic implications. *J Asian Earth Sci*, 2012, 43: 23–50
- 85 Zheng Y F. Metamorphic chemical geodynamics in continental subduction zones. *Chem Geol*, 2012, doi: 10.1016/j.chemgeo.2012.02.005
- 86 Taylor B, Martinez F. Back-arc basin basalt systematics. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 210: 481–497