

马利亚纳前弧南部橄榄岩的蛇纹石化<sup>\*</sup>汪小妹<sup>1,2,\*</sup> 曾志刚<sup>1</sup> 陈俊兵<sup>3</sup>

1 中国科学院 海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室, 青岛 266071; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3 浙江省水文地质工程地质大队, 宁波 315012

**摘要** 对马利亚纳前弧南部的蛇纹石化橄榄岩特征进行了岩石学和矿物化学研究, 揭示了马利亚纳前弧南部橄榄岩的蛇纹石化过程, 并探讨了蛇纹石矿物仅仅只出现利蛇纹石的原因. 对比于马利亚纳蛇纹岩海山, 马利亚纳前弧南部的蛇纹石化橄榄岩具有其特有的特征: 其蛇纹石化橄榄岩的组成矿物主要为橄榄石、角闪石和尖晶石, 以及蛇纹石、绿泥石和滑石, 缺乏磁铁矿和水镁石, 同时出现了滑石; 此外, 蛇纹石矿物类型单一, 为利蛇纹石. 通过对矿物化学以及矿物相关关系的研究, 得出的结论认为: 马利亚纳前弧南部橄榄岩中缺乏磁铁矿的原因是由于其蛇纹石化作用还未进行完全, 橄榄石中 Fe 端元组分没有形成磁铁矿, 而是进入蛇纹石和水镁石形成了富 Fe 的蛇纹石和水镁石; 岩石中没有观察到水镁石是由于水镁石在富 SiO<sub>2</sub> 条件下不稳定, 后期富 SiO<sub>2</sub> 流体与其进一步相互作用形成了蛇纹石; 滑石的出现是后期富 SiO<sub>2</sub> 流体与蛇纹石相互作用的结果. 而蛇纹石矿物只出现利蛇纹石的原因, 是由于研究区的温压条件不足以满足叶蛇纹石的形成条件要求(叶蛇纹石的形成温度 > 500 °C), 虽然利蛇纹石和纤蛇纹石在形成温度上有很大的重叠, 但二者在产出模式和形成条件上的差异, 如马利亚纳前弧南部橄榄岩中更有利于利蛇纹石形成的干燥、低渗透性和孔隙度的环境、以及蛇纹石化处于初级阶段的实际情况等, 就决定了利蛇纹石出现而纤蛇纹石缺失.

**关键词** 橄榄岩 蛇纹石化 矿物化学 利蛇纹石 马利亚纳

俯冲带中的蛇纹石化是一种普遍且重要的过程<sup>[1,2]</sup>. 蛇纹石化除了引起大洋岩石圈的流变学和密度<sup>[3]</sup> 以及磁化率和地震波速<sup>[1,4]</sup> 的改变外, 对大洋元素的地球化学收支平衡<sup>[5,6]</sup> 以及海底微生物活动<sup>[7,8]</sup> 也具有重要影响. 蛇纹石化是马利亚纳前弧橄榄岩经历的一个重要的后期改造过程, 揭示俯冲带之上地幔楔橄榄岩的蛇纹石化特征对于全面系统地认识研究区橄榄岩所经历的地质作用过程非常重要, 且有利于前弧蛇纹岩海山的形成过程及机制的研究.

现已对伊豆-小笠原-马利亚纳(Izu-Bonin-Mari-

ana)岛弧体系(又称 IBM 岛弧体系)通过拖网、深潜、以及钻孔等方法获得了大量样品, 相关的研究涉及蛇纹岩海山的岩石学<sup>[9]</sup>、微量元素<sup>[10]</sup>、孔隙水<sup>[11]</sup> 以及海山橄榄岩蛇纹石化特征<sup>[12]</sup> 等, 对海沟陆侧斜坡橄榄岩的研究则相对薄弱, 主要集中在橄榄岩的岩石矿物学<sup>[13-15]</sup> 以及橄榄岩的微观结构<sup>[8]</sup> 等方面. 马利亚纳海沟陆侧斜坡橄榄岩经历了一定程度的蛇纹石化作用, 所观察到的蛇纹石特征与马利亚纳前弧的蛇纹岩海山<sup>[12]</sup> 是有明显差异的, 如磁铁矿和水镁石缺乏、仅仅只出现单一的蛇纹石矿物利蛇纹石等. 但目前为止对海沟陆侧斜坡橄榄岩蛇纹

2009-03-03 收稿, 2009-04-07 收修修改稿

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX2-YW-211, KZCX3-SW-223)、国家自然科学基金(批准号: 40830849)和国家大洋重大专项课题(批准号: DYXM-115-02-1-03)资助项目

\*\* E-mail: wangxiaomei2001@126.com

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

石化特征仍未见详细的研究报道, 对其蛇纹石化过程以及产生特定矿物组合的原因也没有清晰的认识。

本文写作的目的就是为了解马里亚纳前弧南部橄榄岩的蛇纹石化特征, 弄清该区橄榄岩的蛇纹石化过程, 探讨马里亚纳前弧南部蛇纹石化橄榄岩中出现特定矿物组合的原因, 以期对 IBM 岛弧体系前弧橄榄岩的蛇纹石化有更全面系统的认识。

## 1 地质背景及取样位置

从平面形态上, 可将 IBM 岛弧体系分成南北两部分(图 1):  $24^{\circ}\text{N}$  以北的伊豆-小笠原岛弧呈线性展布;  $24^{\circ}\text{N}$  以南的马里亚纳岛弧呈弧形展布<sup>[15]</sup>。南部的马里亚纳岛弧体系从关岛到  $23.6^{\circ}\text{N}$  附近全长约 1400 km, 马里亚纳海沟(Mariana trench)是太平洋板块向菲律宾海板块下部的俯冲处<sup>[16]</sup>, 俯冲作用大约开始于 43 Ma 之前<sup>[17]</sup>, 马里亚纳海沟南部的

Challenger Deep, 是世界上最深的大洋海沟, 比马里亚纳海沟的平均深度深 2 km<sup>[18-20]</sup>, 俯冲作用在菲律宾海板块留下了一系列残余岛弧和活动岛弧, 活动的马里亚纳海槽(Mariana trough)以西分别为西马里亚纳海脊(West Mariana ridge)和九州-帕劳海脊(Kyushu-Palau ridge), 这两个残余岛弧中间以 Parece Vela 海盆相间, 马里亚纳海槽以东为活动的马里亚纳岛弧。沿着海沟  $13^{\circ}\text{N}$  以北前弧发育良好, 马里亚纳前弧由海沟轴部和活动火山弧之间的区域组成, 约 200 km 宽, 1500 km 长<sup>[13]</sup>。海沟的陆侧斜坡很陡, 向南倾斜约  $12^{\circ}-15^{\circ}$ 。马里亚纳海沟缺乏沉积物增生楔<sup>[21, 22]</sup>; 主要由基性和超基性火山岩组成<sup>[23]</sup>。马里亚纳前弧中心部分( $15^{\circ}-20^{\circ}\text{N}$ )具有一系列圆锥形的蛇纹岩海山, 通常被拉长平行于海沟<sup>[24, 25]</sup>。

本文研究的橄榄岩样品来自日本东京大学海洋研究所 Hakuho R/V KH03-3 航次, 样品通过拖网方法采集于马里亚纳海沟南部的陆侧斜坡  $11.8^{\circ}\text{N}$  附近(图 1), 采样水深为: 4200—3500 m。与这些橄榄岩样品同时采集到的还有玄武岩、辉石岩等。

## 2 岩石学特征

橄榄岩样品都遭受了一定程度的蛇纹石化, 有的样品呈现出海底风化特征。蛇纹石化橄榄岩的主要组成矿物为橄榄石、尖晶石、角闪石、蛇纹石、绿泥石和滑石。橄榄石颗粒多被蛇纹石化呈网状结构(图 2(a)), 网状结构中, 蛇纹石通常以网脉的形式出现, 中心为新鲜的橄榄石。部分蛇纹石化程度高的橄榄岩中, 其中心的橄榄石也被蛇纹石取代。尖晶石(本文所说的尖晶石指的是尖晶石族矿物)黑色不透明, 颗粒通常裂隙发育, 有的尖晶石颗粒离散成细小的颗粒集合体(图 2(b))。尖晶石周围通常伴随着绿泥石的出现(图 2(c))。此外, 在一些脉中也常分布着尖晶石的小颗粒(图 2(d))。角闪石从形态上可以分为两种, 一种呈长柱状, 其蛇纹石化通常沿颗粒的解理和裂隙进行(图 2(e))。另一种呈针状, 通常切过了网状结构的橄榄石颗粒(图 2(f)), 是蛇纹石化后期形成的次生角闪石。蛇纹石呈多种产出状态: (I) 以网脉的形式出现在橄榄石的网状结构中, 部分蚀变程度较高的样品中(如 D8-5),

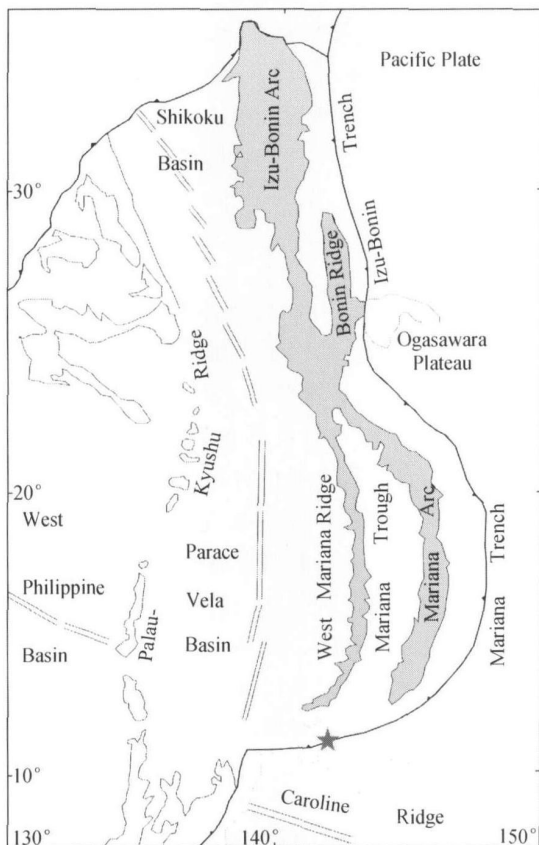


图 1 伊豆-小笠原-马里亚纳岛弧体系构造简图

修改自 Stern 等<sup>[17]</sup>; 图中五角星为本文样品的取样位置

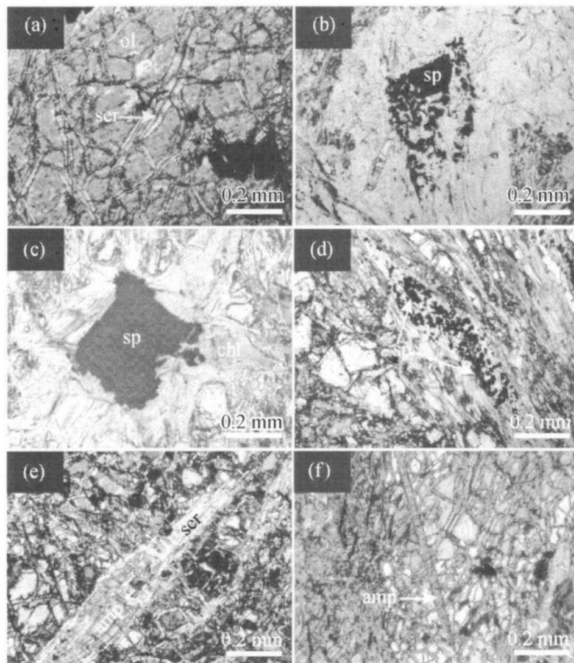


图 2 马里亚纳前弧南部橄榄岩的显微照片

(a) 橄榄石(ol)被蛇纹石化呈网状结构; (b) 尖晶石(sp)呈黑色不透明的离散小颗粒; (c) 绿泥石(chl)分布在尖晶石周围; (d) 尖晶石小颗粒分布在脉中; (e) 角闪石(amp)被蛇纹石(ser)部分取代; (f) 次生角闪石穿插切过网状结构的橄榄石。白色标尺长度为 0.2mm

蛇纹石出现在网状结构的中心; (II) 出现在角闪石颗粒的裂隙中; (III) 蛇纹石脉. 绿泥石通常出现在尖晶石周围(图2(c)), 取代蛇纹石, 与蛇纹石密切相关. 也常见绿泥石的脉. 滑石通常取代蛇纹石, 出现在橄榄石网状结构的网脉中. 此外薄片中也常见滑石脉出现.

### 3 矿物化学

矿物常量元素分析在中国科学院地质与地球物理研究所进行, 分析仪器为 JXA-8100 型电子探针, 分析条件为加速电压 15 kV, 电流 20 nA, 分析结果见表 1—3.

#### 3.1 橄榄石

橄榄石蚀变后呈网状结构, 蛇纹石充填网脉. 其代表性的电子探针结果见表 1. 各样品中橄榄石  $Mg^{\#}$  值相对一致, 为 0.91—0.92.  $MnO$  含量  $\leq 0.16 wt\%$ , 且  $MnO$  和  $FeO$  含量基本上是同步变化的.  $NiO$  含量在 0.31 wt%—0.44 wt% 范围内. 所分析的橄榄石都不含  $Ca$ ,  $Cr$  和  $Al$ .

#### 3.2 角闪石

按照 Leake 等<sup>[26]</sup> 的分类法, 可以将角闪石分为 3 种(表 1). 有两种为钙质角闪石, 其  $CaO$  含量较高,

表 1 橄榄石、角闪石和尖晶石的代表性电子探针结果

	橄榄石		角闪石				尖晶石			
			透闪石	镁角闪石	镁铁闪石	核心	边缘			
SiO <sub>2</sub>	41.48	41.19	56.54	55.84	52.80	53.28	59.06	59.10	0.00	0.00
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.01	0.03	0.05	0.01	0.00	0.00	0.01	0.10	0.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	1.31	1.76	5.44	4.16	0.15	0.11	11.11	6.63
FeO	8.45	8.01	1.86	2.05	2.19	2.26	6.68	7.22	34.52	42.47
MnO	0.11	0.09	0.05	0.02	0.00	0.05	0.24	0.22	0.48	0.51
MgO	50.04	49.69	22.88	22.82	21.88	23.21	29.71	29.22	6.93	5.38
CaO	0.00	0.01	12.97	12.40	13.43	11.16	0.64	0.66	0.00	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.00	0.51	0.57	0.75	1.47	0.13	0.12	0.01	0.05
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.18	0.32	0.87	0.35	0.00	0.03	45.15	41.70
NiO	0.30	0.44	0.04	0.08	0.00	0.03	0.06	0.13	0.12	0.24
Total	100.39	99.43	96.37	95.96	97.35	95.97	96.68	96.82	98.41	97.28
氧原子数	0=4	0=4	0=23	0=23	0=23	0=23	0=23	0=23	0=4	0=4
Si	1.01	1.01	7.84	7.79	7.33	7.46	8.02	8.04	0.00	0.00
Ti	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Al	0.00	0.00	0.21	0.29	0.89	0.69	0.02	0.02	0.44	0.28

续表

	橄榄石		角闪石				尖晶石			
			透闪石		镁角闪石		镁铁闪石		核心	边缘
Fe <sup>2+</sup>	0 17	0 16	0 22	0 24	0 25	0 26	0 76	0 82	0 63	0 70
Fe <sup>3+</sup>	/	/	/	/	/	/	/	/	0 34	0 55
Mn	0 00	0 00	0 01	0 00	0 00	0 01	0 03	0 03	0 01	0 02
Mg	1 81	1 81	4 73	4 74	4 53	4 84	6 02	5 92	0 35	0 28
Ca	0 00	0 00	1 93	1 85	2 00	1 67	0 09	0 10	0 00	0 00
Na	0 00	0 00	0 14	0 15	0 20	0 40	0 03	0 03	0 00	0 00
K	0 00	0 00	0 00	0 01	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00	0 00
Cr	0 00	0 00	0 02	0 04	0 10	0 04	0 00	0 00	1 21	1 16
Ni	0 01	0 01	0 00	0 01	0 00	0 00	0 01	0 01	0 00	0 01
Total cation	2 99	2 99	15 11	15 13	15 29	15 38	14 98	14 97	3 00	3 00
Mg <sup>#a)</sup>	0 91	0 92	0 96	0 95	0 95	0 95	0 89	0 88	0 36	0 29
Cr <sup>#a)</sup>	/	/	/	/	/	/	/	/	0 73	0 81

a) Mg<sup>#</sup> = Mg / (Mg + Fe<sup>2+</sup>); Cr<sup>#</sup> = Cr / (Cr + Fe<sup>3+</sup>)

(Na + Ca)<sub>B</sub> > 1.00, Na<sub>B</sub> = 0.50 到 1.50, 通常 Ca<sub>B</sub> > 1.50, 属单斜晶系, 根据 Si 和 (Na + K)<sub>A</sub> 以及 Mg<sup>#</sup> 的数值, 其又可进一步划分为透闪石和镁角闪石两种类型. 第三种为镁铁闪石, 其 (Na + Ca)<sub>B</sub> < 1.00, Mg<sup>#</sup> > 0.5, 正交镜下斜消光, 属单斜晶系. 前两种角闪石通常被蛇纹石沿着矿物解理和裂隙部分取代. 第三种是蛇纹石化后期形成的, 通常切过蛇纹石化呈网状结构的橄榄石. 其化学成分与前两种存在很大的差异, 透闪石和镁角闪石 CaO 的含量较高, 达 11 wt %—13.5 wt %, 而镁铁闪石的 FeO, MnO 和 MgO 含量较高, 分别为 6.6 wt %—7.3 wt %、0.2 wt %—0.25 wt %、29 wt %—30 wt %. 此外, 镁铁闪石的 Mg<sup>#</sup> 值 (0.88—0.89) 明显低于镁角闪石和透闪石的 Mg<sup>#</sup> 值 (0.95—0.96).

### 3.3 尖晶石

表 1 中列出了尖晶石核心及边缘代表性的电子探针结果. 尖晶石的边缘相对于核心, 富集 Fe, 而亏损 Al, Mg 和 Cr.

### 3.4 绿泥石

根据绿泥石在薄片中的特征, 可以将其分为以下几类: I. 出现在尖晶石周围; II. 取代蛇纹石出现于网状结构的网脉中; III. 绿泥石脉. 三种不同产出状态的绿泥石的化学成分很相近, Mg<sup>#</sup> 值的范围是 0.92—0.95, 其 FeO 含量在 2.97 wt %—4.8 wt % 之间, MgO 含量在 31.1 wt %—32.39 wt % 之间, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量在 13.35 wt %—15.43 wt % 之间, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

和 NiO 含量分别为 1.5 wt %—2.46 wt % 和 0.11 wt %—0.27 wt %, TiO<sub>2</sub>, MnO, CaO, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O 含量都 ≤ 0.07 wt % (见表 2).

表 2 绿泥石代表性的电子探针分析结果

	I	II	III
SiO <sub>2</sub>	31.50	31.81	32.11
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.02	0.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.43	14.27	13.35
FeO	3.32	2.97	4.80
MnO	0.00	0.06	0.02
MgO	31.50	32.10	31.41
CaO	0.00	0.01	0.04
Na <sub>2</sub> O	0.03	0.05	0.03
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.87	2.40	2.46
NiO	0.27	0.15	0.11
Total	83.94	83.82	84.36
氧原子数	O=14	O=14	O=14
Si	3.09	3.13	3.17
Ti	0.00	0.00	0.00
Al	1.79	1.65	1.55
Fe	0.27	0.24	0.40
Mn	0.00	0.00	0.00
Mg	4.61	4.71	4.62
Ca	0.00	0.00	0.00
Na	0.01	0.01	0.01
K	0.00	0.00	0.00
Cr	0.15	0.19	0.19
Ni	0.02	0.01	0.01
Total cation	9.94	9.95	9.96
Mg <sup>#a)</sup>	0.94	0.95	0.92

a) Mg<sup>#</sup> = Mg / (Mg + Fe<sup>2+</sup>)

### 3.5 蛇纹石

利蛇纹石是本文所研究的样品中出现的唯一的蛇纹石种类, 其主要有以下几种出现形式: I. 在网状结构取代橄榄石; II 取代角闪石, 出现于角闪石的裂隙及解理处; III 蛇纹石脉.  $Mg^{\#}$  的范围为 0.85—0.94. 其中 II 类蛇纹石的  $Mg^{\#}$  值 (0.85—0.86) 明显低于其他蛇纹石. 此外, II 类蛇纹石的 CaO 含量 (0.17 wt %—0.36 wt %) 和  $Na_2O$  含量 (0.29 wt %—0.41 wt %) 以及  $Cr_2O_3$  含量 (0.11 wt %—0.15 wt %) 都比其他类型蛇纹石的高. 这些元素可能是来源于角闪石的分解. 而 I 类和 III 类蛇纹石的化学组成较为相似. 但后者明显比前者更富 Si (见表 3).

表 3 蛇纹石代表性的电子探针分析结果

	I			II			III		
SiO <sub>2</sub>	41.74	40.15	41.68	41.48	43.05	40.45	42.16	42.70	
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.01	0.09	0.25	0.15	0.10	0.06	0.03	
FeO	3.91	5.74	6.01	10.02	9.34	9.22	5.73	6.48	
MnO	0.08	0.06	0.09	0.12	0.14	0.14	0.08	0.10	
MgO	37.23	35.95	36.18	32.31	32.98	31.28	36.03	33.93	
CaO	0.13	0.04	0.04	0.17	0.17	0.36	0.07	0.10	
Na <sub>2</sub> O	0.10	0.12	0.10	0.15	0.29	0.41	0.08	0.03	
K <sub>2</sub> O	0.08	0.02	0.05	0.03	0.04	0.32	0.00	0.01	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.06	0.06	0.03	0.11	0.15	0.09	0.03	
NiO	0.30	0.23	0.18	0.39	0.20	0.45	0.14	0.18	
Total	83.60	82.39	84.47	84.94	86.47	82.89	84.45	83.58	
氧原子数	O=14	O=14	O=14	O=14	O=14	O=14	O=14	O=14	
Si	4.09	4.04	4.08	4.13	4.18	4.13	4.12	4.21	
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Al	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	
Fe	0.32	0.48	0.49	0.83	0.76	0.79	0.47	0.53	
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Mg	5.44	5.39	5.28	4.79	4.77	4.76	5.24	4.99	
Ca	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.04	0.01	0.01	
Na	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.08	0.02	0.00	
K	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	
Ni	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.04	0.01	0.01	
Total cation	9.92	9.97	9.92	9.87	9.84	9.92	9.88	9.79	
$Mg^{\#a}$	0.94	0.92	0.91	0.85	0.86	0.86	0.92	0.90	

a)  $Mg^{\#} = Mg / (Mg + Fe^{2+})$

## 4 讨论

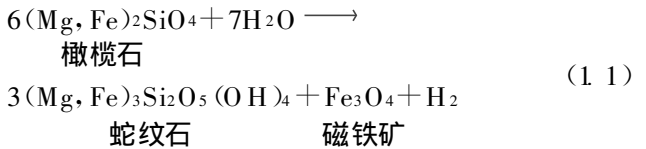
### 4.1 马利亚纳前弧南部橄榄岩蛇纹石化过程

马利亚纳前弧南部橄榄岩经历蛇纹石化, 组成矿物主要是尖晶石、残余橄榄石和角闪石, 以及利蛇纹石、绿泥石和滑石. 缺乏橄榄岩蛇纹石化的普遍产物磁铁矿和水镁石. 结合观察到的矿物之间的关系以及矿物的化学特征, 马利亚纳橄榄岩所经历的蛇纹石化过程可以划分为以下四个阶段 (表 4).

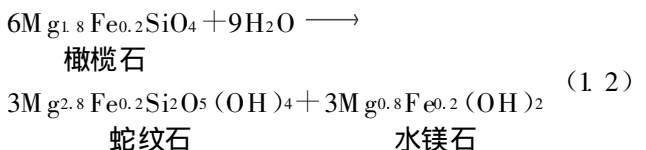
#### Stage I 橄榄石和角闪石的蚀变

##### 橄榄石

磁铁矿是蛇纹岩中普遍存在的矿物, 是橄榄石中含铁端元蛇纹石化反应的产物<sup>[27-29]</sup>. 其形成一般可以用反应式 (1.1) 表示:

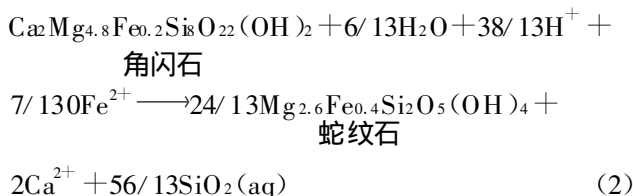


然而本文所研究的样品中没有发现磁铁矿. Toft 等<sup>[30]</sup> 认为蛇纹石化的初始阶段将产生富 Fe 的蛇纹石和富 Fe 水镁石, 磁铁矿是在蛇纹石化进一步进行过程中形成的. Bach 等<sup>[31]</sup> 在对大西洋蛇纹石化橄榄岩的研究中也认为在蛇纹石化作用不完全的橄榄岩中磁铁矿很少出现. 马利亚纳前弧南部蛇纹石化橄榄岩中, 残余橄榄石常出现在网状结构的中心, 表明蛇纹石化作用不完全. 此外, 橄榄石蚀变所形成的蛇纹石中 Fe 含量较高 (表 3). 因此, 可以认为马利亚纳蛇纹石化橄榄岩中磁铁矿的缺失是蛇纹石化作用不完全、橄榄岩处于蛇纹石化初期的结果造成的. 依据橄榄石和蛇纹石的化学组成 (表 1 和表 3), 橄榄石蚀变成蛇纹石的反应可由下式表示:



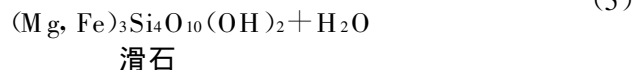
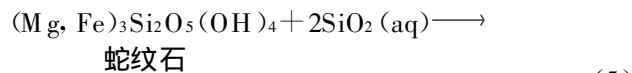
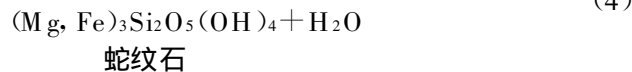
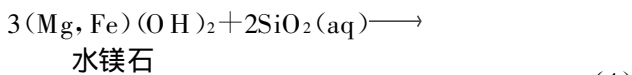
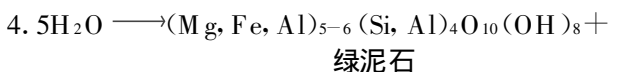
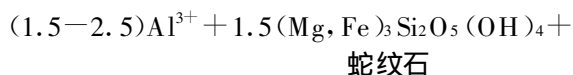
## 角闪石

角闪石的蛇纹石化很少有文献报道. 依据本文样品中角闪石和其蚀变后形成的蛇纹石的化学组成(表1和3), 推测其反应为下式, 其中  $\text{Fe}^{2+}$  可能来自于角闪石周围的橄榄石. 角闪石的蚀变将会释放出  $\text{Ca}$  和  $\text{SiO}_2$ .



## Stage II 蛇纹石的进一步反应

本文所研究的样品中, 绿泥石的形成是和蛇纹石密切相关的. 蛇纹石进一步反应形成绿泥石可用反应式(3)表示. 后期富  $\text{SiO}_2$  流体进一步作用, 使得蛇纹石化早期形成的水镁石与  $\text{SiO}_2$  反应, 形成了蛇纹石, 这就解释了为什么所研究的马里亚纳前弧南部蛇纹石化橄榄岩中水镁石是缺乏的. 其反应可用式(4)表示. 富  $\text{SiO}_2$  流体与蛇纹石相互作用, 形成了滑石. 其反应见式(5).



## Stage III 次生镁铁闪石形成

我们观察到了次生的镁铁闪石切过了橄榄石网状结构的颗粒(图2(f)), 表明镁铁闪石是在蛇纹石化的后期形成的. 镁闪石的形成可能说明流体是局部富集  $\text{Fe}$  和  $\text{Mg}$  的.

## Stage IV 后期脉的出现

在所研究的马里亚纳前弧南部蛇纹石化橄榄岩样品中共出现了4种脉, 即绿泥石脉、滑石脉和蛇纹石脉, 以及碳酸盐脉. 前三种脉的出现表明流体中  $\text{Mg}$ ,  $\text{Fe}$  和  $\text{Si}$  的富集. 这些脉中有时出现大量铬铁矿的小颗粒. 碳酸盐脉的形成可能是后期海水渗入的结果.

表4 马里亚纳前弧南部橄榄岩蚀变过程

阶段	Stage I	Stage II	Stage III	Stage IV
矿物反应	橄榄石 $\rightarrow$ 蛇纹石 + 水镁石 角闪石 $\rightarrow$ 蛇纹石	蛇纹石 + $\text{Al}^{3+} \rightarrow$ 绿泥石 水镁石 + $\text{SiO}_2 \rightarrow$ 蛇纹石 蛇纹石 + $\text{SiO}_2 \rightarrow$ 滑石	岩石局部 $\text{Mg}$ , $\text{Fe}$ 富集, 镁铁闪石形成	流体中富集的 $\text{Ca}$ , $\text{Mg}$ , $\text{Fe}$ 和 $\text{Si}$ 等导致 碳酸盐脉、蛇纹石脉、绿泥石脉和滑石脉的形成

## 4.2 蛇纹石矿物为什么只出现利蛇纹石

X射线衍射(XRD)分析结果(图3)显示, 马里亚纳前弧南部蛇纹石化橄榄岩样品中仅仅只出现利蛇纹石而没有纤蛇纹石和叶蛇纹石. 基于  $\text{MgO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  实验体系, 一般认为叶蛇纹石是在高温下稳定的蛇纹石种类(达  $500^\circ\text{C}$ )<sup>[32, 33]</sup>, 而利蛇纹石和纤蛇纹石形成于较低温度( $420^\circ\text{C}$ 以下)<sup>[34]</sup>. 对于利蛇纹石和纤蛇纹石的形成是否受温度控制以及如何受温度控制的研究较多<sup>[34-40]</sup>, 但没有一致的结论.

马里亚纳前弧南部蛇纹石化橄榄岩中叶蛇纹石的缺乏是蛇纹石化温度较低( $< 500^\circ\text{C}$ )的结果. 但是利蛇纹石和纤蛇纹石的形成温度有很大程度的重叠, 很难用形成温度来解释为什么纤蛇纹石没有出现. 研究区纤蛇纹石没有出现, 而仅仅只出现利蛇纹石, 与温度关系不大, 而取决于这两种蛇纹石矿物的产出模式和形成条件. 主要的原因是:

(1) 马里亚纳前弧南部橄榄岩的蛇纹石化作用处于初始阶段. 这是由残余橄榄石以及岩石中网状结构等特征显示的. 而蛇纹石化的初级阶段是有利

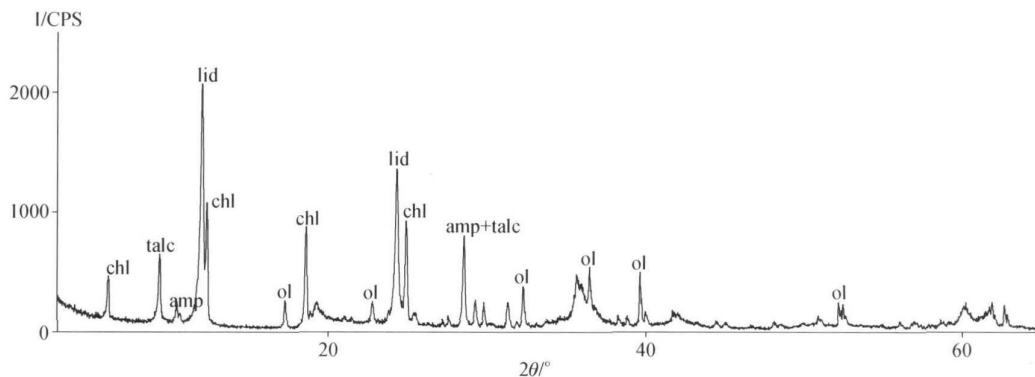


图 3 马里亚纳前弧南部橄榄岩 X 射线衍射图

图中谱线为代表性样品 D8-102 的分析结果, 各符号所代表的矿物为: chl, 绿泥石; talc, 滑石; amp, 角闪石; lid, 利蛇纹石; ol, 橄榄石。分析仪器为 D/max 2400 型 X 射线衍射仪, 分析条件为 CuK $\alpha$  辐射, 管压 40 kV, 管流 40 mA, 扫描角度 3°—65°2 $\theta$ , 步长 0.02°

于利蛇纹石的形成, 纤蛇纹石则通常在经历了一些重结晶作用的蛇纹岩中出现<sup>[34]</sup>。

(2) 马里亚纳前弧南部橄榄岩中橄榄石蚀变成蛇纹石的一个显著的特点是残余橄榄石和利蛇纹石共存, 这两种矿物共存的特点表明水沿着矿物晶体接触点的活动性很低<sup>[40, 41]</sup>。橄榄岩水合作用在很干燥的环境中是很慢的, 相对于纤蛇纹石, 该环境是更有利于利蛇纹石的形成<sup>[34]</sup>。

(3) 利蛇纹石在自然界中能直接取代橄榄石, 而纤蛇纹石则不能<sup>[42, 43]</sup>。Prichard<sup>[44]</sup>的研究表明, 利蛇纹石是在橄榄石蚀变过程中形成的, 而纤蛇纹石仅仅在橄榄石被消耗完之后才形成。Laurent 和 Hébert<sup>[45]</sup>以及 Cogulu 和 Laurent<sup>[46]</sup>在对加拿大魁北克东南部蛇纹岩的研究中也得出了相似的结论。本文所研究的样品普遍具有残余橄榄石, 因此没有出现纤蛇纹石。

(4) 橄榄岩水合反应可能伴随着体积膨胀 40%—50%<sup>[47-50]</sup>。这将会封住矿物反应点处或者其附近的渗透和扩散路径, 导致形成低孔隙度和渗透性的干燥环境<sup>[34]</sup>。这样的干燥环境有利于利蛇纹石形成。

因此, 在所研究的马里亚纳蛇纹石化橄榄岩中, 利蛇纹石出现而纤蛇纹石缺乏的原因不是由这两种矿物的形成和稳定温度所限制的, 而是利蛇纹石形成环境与纤蛇纹石的差异。当有利于利蛇纹石生长的条件不存在时, 如在富流体充填的空隙和裂

隙里, 低温下存在的蛇纹石矿物可能就变成了纤蛇纹石。

## 5 结论

马里亚纳前弧南部橄榄岩经历了一定程度的蛇纹石化, 其组成矿物为橄榄石、角闪石、尖晶石以及利蛇纹石、绿泥石和滑石。结合矿物化学以及观察到的矿物相间的关系, 马里亚纳前弧南部橄榄岩的蚀变过程可以被划分为四个阶段。值得一提的是, 我们观察到了角闪石的蛇纹石化, 这在马里亚纳橄榄岩中是非常独特的, 在该研究区未见其他的研究报道。磁铁矿的缺乏是因为马里亚纳前弧南部橄榄岩的蛇纹石化作用还未进行完全, 此时橄榄石中的富 Fe 端元与水反应形成的是富 Fe 的蛇纹石和水镁石, 而不形成磁铁矿。在橄榄石蛇纹石化反应过程中产生的水镁石, 与后期富 SiO<sub>2</sub> 流体进一步反应形成利蛇纹石, 导致了水镁石在所研究的样品中的缺失。滑石的形成是利蛇纹石与后期富 SiO<sub>2</sub> 流体进一步相互作用的产物。蛇纹石矿物只出现利蛇纹石是由于叶蛇纹石的形成温度较高 (> 500 °C), 纤蛇纹石的缺失是由于其产出模式和生成条件与利蛇纹石存在很大差异, 橄榄岩蛇纹石化初期、干燥、渗透性和孔隙度低的环境是不利于纤蛇纹石形成的。

致谢 感谢日本东京大学李毅斌博士和 Ishii

Teruaki 教授提供的样品。

### 参 考 文 献

- Ranero CR, Morgan JP, McIntosh K, et al. Bending-related faulting and mantle serpentinization at the Middle America trench. *Nature*, 2003, 425: 367—373
- Ewans J, Hawkins J. Petrology of “seamounts” on the trench slope break, EOS, 1979, 60: 968
- Escarf n J, Hirth G, Evans B. Effects of serpentinization on the lithospheric strength and the style of normal faulting at slow-spreading ridges. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 151: 181—189
- Bach W, Paulick H, Garrido CJ, et al. Unraveling the sequence of serpentinization reactions; Petrography, mineral chemistry, and petrophysics of serpentinites from MAR 15° N (ODP Leg 209, Site 1274). *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L13306. doi: 10. 1029/2006GL025681
- Thompson G, Melson WG. Boron contents of serpentinites and metabasalts in the oceanic crust: Implications for the boron cycle in the oceans. *Earth Planet. Sci Lett*, 1970, 8: 61—65
- Snow JE, Dick HJB. Pervasive magnesium loss by marine weathering of peridotite. *Geochim Cosmochim Acta*, 1995, 59: 4219—4235
- Kelley DS, Karson JA, Blackman KD, et al. An off-axis hydrothermal vent field near the Mid-Atlantic Ridge at 30°N. *Nature*, 2001, 412: 145—149
- Holm NG, Charlou JL. Initial indications of abiotic formation of hydrocarbons in the Rainbow ultramafic hydrothermal system, Mid-Atlantic Ridge. *Earth Planet Sci Lett*, 2001, 191: 1—8
- Ishii T, Robinson PT, Maekawa H, et al. Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana forearc. Leg 125. *Proceedings of the Ocean Drilling Program; Scientific Results*, 1992, 125: 445—485
- Parkinson IJ, Pearce JA, Thirlwall MF, et al. Trace element geochemistry of peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc. Leg 125. *Proceedings of the Ocean Drilling Program; Scientific Results*, 1992, 125: 487—506
- Michael JM. Pore water from serpentinite seamounts in the Mariana and Izu-Bonin forearcs. Leg 125; Evidence for volatiles from the subducting slab. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 1992, 125: 373—385
- D'Antonio M, Kristensen MB. Serpentine and brucite of ultramafic clasts from the South Chamorro Seamount (Ocean Drilling Program Leg 195, Site 1200); Inferences for the serpentinization of the Mariana forearc mantle. *Mineralogical Magazine*, 2004, 68(6): 887—904
- Ohara Y, Ishii T. Peridotites from the southern Mariana forearc: Heterogeneous fluid supply in mantle wedge. *The Island Arc*, 1998, 7(3): 541—558
- Chen JB, Zeng ZG. Metasomatism of the peridotites from southern Mariana fore-arc: Trace element characteristics of clinopyroxene and amphibole. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(7): 1005—1012
- Chen JB, Zeng ZG. Petrology and mineralogy of peridotites from the southern Mariana forearc: Implication for the metasomatism of the mantle wedge under Mariana arc. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2007, 27(1): 53—59 (In Chinese)
- Michibayashi K, Tasaka M, Ohara Y, et al. Variable microstructure of peridotite samples from the southern Mariana Trench: Evidence of a complex tectonic evolution. *Tectonophysics*, 2007, 444(1-4): 111—118
- Stern RJ, Fouch MJ, Klemperer SL. An overview of the Izu-Bonin-Mariana subduction factory. In: Eiler J. eds. *Inside the Subduction Factory*. Washington, DC: American Geophysical Union, 2004, 138: 175—223
- Fujoka K, Okino K, Kanamatsu T, et al. Morphology and origin of the Challenger Deep in the Southern Mariana Trench. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29. doi: 10. 1029/2001GL013595
- Fryer P, Becker N, Appelgate B, et al. Why is the Challenger Deep so deep? *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 211: 259—269
- Gvirtzman Z, Stern RJ. Bathymetry of Mariana Trench-arc system and formation of the Challenger Deep as a consequence of weak plate coupling. *Tectonics*, 2004, 23, TC2011. doi: 10. 1029/2003TC001581
- Ishii T. Dredged samples from the Ogasawara fore-arc seamount or ‘Ogasawara paleoland’ — ‘Fore arc ophiolite’. *Formation of Active Ocean Margins*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 1985, 307—342
- Bloomer SH, Fisher RL. Petrology and geochemistry of igneous rocks from the Tonga Trench—a nonaccreting plate boundary. *Journal of Geology*, 1987, 95: 469—495
- Natland JH, Tarney J. Petrologic evolution of the Mariana arc and back-arc basin system; A synthesis of drilling results in the south Philippine Sea. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 1982, 60: 877—908
- Fryer P, Ambos EL, Hussong DM. Origin and emplacement of Mariana forearc seamounts. *Geology*, 1985, 13(11): 774—777
- Fryer P, Saboda KL, Johnson LE, et al. Conical seamount: SeaMARC II, Alvin submersible, and seismic-reflection studies. *Proceedings of the Ocean Drilling Program; Scientific Results*, 1990, 125: 69—80
- Leake BE, Woolley AR, Birch WD, et al. Nomenclature of Amphiboles; Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names. *Mineralogical Magazine*, 1997, 61: 295—321



- 27 Mével G. Serpentinization of abyssal peridotites at mid-ocean ridges. *Geoscience*, 2003, 335: 825—852
- 28 Gahlan HA, Arai S, Ahmed AH, et al. Origin of magnetite veins in serpentinite from the Late Proterozoic Bou-Azzer ophiolite, Anti-Atlas, Morocco: An implication for mobility of iron during serpentinization. *Journal of African Earth Sciences*, 2006, 46: 318—330
- 29 Iyer K, Austrheim H, John T, et al. Serpentinization of the oceanic lithosphere and some geochemical consequences: Constraints from the Leka Ophiolite Complex, Norway. *Chemical Geology*, 2008, 249: 66—90
- 30 Toft PB, Hamed JA, Haggerty SE. The effects of serpentinization on density and magnetic susceptibility: A petrophysical model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1990, (1-2): 137—157
- 31 Bach W, Garrido CJ, Paulick H, et al. Seawater-peridotite interactions: First insights from ODP Leg 209, MAR 15°N. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* (G3), 2004, 5(9): Q09F26
- 32 Evans BW, Johannes W, Oterdoom H, et al. Stability of chrysotile and antigorite in the serpentine multisystem. *Schweiz Mineral Petrogr Mitt*, 1976, 56: 79—93
- 33 Moody JB. Serpentinization: A review. *Lithos*, 1976, 9: 125—138
- 34 Evans BW. The serpentinite multisystem revisited: Chrysotile is metastable. *International Geology Review*, 2004, 46: 479—506
- 35 Nomand C, Williams-Jones AE, Martin RF, et al. Hydrothermal alteration of olivine in a flow-through autoclave: Nucleation and growth of serpentine phases. *American Mineralogist*, 2002, 87: 1699—1709
- 36 Chernosky JV Jr. Aggregate refractive indices and unit cell parameters of synthetic serpentine in the system MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *American Mineralogist*, 1975, 60(3-4): 200—208
- 37 O'Hanley DS, Wicks FJ. Conditions of formation of lizardite, chrysotile and antigorite, Cassiar, British Columbia. *Canadian Mineralogist*, 1995, 33: 753—773
- 38 Wenner DB, Taylor HP. Temperatures of serpentinization of ultramafic rocks based on <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O fractionation between coexisting serpentine and magnetite. *Contrib Mineral Petrol*, 1971, 32: 165—185
- 39 Caruzo L, Chernosky JV. The stability of lizardite. *Canadian Mineralogist*, 1979, 17: 757—769
- 40 O'Hanley DS, Chernosky JV, Wicks FJ. The stability of lizardite and chrysotile. *Canadian Mineralogist*, 1989, 27: 483—493
- 41 Sanford RF. Mineralogical and chemical effects of hydration reactions and applications to serpentinization. *American Mineralogist*, 1981, 66: 290—297
- 42 O'Hanley DS. Fault-related phenomena associated with hydration and serpentine recrystallization during serpentinization. *Canadian Mineralogist*, 1991, 29: 21—35
- 43 O'Hanley DS. Serpentinites: Records of Tectonic and Petrologic History. Oxford, UK: Oxford University Press, 1996, 277
- 44 Prichard HM. A petrographic study of the process of serpentinization in ophiolites and the ocean crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 68: 231—241
- 45 Laurent R, Hébert Y. Paragenesis of serpentine assemblages in harzburgite tectonite and dunitic cumulate from the Quebec Appalachians. *Canadian Mineralogist*, 1979, 17(4): 857—869
- 46 Cogulu E, Laurent R. Mineralogical and chemical variations in chrysotile veins and peridotite host-rocks from the asbestos belt of southern Quebec. *Canadian Mineralogist*, 1984, 22(1): 173—183
- 47 Hostetler PB, Coleman RG, Mumpton FA, et al. Brucite in alpine serpentinites. *American Mineralogist*, 1966, 51: 75—98
- 48 Bogolepov VG. Problem of serpentinization of ultrabasic rocks. *International Geology Review*, 1970, 12: 421—432
- 49 Coleman RG, Keith TE. A chemical study of Serpentinization-Burro Mountain, California. *Journal of Petrology*, 1971, 12: 311—328
- 50 O'Hanley DS. Solution to the volume problem in serpentinization. *Geology*, 1992, 20: 705—708