

# 内蒙古温都尔庙地区蛇纹石化橄榄岩 地球化学特征及其地质意义

梅盛旺<sup>1,2,3</sup>, 汪玉梅<sup>4</sup>, 杜显锋<sup>1,5</sup>, 迟洪兴<sup>1</sup>, 郭谱<sup>1</sup>, 张明峰<sup>6</sup>, 王先彬<sup>6</sup>, 卓胜广<sup>1\*</sup>

1. 东北大学秦皇岛分校 资源与材料学院, 河北 秦皇岛 066000; 2. 中国科学院 广州地球化学研究所  
同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 大庆油田有限责任公司  
井下作业分公司, 黑龙江 大庆 163453; 5. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 6. 甘肃省油气资源研究重点实验室  
中国科学院油气资源研究重点实验室, 兰州 730000

**摘要:** 为探讨内蒙古温都尔庙地区蛇纹石化橄榄岩的成因意义, 采用 X 荧光光谱法和电感耦合等离子体质谱法对具代表性蛇纹石化橄榄岩进行了全岩的主量、微量和稀土元素分析。结果显示, MgO 含量高于原始地幔, 易熔组分 CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub> 等亏损且与 MgO 呈负相关关系, 表明研究区地幔橄榄岩是一套亏损的原始地幔熔融残留体; 稀土元素和微量元素配分型式表现出 LREE 轻微富集, 部分 LILE(如 Rb) 明显亏损, 另有一些 HFSE(U、Pb、Hf 等) 强烈富集, 暗示可能既与地幔源区相关也与俯冲消减带流体交代或蛇纹石化作用有关。本区地幔橄榄岩源于尖晶石相地幔源区, 根据 Melcher 建立的部分熔融模型, 判断出岩石部分熔融程度为 5%~20%, 接近深海地幔橄榄岩(10%~22%)。上述这些特征暗示地幔橄榄岩可能经历了洋中脊型(MOR)和俯冲带型(SSZ)两个阶段的构造演化。

**关键词:** 蛇纹石化; 地幔橄榄岩; 蛇绿岩; 温都尔庙

中图分类号: P588.12<sup>+</sup>5 文章编号: 1007-2802(2016)02-0212-10 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.02.002

## Geochemical Characteristics of the Serpentinized Peridotite in the Wenduermiao Area, Inner Mongolia, China and Their Geological Significance

MEI Sheng-wang<sup>1,2,3</sup>, WANG Yu-mei<sup>4</sup>, DU Xian-feng<sup>1,5</sup>, CHI Hong-xing<sup>1</sup>, GUO Pu<sup>1</sup>,  
ZHANG Ming-feng<sup>6</sup>, WANG Xian-bin<sup>6</sup>, ZHUO Sheng-guang<sup>1\*</sup>

1. The School of Resource and Material, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066000, China; 2. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China; 4. Daqing Oilfield Downhole Operation Company, Daqing, Daqing 163453, China; 5. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 6. Key Laboratory of Petroleum Resources, Gansu Province/Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

**Abstract:** In order to discuss genetic significance of the serpentinized peridotite in the Wenduermiao area, Inner Mongolia, China, many representative serpentinized peridotite samples have been selected to analyze their major, trace, and REE elements by using XRF and ICP-MS methods. Results show that serpentinized peridotites have higher MgO but lower CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> contents than those of the primitive mantle, with negative correlations between their MgO contents and respective CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> contents. This implies that the peridotite in the Wenduermiao area could be the residue of partial melting of the depleted primary mantle. Their REE and trace elements distribution patterns show that LREE are slightly enriched, some LILE(Rb) are obviously depleted, while some HFSE(U, Pb, Hf) are strongly enriched. These features imply that they could be related not only to the mantle source, but also to the metasomatism of the subduction zone fluid or the serpentinization of the peridotite. Additionally, the mantle peridotite was derived from the partial melting of a spinel phase mantle. Based on the partial melting model established by Melcher, it is suggested that the Wenduermiao peridotite was originated by partial melting of 5%~20% of the spinel phase mantle, similar to those of the abyssal sea mantle peridotite. All above features imply that the peridotite of the Wenduermiao ophiolite could be formed in a MOR setting and then modified by fluids in a SSZ setting.

**Key words:** serpentinization; mantle peridotite; ophiolite; wenduermiao

收稿日期: 2015-12-16 收到, 2016-01-15 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272146, 41103022, 41172133)

第一作者简介: 梅盛旺(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: msw91103@163.com.

\* 通讯作者简介: 卓胜广(1959-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 石油与天然气地质学. E-mail: sgzhuo@sina.com.

对超基性岩的蛇纹石化作用的研究始于 20 世纪 70 年代对于蛇绿岩的研究(齐进英和江绍英, 1982)。研究发现,蛇绿岩底部的超基性岩部分总是发生较强的蛇纹石化作用,两者具有密切的关系,首先蛇纹石化橄榄岩或蛇纹岩是蛇绿岩的一部分,蛇绿岩的演化发展决定了蛇纹石化过程的环境和条件,其次通过对橄榄岩的蛇纹石化研究,可以反推蛇绿岩的形成及演化信息,在对蛇绿岩中蛇纹石化作用进行研究时必须将考虑到蛇绿岩的形成环境和背景。蛇绿岩是壳-幔系统层圈相互作用的产物,其底部的超镁铁质杂岩,由不同比例的方辉/二辉橄榄岩和纯橄岩组成,这些岩石都发生了不同程度的蚀变,形成了蛇纹石化橄榄岩或者是蛇纹岩(张旗和周国庆, 2001)。

蛇绿岩是一类有重要意义的岩石组合,作为古大洋岩石圈或与古洋亲缘的构造单元的残留体保存在各地质时期的造山带中,成为重建古洋和恢复古板块构造格局的最直接证据(张旗和周国庆, 2001; 路凤香和桑隆康, 2002)。蛇绿岩来源于古大洋的岩石圈,代表了洋壳和洋下地幔岩石,其底部的变质橄榄岩是出露在地球表面的最大的地幔岩样品,对于深入研究洋壳或地幔物质的成分和演化具有很大的价值(张旗和周国庆, 2001; Bezard *et al.*, 2011)。

温都尔庙地区的蛇绿岩属于古亚洲洋蛇绿岩带的一支,形成于早古生代时期,是古蒙古洋向华

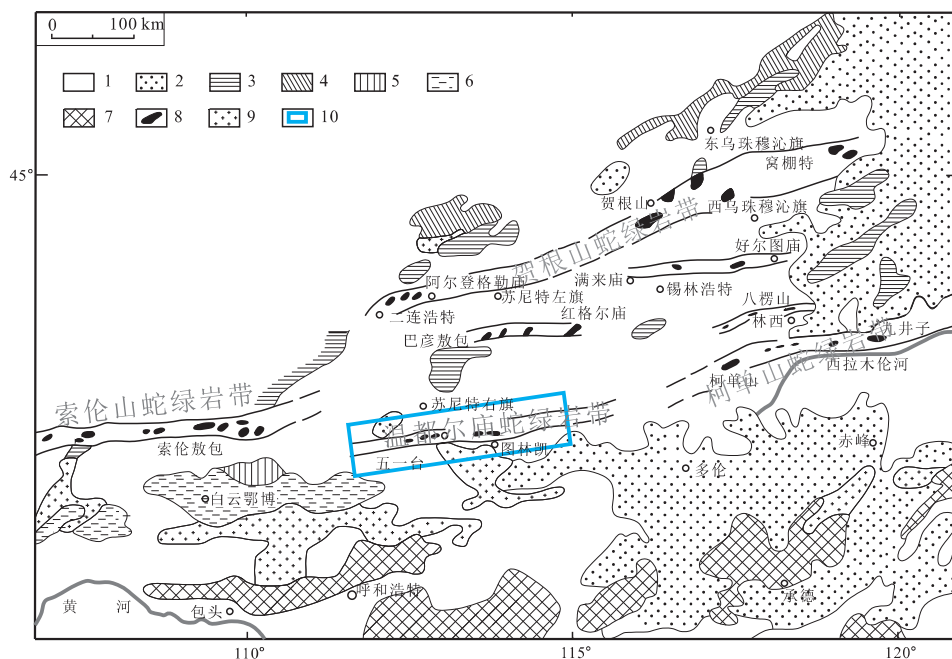
北板块俯冲的残留体,其底部的蛇纹石化橄榄岩对于揭示古蒙古洋之下的地幔部分的演化具有重要的意义(姚玉鹏等, 1997)。蛇纹石化橄榄岩是蛇绿岩底部出露的地幔岩样品,对研究洋壳或地幔物质的成分和演化具有重要意义。本文以蛇纹石化橄榄岩为研究对象,分析其岩石学和地球化学特征,探讨蛇纹石化橄榄岩的成因意义。

### 1 地质背景

内蒙古中段发育有 4 条蛇绿岩带,索伦山蛇绿岩带和贺根山蛇绿岩带位于西伯利亚板块南侧,统称为索伦山-贺根山蛇绿岩带,区域上称北带;温都尔庙蛇绿岩带和柯单山蛇绿岩带沿中朝古板块北侧分布,统称为温都尔庙-柯单山蛇绿岩带,区域上称南带(图 1)(王荃等, 1991; 梁日暄, 1994)。

研究区内蒙古温都尔庙地区,大地构造位于兴安造山系,大兴安岭弧盆系锡林浩特岩浆弧和包尔汉图-温都尔庙弧盆系。成矿带位于阿巴嘎-霍林河成矿带温都尔庙-红格尔庙铁成矿亚带。大地构造位置属华北板块北缘增生带加里东期俯冲增生杂岩带。

区内出露的地层有中新元古界温都尔庙群、下古生界白乃庙组、上志留统西别河组、上石炭统阿木山组、上侏罗统大青山组。温都尔庙群为一套变质的海相火山-沉积岩系,组成一个洋壳层,构成较为典型的蛇绿岩套,温都尔庙铁矿就赋存在其上



1-第四系; 2-侏罗系; 3-石炭-二叠系; 4-泥盆系; 5-寒武-志留系; 6-中元古界; 7-太古界; 8-蛇绿岩带; 9-花岗岩; 10-研究区

图 1 内蒙古中段蛇绿岩分布简图(据王荃等, 1991; 梁日暄, 1994 修改)

Fig.1 Distribution of ophiolites in the central part of Inner Mongolia(modified after Wang Quan *et al.*, 1991; Liang Rixuan, 1994)

部;白乃庙组主要分布在白乃庙及谷那乌苏一带,为一套浅-中变质的绿片岩,其原岩为一套海底喷发的基性-酸性火山熔岩、凝灰岩夹少量正常沉积的碎屑岩、碳酸盐。为浅海沉积建造,有岛弧岩系特征,产有与火山沉积变质-热液活动有关的白乃庙式铜矿。

温都尔庙地区出露的岩石组合为蛇纹石化橄榄岩、蛇纹石化辉石橄榄岩、角闪石岩、斜长岩、玄武岩、硅质岩。蛇绿岩套中构造变形作用显著,普遍发育有构造糜棱岩带,不仅在构造结合部,在其两侧的褶皱带内蛇绿岩(含蛇纹石化岩石)、韧性剪切带也很发育。

## 2 蛇纹石化橄榄岩岩石学

温都尔庙蛇绿岩中的地幔橄榄岩有强烈的次生蚀变,以蛇纹石化作用为主,另有部分碳酸盐化、滑石化,橄榄石被完全蚀变无残留。强蛇纹石化地幔橄榄岩(蛇纹岩)是温都尔庙蛇绿岩中最为重要的岩石类型,其出露范围较广,具有明显的碎裂化特点。岩石整体呈橄榄绿、墨绿色,滑感明显,具有微弱磁性,显微鳞片变晶结构、交代假象结构,弱片状-块状构造。蛇纹石化橄榄岩的主要组成矿物为蛇纹石、碳酸盐矿物、滑石、磁铁矿以及极少量铬铁矿。根据次生矿物组合变化可将研究区蚀变橄榄

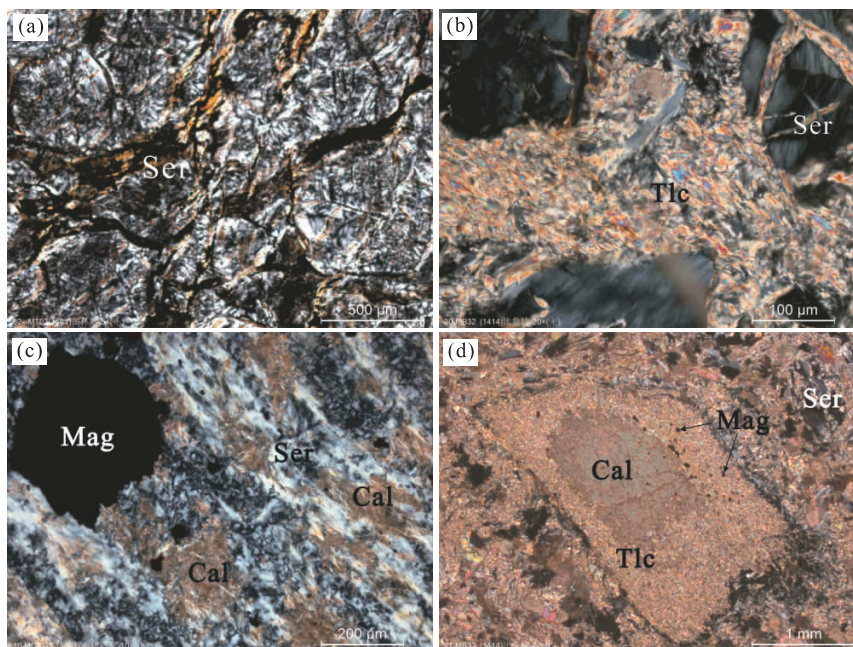
岩细分为全蛇纹石化超镁铁岩、磁铁矿全蛇纹石化超镁铁岩、碳酸盐化全蛇纹石化超镁铁岩、弱碳酸盐化蛇纹石化强滑石化超镁铁岩等4种岩石类型。

(1) 蛇纹石完全交代橄榄石,无原矿物残留,部分岩石中保留粒状橄榄石假象及裂理(图2a),蛇纹石含量75%~97%,大小多为0.01~0.3 mm,以毛毡状利蛇纹石、叶片状叶蛇纹石为主,次为纤维状纤蛇纹石集合体,干涉色为一级灰白至一级黄,平行消光,无明显定向性,均匀分布于岩石中。

(2) 碳酸盐矿物(图2c、2d),主要为方解石和白云石,它们主要是由橄榄石发生碳酸盐化而形成,含量为2%~22%,呈云朵状、港湾状或不规则状,大小多为0.1~2 mm,分布于蛇纹石间隙中,具两组解理,高级白干涉色。

(3) 滑石,是利蛇纹石与富含 $\text{SiO}_2$ 流体反应的结果(汪小妹等,2009)或者和橄榄岩中斜方辉石的蚀变有关(Mével,2003;汪小妹等,2010;余星等,2011),呈鳞片状集合体(图2b),少数依橄榄石假象,在部分样本中含量达50%,主要有2种赋存状态:分布于蛇纹石内部呈镶嵌状和从边缘和内部交代斜方辉石呈原矿物假象(图2d)。滑石与斜方辉石的蚀变相关,此外蛇纹石也可以与富硅流体继续反应生成滑石。

(4) 磁铁矿是橄榄石在发生蛇纹石化过程中析



(a) 橄榄石被蛇纹石交代呈半自形柱粒状假象,保留外形和裂理;(b) 显微鳞片状滑石和蛇纹石交代,橄榄石呈交代假象无残留,部分保留0.5~1.5 mm 自形半自形柱粒状橄榄石晶体外形;(c) 铁镁质矿物全部被显微鳞片状蛇纹石伴少量碳酸盐矿物交代,析出粒状磁铁矿;(d) 柱状铁镁矿物核部被碳酸盐交代,边部被滑石交代,析出少量微粒状磁铁矿,并大致保留了柱状轮廓;Ser-蛇纹石;Tlc-滑石;Cal-方解石;Mag-磁铁矿

图2 蚀变橄榄岩显微镜下特征(正交偏光)

Fig.2 Microphotos showing characteristics of altered peridotites (cross-polarized light)

出的,黑色不透明,半自形-他形,含量 2%~5%,部分磁铁矿在原橄榄石边缘或内部析出而保留其轮廓,呈细粒状、更小者呈微粒状(图 2c)或沿裂隙析出呈条带状。

(5)角闪石也常在蛇纹石化过程中出现但较少。其中最常出现是呈针状的透闪石,是辉石的蚀变产物,颗粒大者  $2.5 \times 0.5 \text{ mm}$ ,小者  $0.2 \times 0.05 \text{ mm}$ 。

值得注意的是,上述这些反应矿物与原矿物之间都存在着一些交代假象、原矿物残留等痕迹,从岩相学角度,不难发现原岩中至少存在两到三种主要矿物:橄榄石和斜方辉石,以及可能存在少量的单斜辉石。

### 3 地球化学特征

11 件样品(其中 6 件为钻孔样品)采自温都尔庙蛇绿岩带的西段车根达来(10 件)( $N 41^{\circ}50'12.53''$ , $E 110^{\circ}52'35.5''$ )和达西(1 件)( $N 41^{\circ}49'27.37''$ , $E 110^{\circ}51'24.66''$ )(图 1),为蛇纹石化橄榄岩。通过手标本和偏光显微镜观察鉴定,选取出新鲜的、无脉体、无裂隙、风化作用相对较弱的样品进行地球化学分析,包括主量、微量和稀土元素。样品在廊坊市中铁物探勘察有限公司进行测试,主量元素采用 X 荧光光谱法(XRF)进行熔片法测定,具体流程详见李献华等(2002);微量、稀土元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)进行测试,精度优于 10%,具体流程详见刘晔等(2007)。测试数据见表 1。

#### 3.1 主量元素

由于研究区地幔橄榄岩遭受了强烈的蚀变,为尽量避免后期蚀变作用对原岩成分分析造成过大的影响,将扣除样品的烧失量后再对主量元素进行重新归一化处理(徐向珍等 2011)。对样品的主量元素(表 1)进行相关参数计算、投图、比较分析,得出温都尔庙蛇纹石化地幔橄榄岩具有以下 4 点特征:

(1)温都尔庙地幔橄榄岩样品中烧失量高达 10.97%~15.64%,平均值为 12.62%,说明蛇纹石化地幔橄榄岩遭受了高度的水化过程(Khalil *et al.*, 2014)。在  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{CaO}$ - $\text{MgO}$  三角图中,岩石样品点全部落在变质橄榄岩区域内(图 3a)。这与手标本和显微镜下观察到的结果一致,温都尔庙橄榄岩发生了强烈的蛇纹石化,多已形成蛇纹岩。

(2)变质橄榄岩亏损易熔组分  $\text{SiO}_2$ (38.95%~41.70%)、 $\text{CaO}$ (2.47%~3.70%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (1.23%~

4.42%)、 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ( $< 0.06\%$ )、 $\text{TiO}_2$ (0.003%~0.04%),明显低于原始地幔组分(McDonough and Sun, 1995)。而  $\text{MgO}$ (37.65%~43.13%)平均为 40.88%高于原始地幔组分,说明源岩可能存在一定程度的亏损(徐向珍等 2011)。

(3)在  $\text{MgO}$  与氧化物变异图解中(图 4), $\text{MgO}$  与多数氧化物存在一定的相关性,表现为随着  $\text{MgO}$  增大, $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  等易熔组分降低,反映出岩石部分熔融的程度或地幔亏损程度增大(Coleman, 1977; Nicolas and Prinzhofer, 1983; 路凤香, 1988; Hartmann and Wedepohl, 1993; 邱瑞照等 2005)。

(4)根据 CIPW 标准矿物计算,橄榄石质量分数为 50.1%~66.8%,单斜辉石质量分数为 0.9%~10.3%,斜方辉石质量分数为 6.7%~22.1%。这与镜下观察一致,造岩矿物以橄榄石和斜方辉石为主。在超镁铁岩石分类三角图中部分落在方辉橄榄岩区,或靠近方辉橄榄岩区。在  $\text{Mg}/\text{Fe}$ - $(\text{Mg} + \text{Fe})/\text{Si}$  关系图中,岩石样品点全部落在 II 区(镁质区)和 III 区(镁铁质区),说明岩石为镁质-铁镁质岩石系列(图 3b)。

#### 3.2 稀土元素

温都尔庙变质橄榄岩虽发生了以蛇纹石化为主的蚀变作用,但蚀变程度不会影响分布特征,即稀土元素分布特征基本上可以反映蛇纹石化作用之前的变质橄榄岩性状(Loubet *et al.*, 1975; Frey, 1984; Gruau *et al.*, 1992; Peltonen *et al.*, 1996; 王希斌等, 1996; 邱瑞照等 2005; 卢俊生等 2009)。橄榄岩的稀土元素组成(表 1),除样品 MC-28 的  $\Sigma \text{REE}$  为  $5.84 \times 10^{-6}$ ,高于球粒陨石外,其他样品的  $\Sigma \text{REE}$  介于  $0.51 \times 10^{-6}$ ~ $2.86 \times 10^{-6}$ ,均小于或接近球粒陨石,指示了地幔橄榄岩经历了不同程度的部分熔融作用(Sun and Mc Donough, 1989)。样品的 REE 丰度较低,其 LREE 为 0.39~4.97,多为球粒陨石的 0.2~0.99 倍;HREE 为 0.12~0.88,多为球粒陨石的 0.13~0.58 倍;LREE/HREE = 2.10~9.56,Sm/Nd 为 0.18~0.29,  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  为 2.00~5.55,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  为 1.24~4.01,反映了 LREE 的分馏程度,为 LREE 轻微富集(陈德潜和陈刚,1990)。 $\delta \text{Eu}$  分为 3 组:1.91~3.18、0.95~1.05 和 0.48~0.75,分别代表铈的正异常、无异常和负异常,铈的正异常表明岩石是幔源的,而铈负异常与斜长石的熔融作用或后期蚀变作用的叠加有关(陈德潜和陈刚,1990; 邱瑞照等 2005)。它们可能分别代表了原岩-微弱蚀变-严重蚀变,即蚀变的不同阶段。

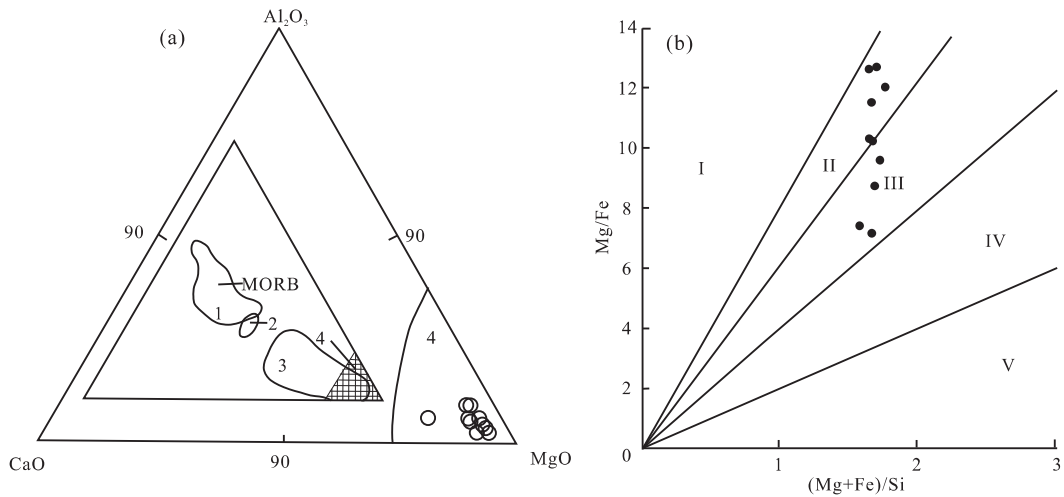
从总体看,温都尔庙蛇纹石化橄榄岩稀土元素



表1 温都尔庙蛇纹岩蛇纹石化橄榄岩主量元素(%)、微量以及稀土元素( $\times 10^{-6}$ )组成Table 1 Contents of major elements(%), trace elements and REE ( $\times 10^{-6}$ ) of the Wenduermiao serpentinized peridotites

样品	MC-21-1	MC-21-2	MC-22	MC-27	MC-28	MC-29	MC-30	MC-31	MC-32	NDX-18
SiO <sub>2</sub>	39.59	40.08	41.15	38.95	41.50	39.64	41.18	41.09	41.09	41.70
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.00	0.01	0.02	0.04	0.03	0.00	0.03	0.01	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.84	1.29	2.31	4.16	2.37	4.43	1.23	2.95	1.66	1.84
CaO	2.68	3.69	2.65	3.07	3.38	2.71	2.47	3.70	2.64	2.50
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.31	9.08	8.37	11.39	9.22	9.41	12.09	7.34	10.21	10.35
FeO	3.13	2.41	2.36	4.44	5.19	4.00	1.13	3.90	2.77	1.36
MgO	41.13	43.13	42.92	37.65	38.10	39.66	41.78	40.82	41.51	42.11
K <sub>2</sub> O	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06
Na <sub>2</sub> O	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06	<0.06
MnO	0.13	0.10	0.07	0.23	0.13	0.07	0.06	0.10	0.10	0.05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.17	0.23	0.17	0.09	0.08	0.05	0.06	0.08	0.02	0.07
LOI(扣除)	11.75	13.21	12.19	10.97	12.59	12.40	12.49	13.54	11.95	12.06
Mg <sup>#</sup>	0.86	0.88	0.87	0.82	0.85	0.84	0.86	0.87	0.86	0.88
La	0.10	0.11	0.16	0.17	1.10	0.33	0.63	0.36	0.15	0.10
Ce	0.17	0.17	0.36	0.26	2.32	0.56	1.18	0.70	0.26	0.21
Pr	0.02	0.02	0.05	0.03	0.27	0.07	0.14	0.09	0.03	0.02
Nd	0.08	0.08	0.17	0.08	1.04	0.26	0.52	0.35	0.11	0.11
Sm	0.02	0.02	0.04	0.02	0.18	0.08	0.11	0.09	0.02	0.03
Eu	0.01	0.02	0.01	0.02	0.06	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01
Gd	0.02	0.02	0.03	0.02	0.18	0.05	0.09	0.07	0.03	0.02
Tb	0.004	0.004	0.01	0.004	0.03	0.01	0.01	0.01	0.004	0.01
Dy	0.02	0.04	0.06	0.04	0.22	0.08	0.06	0.11	0.05	0.05
Ho	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01
Er	0.02	0.04	0.05	0.04	0.14	0.07	0.04	0.10	0.04	0.04
Tm	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
Yb	0.04	0.07	0.07	0.08	0.20	0.13	0.05	0.17	0.06	0.05
Lu	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.01	0.04	0.02	0.01
Y	0.17	0.34	0.41	0.30	1.30	0.50	0.27	0.68	0.32	0.35
ΣREE	0.51	0.63	1.04	0.79	5.84	1.72	2.86	2.14	0.80	0.70
LREE/HREE	3.13	2.10	3.03	2.73	5.67	3.27	9.56	2.93	2.66	2.41
Sm/Nd	0.22	0.28	0.25	0.25	0.18	0.29	0.21	0.24	0.19	0.29
(La/Sm) <sub>N</sub>	3.72	3.50	2.52	5.55	3.86	2.87	3.68	2.75	4.58	2.00
(La/Yb) <sub>N</sub>	1.90	1.24	1.70	1.52	4.01	1.82	9.99	1.52	1.70	1.41
δEu	1.91	3.18	0.95	2.94	1.05	0.61	0.48	0.75	2.11	0.95
Li	0.84	2.11	1.88	1.38	0.52	1.06	9.88	0.96	2.04	3.83
Sc	15.00	7.42	13.40	14.43	7.79	12.56	11.03	13.57	7.93	8.53
V	78.84	42.73	64.06	48.13	90.03	68.09	61.76	51.66	58.71	56.82
Cr	3552	2194	2787	2192	1843	1480	2181	1351	3572	2026
Co	63.43	77.98	93.99	55.34	85.83	67.15	80.14	64.70	99.84	78.22
Ni	1166	1751	1715	1281	1575	1462	1884	1499	1810	1369
Rb	0.16	0.12	0.13	0.15	0.30	0.26	0.09	0.13	0.12	0.09
Sr	6.69	11.47	10.13	29.02	8.59	21.90	10.24	28.47	4.64	5.52
Zr	1.13	1.00	1.81	1.76	2.52	4.34	0.51	2.16	4.27	2.50
Nb	0.20	0.14	0.19	0.58	0.27	0.49	0.08	0.48	0.26	0.21
Cs	0.04	0.02	0.03	0.03	0.51	0.04	0.04	0.03	0.01	0.10
Ba	4.96	4.30	5.44	5.20	4.19	6.53	4.54	8.84	4.23	4.76
Hf	0.04	0.08	0.06	0.06	0.08	0.16	0.03	0.14	0.15	0.08
Ta	0.05	0.02	0.02	0.06	0.03	0.04	0.01	0.04	0.04	0.03
Pb	2.71	1.65	2.62	1.09	0.86	1.56	0.78	1.09	1.60	0.57
Th	0.04	0.04	0.05	0.47	0.06	0.42	0.03	0.33	0.06	0.03
U	0.04	0.03	0.08	0.32	0.19	0.36	0.90	0.43	0.08	0.37

注: Mg<sup>#</sup> = MgO/(MgO+TFeO) (摩尔数); 原始球粒标准值引自 Sun and McDonough(1989)。



(a) 其中1-堆积镁铁岩区 2-科马提岩区 3-堆积超镁铁岩区 4-变质橄榄岩区(底图引自 Coleman R G ,1997 和卢俊生等 2009) ;  
 (b) I -超镁质区 ,II -镁质区 ,III -镁铁质区 ,IV -铁镁质区 ,V -铁质区(底图引自邱家骧和林景仟 ,1991 和张雯华等 ,1976)  
 图3 温都尔庙地区蚀变橄榄岩  $Al_2O_3$ -CaO-MgO 三角图 (a) 和  $Mg/Fe$ -( $Mg+Fe$ )/Si 关系图 (b)

Fig.3  $Al_2O_3$ -CaO-MgO (a) and  $Mg/Fe$ -( $Mg+Fe$ )/Si (b) diagrams of the altered peridotite in the Wenduermiao area

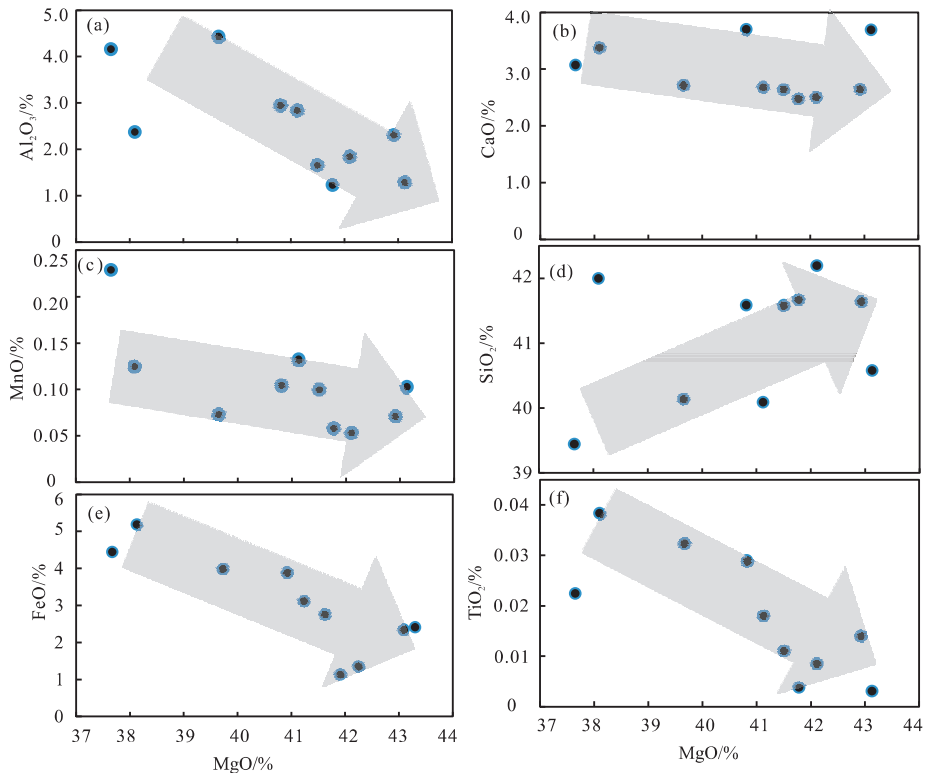


图4 温都尔庙地区蛇纹石化橄榄岩氧化物- $Mg^\#$ 值变异图解

Fig.4 Variation diagrams of oxides vs.  $Mg^\#$  values of serpentized peridotites in Wenduermiao area

模式与徐向珍等(2011)研究的雅鲁藏布江普兰岩体中的地幔橄榄岩稀土元素模式相似。本次研究的蛇纹石化橄榄岩稀土元素配分型式呈幅度较缓的“U”或“V”型(王希斌,1996),轻稀土相对富集而重稀土则略显亏损,中稀土元素亏损强烈,在配分型式中表现为下凹(图5a),且样品的  $MgO$  含量较高,可能是岩体先经历了较强的部分熔融过程

后,流体在板块发生俯冲消减时进行交代所致。

### 3.3 微量元素

样品的微量元素与原始地幔相比,大离子亲石元素,如 Cs(0.013~0.51)等相对较低,而 Rb(0.09~0.30)、Sr(4.61~29.0)、Ba(4.23~8.84)等则相对较高;高场强元素,如 Y(0.17~0.30)、Zr(0.51~4.34)、U(0.027~0.90)、Th(0.03~0.6)及相关元

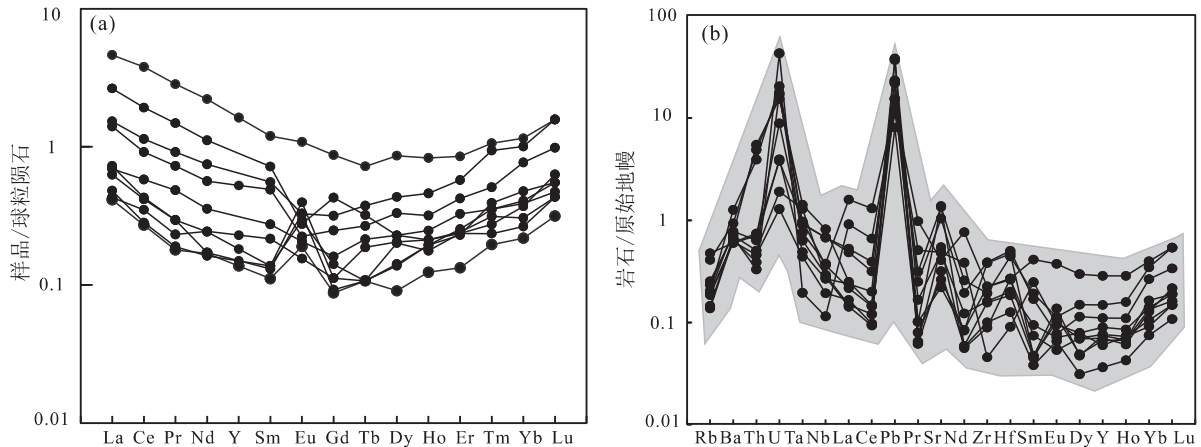


图5 稀土元素球粒陨石标准化分布型式图(a)与微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)  
(球粒陨石和原始地幔值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) of the Wenduermiao serpentinized peridotites (chondrite and primitive mantle values are after Sun and McDonough, 1989)

素的蜕变产物 Pb (0.57 ~ 2.71) 等相对较高, Nb (0.08 ~ 0.58)、Ta (0.01 ~ 0.06)、Hf (0.03 ~ 0.16) 等明显偏低; 部分亲石元素如 Cr (1480 ~ 3572)、Co (55.34 ~ 99.84)、Ni (1166 ~ 1884)、V (42.73 ~ 90.03) 等含量相对较高。在原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 5b) 流体活动性较强的元素存在一定范围内的变化, 这与中低温流体交代作用有关。

由于所研究区橄榄岩蛇纹石化强烈, 部分微量元素 (Rb、Sr、Ba、U 等) 含量容易发生变化(杨经绥等, 2008) 而具有半径小、离子电荷高等特点的高场强元素 (Zr、Y 等) 受到低温改造影响小、在流体中活动性低(连东洋等 2014) 因此, 现重点对 V、Cr、Co、Ni、Zr 和 Y 等含量相对较高且受蚀变影响较小的元素进行讨论。在这些微量元素与 MgO 的变异图解中(图 6) Y 与 MgO 呈负相关关系, Cr、Co、Ni 与 MgO 呈正相关关系, 这与岩石中的橄榄石和尖晶石含量相关; Zr、Y 与 MgO 的相关关系不明显而集中于一定范围内, 说明经部分熔融后残余地幔岩石的不相容元素变化程小; 另外由于 Y 属于弱不相容元素, 应保留在部分熔融后的残余地幔物质中, 但其含量却非常低, 说明地幔源区是亏损 Y 的(卢俊生等 2009)。蚀变橄榄岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5b) 反映出 Rb 等大离子亲石元素 (LILE) 明显亏损, 而 Ba、Sr 明显富集; U、Pb、Hf 等高场强元素 (HFSE) 表现出明显富集, Rb、Sr、U 等出现异常可能与流体交代作用相关(徐向珍等 2011)。

## 4 讨论

### 4.1 岩石学成因

从岩石学意义上看, 地幔橄榄岩中 MgO 的含量

常被作为判别岩石亏损程度或部分熔融程度的重要指标(Frey, 1984; 徐向珍等, 2011)。温都尔庙蛇纹石化橄榄岩中 MgO 含量高于原始地幔, 易熔组分 SiO<sub>2</sub>、CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O、TiO<sub>2</sub> 等亏损且与 MgO 呈负相关, 表明研究区地幔橄榄岩是亏损的残留原始地幔岩。从温都尔庙变质橄榄岩全岩的 Tb/Yb-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 双变量图解(图 7a) 可见, 样品点绝大多数介于尖晶石相石榴子石相熔融趋势之间。Krishnakanta Singh(2013) 报道的 Manipur 位于尖晶石相地幔源区中上部深海地幔橄榄岩相比, 研究区变质橄榄岩位于尖晶石相地幔源区中下部。由此可知, 所研究变质橄榄岩熔融程度要高于 Manipur 地幔橄榄岩(2% ~ 12%)。结合稀土元素球粒陨石标准化分离熔融程度图解(图 7b), 可以得出研究区地幔橄榄岩的熔融程度大约介于 5% ~ 20% 之间(Melcher *et al.*, 2002)。变质橄榄岩稀土元素 (La/Sm)<sub>N</sub> 和 (La/Yb)<sub>N</sub> 值都较大, 配分模式呈幅度较缓的“U”或“V”型, 轻稀土相对富集而重稀土则略显亏损, 中稀土元素亏损强烈, 据邱瑞照等(2005) 和徐向珍等(2011) 研究, 结合样品中的 MgO 含量较高等特点, 认为这种现象可能是橄榄岩先经历了部分熔融过程, 后流体在板块发生俯冲消减时进行交代。变质橄榄岩微量元素原始地幔标准化蛛网图反映出 Rb、Ce、Pr 等元素明显亏损, U、Pb、Sr 等元素表现出明显富集, 可能既与地幔源区相关也与流体交代或蛇纹石化作用有关。

### 4.2 构造背景

蛇绿岩套的存在表示了某个地质历史阶段曾经出现过洋壳, 对恢复区域构造演化具有重要意义

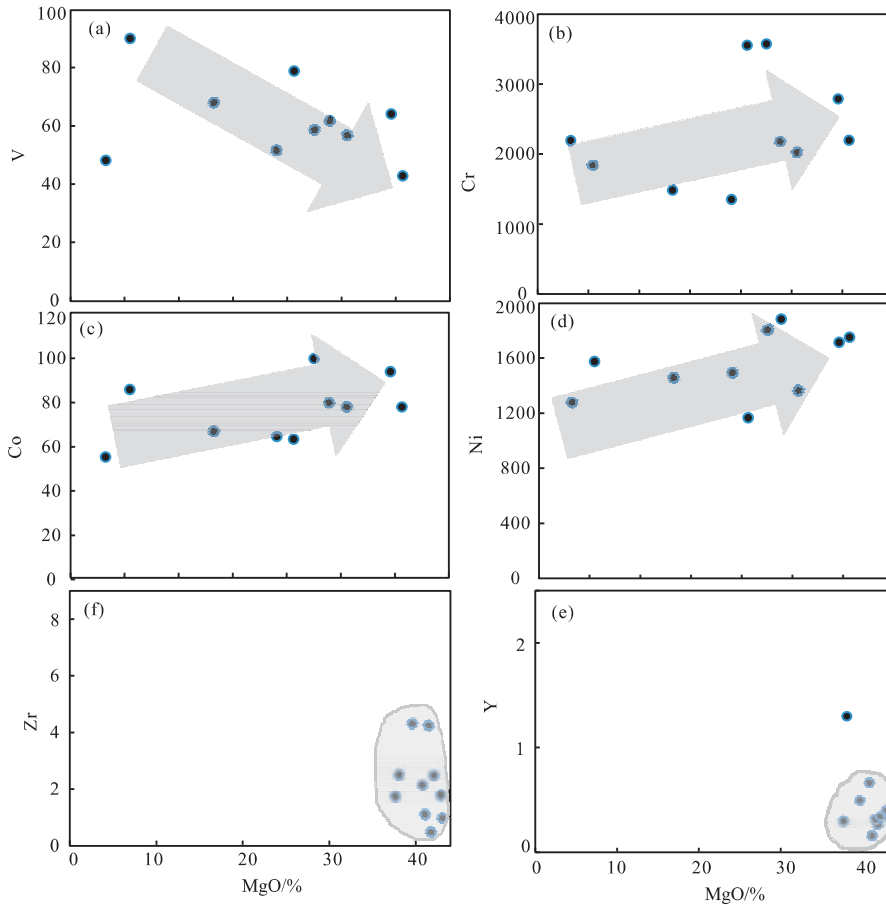


图6 温都尔庙蛇纹石化橄榄岩部分微量元素与 MgO 变异图解

Fig.6 Variation diagrams of contents of some trace elements vs. Mg<sup>#</sup> value of the Wenduermiao serpentinized peridotites

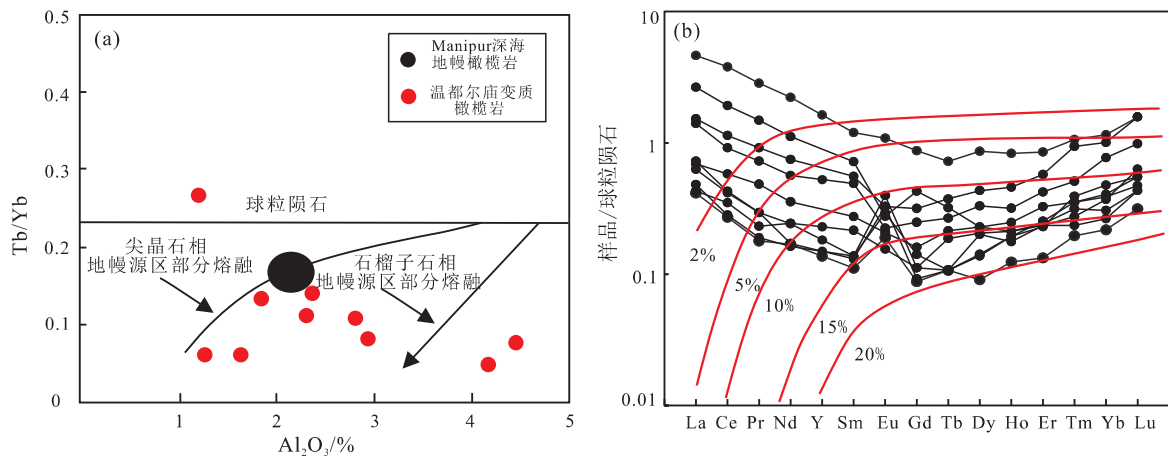


图7 温都尔庙变质橄榄岩 Tb/Yb-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 双变量图解 (a) 和稀土元素球粒陨石标准化分离熔融程度图解 (b)

(底图据 Krishnakanta Singh 2013)

Fig.7 Plots of Tb/Y ratios vs. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents (a) and the chondrite-normalized REE patterns and fractional melting degrees (modified after Krishnakanta Singh 2013)

(路凤香和桑隆康 2002)。根据蛇绿岩形成的构造背景, Pearce 等(1984) 将其分为洋中脊型(MOR) 和俯冲带型(SSZ)。MOR 型蛇绿岩的地幔橄榄岩岩性多为二辉橄榄岩, 一般含少量的纯橄岩和方辉橄榄岩, LREE 出现亏损(Pearce et al., 1984)。SSZ 型

蛇绿岩的地幔橄榄岩岩性多为方辉橄榄岩, 一般可含有不规则的二辉橄榄岩和辉石岩体, 且 LREE 表现为富集, REE 配分模式为“U”型(Melcher et al., 2002; 史仁灯等 2005)。

目前对于温都尔庙蛇绿岩的构造背景存在分



歧,一些学者认为温都尔庙蛇绿岩属于 MOR 型(唐克东等,1983;唐克东,1992;王东方,1985;胡晓等,1990),而一些学者(李承东等,2012)则在研究区发现有玄武岩-玄武安山岩-安山岩组合进而证明其构造背景应该属于 SSZ 型而不是 MOR 型,认为本区应该是属于一种洋内岛弧的构造组合背景。

结合温都尔庙变质橄榄岩的岩石学和地球化学特征,温都尔庙蛇绿岩可能经历了洋中脊型(MOR)和俯冲带型(SSZ)两个阶段的构造演化。支持这种观点的证据广泛存在,如黄金香等(2006)对内蒙古温都尔庙和巴彦敖包-交其尔蛇绿岩进行研究,指出温都尔庙玄武岩具有板内和大陆裂谷特征,代表约 600 Ma 时,温都尔庙地区开始发育新的洋盆。刘敦一等(2003)对内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩进行 SHRIMP 测年,表明在早古生代时期发生过两次消减事件,分别是在 467~451 Ma 和 429 Ma。许传诗(1990)对内蒙温都尔庙地区蛇绿岩的微量元素特征及其岩石成因进行研究,认为温都尔庙地区枕状玄武岩和辉绿岩的源岩是 MORB,本区的蛇绿岩是早古生代末期俯冲带残留的岩块。此外,文中也列举了支持这个观点的证据,温都尔庙蛇纹石化橄榄岩一方面表现出 MOR 型蛇绿岩的特点,据 CIPW 标准矿物计算,岩石主体属于方辉橄榄岩和二辉橄榄岩;岩石熔融程度为 5%~>20% 接近于大洋深海地幔橄榄岩(10%~22%)(Niu,1997;Niu and Hékinian,1997)。另一方面又表现出 SSZ 型蛇绿岩的特点,样品中氧化物 TiO<sub>2</sub> 含量低(0.003%~0.038%),低于大洋中脊(TiO<sub>2</sub>>0.1%)(白文吉等,1995),但与 SSZ 型的橄榄岩接近,暗示其来源于俯冲消减带(Peace *et al.*,1984);REE 配分模式为“U”型,LREE 表现为富集等地球化学特征,暗示其先经历了一定程度的部分熔融,后遭受俯冲消减带中富含 LREE 流体交代。为此,推测温都尔庙蛇绿岩经历了两个阶段的演化,即主体形成于大洋中脊,后期遭受洋内俯冲消减作用。

值得注意的是,温都尔庙蛇绿岩的构造背景可能远比洋中脊和俯冲带要更加复杂,因为其形成时间漫长,构造环境变化,至少经历了两次以上的变质活动(许传诗,1987)。要想对温都尔庙蛇绿岩构造环境作出较为完整且具说服力的解释,还需要进行大量有意义的工作。

## 5 结论

(1) 温都尔庙蛇绿岩套中的地幔橄榄岩大规模地发生了强烈的蛇纹石化作用。岩石全由蛇纹石

化矿物组成,矿物组合主要为蛇纹石+碳酸盐矿物+滑石+磁铁矿;CaO、Alk、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等亏损,部分微量元素 Ce、Rb 等出现负异常。

(2) 温都尔庙变质橄榄岩中 MgO 含量高于原始地幔,CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub> 等亏损且与 MgO 呈负相关关系,表明研究区地幔橄榄岩是一套亏损程度较高的原始地幔熔融残留体。温都尔庙变质橄榄岩接近于尖晶石相源区熔融趋势,其熔融程度为 5%~20%。

(3) 变质橄榄岩主体为二辉橄榄岩和方辉橄榄岩,熔融程度与深海地幔橄榄岩接近,但 TiO<sub>2</sub> 含量与消减带橄榄岩相当,REE 总量低,配分模式为“U”型,LREE 相对富集,部分 LILE 明显亏损及部分 HFSE 强烈富集,暗示地幔橄榄岩经历了 MOR 和 SSZ 两个阶段的构造演化。

致谢:野外考察中得到了贾和义教授级高级工程师和高允同学的帮助,东北大学秦皇岛分校实验室提供相关实验的指导和帮助,在此一并致谢。

## 参考文献 (References):

- Bezard R, Hébert R, Wang C S, Dostal J, Dai J G, Zhong H T. 2011. Petrology and geochemistry of the Xiugugabu ophiolitic massif, western Yarlung Zangbo suture zone, Tibet. *Lithos*, 125(1-2): 347-367
- Coleman R G. Ophiolites. 1977. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag
- Frey F A. 1984. Rare earth element abundances in upper mantle rocks. In: Henderson P, ed. Rare earth element geochemistry. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Sci. Publ. Co., 2: 153-203
- Gruau G, Tourpin S, Fourcade S, Blais S. 1992. Loss of isotopic(Nd, O) and chemical(REE) memory during metamorphism of komatiites: New evidence from eastern Finland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 112(1): 66-82
- Hartmann G, Wedepohl K H. 1993. The composition of peridotite tectonites from the Ivrea complex, northern Italy, residues from melt extraction. *Geochemica et Cosmochemica Acta*, 57(8): 1761-1782
- Khalil A E S, Obeid M A, Azer M K. 2014. Serpentinized peridotites at the North Part of the Wadi Allaqi District (Egypt): Implications for the tectono-magmatic evolution of fore-arc crust. *Acta Geologica Sinica*, 88(5): 1421-1436
- Krishnakanta Singh A. 2013. Petrology and geochemistry of Abyssal Peridotites from the Manipur Ophiolite Complex, Indo-Myanmar Orogenic Belt, Northeast India: Implication for melt generation in mid-oceanic ridge environment. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 258-276
- Loubet M, Shimizu N, Allègre C J. 1975. Rare earth elements in alpine peridotites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 53(1): 1-12
- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical*

- Geology, 120(3-4): 223-253
- Melcher F, Meisel T, Puhl J, Kollerl F. 2002. Petrogenesis and geotectonic setting of ultramafic rocks in the Eastern Alps: Constraints from geochemistry. *Lithos*, 65(1-2): 69-112
- Mével C. 2003. Serpentinization of abyssal peridotites at mid-ocean ridges. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(10-11): 825-852
- Nicolas A, Prinzhofer A. 1983. Cumulative or residual origin for the transition zone in ophiolites: Structural evidence. *Journal of Petrology*, 24(2): 188-206
- Niu Y L, Hékinian R. 1997. Spreading-rate dependence of the extent of mantle melting beneath ocean ridges. *Nature*, 385(6614): 326-329
- Niu Y L. 1997. Mantle melting and melt extraction processes beneath ocean ridges: Evidence from abyssal peridotites. *Journal of Petrology*, 38(8): 1047-1074
- Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. In: Kokelaar B P, Howells M F, eds. *Marginal basin geology*. Geological Society, London, Special Publications, 16(1): 77-94
- Peltonen P, Kontinen A, Huhma H. 1996. Petrology and geochemistry of metabasalts from the 1.95 Ga Jormua ophiolite northeastern Finland. *Journal of Petrology*, 37(6): 1359-1383
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345
- 白文吉, 杨经绥, 胡旭峰, 周美付. 1995. 内蒙古贺根山蛇绿岩岩石成因和地壳增生的地球化学制约. *岩石学报*, 11(S1): 112-124
- 陈德潜, 陈刚. 1990. 实用稀土元素地球化学. 北京: 冶金工业出版社, 223-232
- 胡晓, 许传诗, 牛树银. 1990. 华北地台北缘早古生代大陆边缘演化. 北京: 北京大学出版社, 1-185
- 黄金香, 赵志丹, 张宏飞, 侯青叶, 陈岳龙, 张本仁, Depaolo D J. 2006. 内蒙古温都尔庙和巴彦敖包-交其尔蛇绿岩的元素与同位素地球化学: 对古亚洲洋东部地幔域特征的限制. *岩石学报*, 22(12): 2889-2900
- 李承东, 冉焱, 赵利刚, 王惠初, 张阔, 许雅雯, 谷永昌, 张永清. 2012. 温都尔庙群锆石的 LA-MC-ICPMS U-Pb 年龄及构造意义. *岩石学报*, 28(11): 3705-3714
- 连东洋, 杨经绥, 熊发挥, 刘飞, 王云鹏, 周文达, 赵一珏. 2014. 雅鲁藏布江蛇绿岩带西段达机翁地幔橄榄岩组成特征及其形成环境分析. *岩石学报*, 30(8): 2164-2184
- 梁日暄. 1994. 内蒙古中段蛇绿岩特征及地质意义. *中国区域地质*, (1): 37-45
- 李献华, 刘颖, 涂湘林, 胡光黔, 曾文. 2002. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱熔分解样品方法的对比. *地球化学*, 31(3): 289-294
- 刘敦一, 简平, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据. *地质学报*, 77(3): 317-327
- 刘晔, 柳小明, 胡兆初, 第五春荣, 袁洪林, 高山. 2007. ICP-MS 测定地质样品中 37 个元素的准确度和长期稳定性分析. *岩石学报*, 23(5): 1203-1210
- 卢俊生, 倪志耀, 翟明国, 童英, 王仁民, 严刚, 刘胤. 2009. 冀北赤峰红旗营子群中变质橄榄岩的岩石学与地球化学特征. *矿物岩石*, 29(3): 91-99
- 路凤香. 1988. 地幔岩岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 114-115
- 路凤香, 桑隆康. 2002. 岩石学. 第 4 版. 北京: 地质出版社, 370-371
- 齐进英, 江绍英. 1982. 超基性岩蛇纹石化溶液的来源问题. *地质地球化学* (5): 42-45
- 邱家骧, 林景仟. 1991. 岩石化学. 北京: 地质出版社, 67-70
- 邱瑞照, 邓晋福, 周肃, 李廷栋, 肖庆辉, 郭铁鹰, 蔡志勇, 李国良, 黄圭成, 孟祥金. 2005. 青藏高原西部蛇绿岩类型: 岩石学与地球化学证据. *地学前缘*, 12(2): 277-291
- 史仁灯, 杨经绥, 许志琴, 戚学祥. 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榄岩的证据. *岩石矿物学杂志*, 24(5): 397-408
- 唐克东, 颜竹筠, 张允平, 徐冬葵, 池永一, 苏养正, 梁仲发. 1983. 论温都尔庙群及其构造意义. 见: *中国北方板块构造文集 1*. 北京: 地质出版社, 186-208
- 唐克东. 1992. 中朝板块北侧褶皱带构造演化及其成矿规律. 北京: 北京大学出版社, 1-264
- 汪小妹, 曾志刚, 陈俊兵. 2009. 马里亚纳前弧南部橄榄岩的蛇纹石化. *自然科学进展*, 19(8): 859-867
- 汪小妹, 曾志刚, 欧阳荷根, 殷文博, 王晓媛, 陈帅, 张国良, 武力. 2010. 大洋橄榄岩的蛇纹石化研究进展评述. *地球科学进展*, 25(6): 605-616
- 王东方. 1985. 关于温都尔庙群内涵、时代问题的讨论及其在板块会聚带构造发展中的意义. *地质论评*, 31(5): 461-468
- 王荃, 刘雪亚, 李锦轶. 1991. 中国内蒙古中部的古板块构造. *中国地质科学院院报*, 22(1): 1-15
- 王希斌, 鲍佩声, 戎合. 1996. 中国蛇绿岩中变质橄榄岩的稀土元素地球化学. *岩石学报*, 11(S): 24-41
- 徐向珍, 杨经绥, 郭国林, 李金阳. 2011. 雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩中地幔橄榄岩的岩石学研究. *岩石学报*, 27(11): 3179-3196
- 许传诗. 1987. 内蒙古温都尔庙地区蛇绿岩变质作用的研究. *河北地质学院学报*, 10(1): 1-26
- 许传诗. 1990. 内蒙温都尔庙地区蛇绿岩微量元素特征及其岩石成因意义. *河北地质学院学报*, 13(1): 1-8
- 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 苏德辰, 陈松永, 王希斌, Wooden J. 2008. 北阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和 SHRIMP 定年. *岩石学报*, 24(7): 1567-1584
- 姚玉鹏, 田兴有, 易善锋, 柴育成. 1997. 中国蛇绿岩研究的现状及今后的研究方向. *地球科学进展*, 12(2): 134-137
- 余星, 初凤友, 陈汉林, 董彦辉, 李小虎. 2011. 深海橄榄岩蛇纹石化作用的研究进展. *海洋学研究*, 29(1): 96-103
- 张旗, 周国庆. 2001. 中国蛇绿岩. 北京: 科学出版社, 1-182
- 张雯华, 从柏林. 1976. 一种简单的基性-超基性岩岩石化学研究方法. *科学通报* (4).

(本文责任编辑: 龚超颖)

## 特约主题:超基性岩蛇纹石化 与地球生命起源/演化

**编者按语:**生命起源/演化是重大而又最具争议的科学问题。对蛇纹石化超基岩寄主生物圈的研究,有望获得地球上古老而独特的前生命/生命有机质成因和演化的重要信息。超基性岩蛇纹石化生成非生物成因烷烃与其他有机化合物,为化能自养微生物群落提供了所需要的能量和初始物质,是生命起源最重要的变质水化反应。本专辑收录了王先彬和张明峰课题组,研究蛇绿岩中蛇纹石化橄榄岩的部分成果。该组论文从研究区地质-构造背景,岩石-矿物学组合,主量-微量元素组合,氧化-还原特征,以及气体-有机地球化学特征等的耦合关系,综合论述了蛇纹石化基础理论和实际观测结果。Mössbauer spectrometry 研究表明,蛇纹石化橄榄岩总含铁量和  $\text{Fe}^{3+}$  的分布不仅与磁铁矿密切相关,而且  $\text{Fe}^{3+}$  以分布于蛇纹石中占优势。这对正确估算蛇纹石化过程中  $\text{H}_2$  的生成量有十分重要的意义,对估算俯冲带  $\text{Fe}^{3+}$  输入和评估原生地幔岩的蛇纹石化作用有重要参考价值。Stepwise-Heating-MS 技术测定,揭示了二氧化碳和气态烷烃,非生物成因和生物成因两种组分的共存特征。Py-GC-MS 技术测定,揭示了两种来源有机质,一是费-托合成反应产生的非生物成因有机质,另一是海洋有机质热降解/和,或微生物活动残留的生物成因有机质。生命起源/演化是当今国际学术界共同关注的重要前沿研究领域之一。该项研究所取得的初步结果,为进一步研究蛇纹石化作用与生命起源/演化的相关性,积累了重要基础资料。也将为关注该研究领域的读者提供有益的参考资料。



**特邀主编:**王先彬,1941年生。中国科学院地质与地球物理所兰州油气资源研究中心研究员、博士生导师。长期从事气体地球化学研究,涉及:常规天然气、深层天然气、非生物成因天然气,稀有气体同位素地球化学,深部气体地球化学,地震与火山气体地球化学和环境地球化学。近年来承担《松辽盆地地幔脱气作用与非生物成因天然气》和《蛇纹石化作用和非生物成因氢、甲烷、烷烃》自然科学基金课题。开展了非生物成因天然气资源和生命起源/演化的相关研究。共出版专著8部(含独著1部),发表论文200余篇。曾获国家自然科学奖1项,中国科学院自然科学奖3项,中国科学院科技进步奖5项,甘肃省科技进步奖1项。

### 专栏作者简介



**郭秉成**,内蒙古地矿建设工程集团有限责任公司副总经理兼地质总工程师,高级工程师。1983年毕业于河北地质学院物探系,曾任内蒙古国土资源勘查开发院技术负责、分队长、总工程师、所长。多年来在内蒙古从事找矿勘查工作,其中负责完成的“内蒙古自治区卓资县聚宝庄银多金属矿普查”与“内蒙古自治区四子王旗额尔登一带银铅多金属矿预查”等项目具有很大的找矿前景。



**卓胜广**,东北大学秦皇岛分校应用地质研究所所长,教授。长期从事油气田勘探与开发领域里的科研工作,尤其在新区块的油气地质调查与评价研究中具有丰富的积累和专长。在油藏储层预测与油藏评价及油气藏开发压裂改造等领域先后参加和负责承担各级科研项目40多项,发表论文30余篇。科研成果获省部级科技进步一等奖1项,二等奖2项。



**张明峰**,博士,中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心副研究员。从事油气地球化学的研究工作。先后主持国家自然科学基金、中国科学院“西部之光”等项目,发表论文20余篇。近几年开展基性岩-超基性岩蛇纹石化作用的气体地球化学研究,探讨蛇纹石化过程与氢气、甲烷的形成机理,以及气体的来源和成因。



**梅盛旺**,中国科学院广州地球化学研究所在读硕士研究生,主要从事岩浆岩岩石学和岩石地球化学研究。



**傅振洋**,中国地质大学(北京)在读硕士研究生,主要从事大地构造演化过程和蛇绿混杂岩岩石组合样式研究。