中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 5 期: 541 ~ 555
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

华北克拉通岩石圈破坏的榴辉岩熔体-橄榄岩反应机制: 实验约束

王超[①②*], 金振民[①], 高山[①], 章军锋[①], 郑曙[①]

① 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;
② 吉林大学化学学院无机合成与制备化学国家重点实验室, 长春 130061
* E-mail: wangchao@cug.edu.cn

收稿日期: 2009-10-26; 接受日期: 2010-04-16
国家自然科学基金(批准号: 40802019, 90714005, 40821061)、教育部和国家外国专家局高等学校学科创新引智计划(编号: B07039)、中国博士后科学基金会基金项目资助

摘要 以碧溪岭榴辉岩和大麻坪尖晶石二辉橄榄岩为起始原料, 在压力 2.0 GPa, 温度 1250~1400℃条件下进行榴辉岩熔体-橄榄岩反应的高温高压实验. 实验结果显示, 在榴辉岩熔体-二辉橄榄岩反应过程中, 熔体消耗橄榄岩中的橄榄石和斜方辉石生成单斜辉石. 实验产物的岩石序列为橄榄岩-辉石岩-石榴辉石岩, 与 Liu 等在华北克拉通内部的汉诺坝地区发现的大量中生代地幔复合包体结构非常吻合. 在温度 1300 和 1350℃时, 榴辉岩熔体-二辉橄榄岩反应产生的熔体具有高镁安山岩的成分特征($Mg^{\#}$>45), 表明榴辉岩熔体-橄榄岩反应可能是高镁安山岩形成的主要原因之一. 实验结果表明华北克拉通下地壳榴辉岩在中生代可能发生过拆沉作用; 榴辉岩拆沉进入软流圈地幔后, 部分熔融产生的熔体可以消耗岩石圈地幔橄榄岩, 导致华北克拉通的减薄, 从而为华北克拉通岩石圈地幔被软流圈地幔改造的熔体-橄榄岩反应机制提供实验约束.

关键词
榴辉岩
橄榄岩
熔体-橄榄岩反应
高 $Mg^{\#}$安山岩
拆沉作用
华北克拉通减薄

目前, 地学界对华北克拉通东部岩石圈地幔自古生代以来发生巨厚减薄已达成共识[1-4]. 但是, 关于华北克拉通岩石圈减薄过程中的动力学问题还存在许多的科学争议, 其中争议较大的问题之一是华北克拉通岩石圈减薄作用机制. 总的来说, 目前对于岩石圈减薄机制的观点基本上可分为两大类: (1) 拆沉模式[5~7]; (2) 热-化学-机械侵蚀模式[8~11]. 纵观已有研究成果, 拆沉模式在解释大陆岩石圈减薄特别是造山带加厚岩石圈减薄作用方面比较成功[12~14]. 自从 Gao 等[7]利用下地壳拆沉模式来解释辽西兴隆沟组埃达克质高 $Mg^{\#}$安山岩的岩石成因以来, 与拆沉作用有关的减薄机制就引起了人们的广泛关注. 这些火山岩不仅具有埃达克质地球化学特征, 而且具有高的 $Mg^{\#}$值, 因此需要拆沉的下地壳榴辉岩部分熔融形成的富 Sr 低 Y 熔体与软流圈橄榄岩相互作用以获得高的 $Mg^{\#}$值. 换言之, Gao 等[7]认为是榴辉岩熔体与地幔橄榄岩的反应形成了辽西等地的高 $Mg^{\#}$安山岩. 闫峻等[15]和 Zhang 等[16~21]在中国东部火山岩中发现的具有明显环带结构的橄榄石、斜方辉石捕掳晶, 特别是具有环带结构的地幔橄榄岩捕虏体, 证实

引用格式: Wang C, Jin Z M, Gao S, et al. Eclogite-melt/peridotite reaction: Experimental constrains on the destruction mechanism of the North China Craton. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-0084-1

了熔体-橄榄岩反应在岩石圈地幔中的确能够发生, 且很可能是岩石圈地幔组成转变, 并快速富集的一种重要方式[16~18,22,23]. 但张宏福[24]认为辽西等地的高$Mg^{\#}$安山岩不一定是拆沉下地壳岩石熔融形成的岩浆与地幔橄榄岩反应的结果. 至少另外两种过程也可以造成同样的效果: (1) 原始岩浆含大量橄榄石捕虏晶, 岩浆消耗橄榄石造成岩浆中 $Mg^{\#}$值的增加, 在随后的岩浆演化过程中又结晶出橄榄石斑晶造成 MgO 的降低, 这一吸收高镁橄榄石结晶出低镁橄榄石的过程无疑造成了残余岩浆中 $Mg^{\#}$值的增加; (2) 原始的玄武岩质岩浆与流纹质岩浆的混合作用也可以形成高 $Mg^{\#}$的安山岩. 另外, Xiong 等[25]认为俯冲板块来源的熔体与上覆地幔橄榄岩的相互作用也可以产生高 Sr 低 Y 特征的埃达克岩.

对玄武岩和橄榄岩相互作用的高温高压实验研究表明, 熔体和地幔橄榄岩的反应存在两种形式[26~28]: (1) 消耗斜方辉石生成橄榄石, 导致熔体向富 Si, Ca, Fe 和贫 Mg 方向演化; (2) 消耗橄榄石生成斜方辉石, 导致熔体向贫 Si, Ca, Fe 和富 Mg 方向演化. Kelemen 等[29]在总结克拉通地幔岩成分特征的基础上, 分析了橄榄岩-熔体反应过程中橄榄石中镍含量变化和橄榄岩中斜方辉石含量的关系以及橄榄石体积变化和孔隙流体等特征, 认为反应方式(1)主要发生在较浅部位, 不可能在岩石圈地幔中普遍存在, 而反应方式(2)才是岩石圈地幔橄榄岩-熔体反应的主要方式. Rapp 等[30]通过实验岩石学研究认为俯冲洋壳部分熔融形成的熔体与地幔橄榄岩相互作用可以产生高 $Mg^{\#}$埃达克质熔体和高 $Mg^{\#}$安山岩. 但是这些研究工作, 主要是针对洋壳俯冲产生的熔体与橄榄岩的相互作用, 与华北克拉通的构造环境和地质特征有所不同. 例如, 俯冲洋壳含有大量水, 而华北克拉通下地壳榴辉岩却是干的. 目前, 还没有针对华北克拉通岩石圈地幔破坏机制进行的高温高压实验研究, 这制约了我们对华北克拉通岩石圈减薄作用过程的动力学机制的深入认识. 所有这些有关华北克拉通破坏机制认识都是在地球化学、地球物理和俯冲洋壳产生的熔体与橄榄岩相互作用的实验研究等间接数据的基础上得出的推论, 存在多解性和不确定性.

已有的研究结果表明, 熔体-橄榄岩的相互作用在华北中生代、新生代岩石圈地幔中很可能普遍存在, 并且可能是岩石圈地幔组成转变和快速富集的重要方式, 应予以足够的重视. 但华北克拉通岩石圈的减薄和改造都是发生在地球深部, 无法直接观测. 从高温高压实验岩石学角度考虑, 我们认为要认清熔体-橄榄岩相互作用是否能够引起华北克拉通岩石圈的减薄和转型, 还需要系统了解在岩石圈地幔中橄榄岩与不同构造背景来源, 不同成分的熔体之间反应的过程和机制是什么, 反应产物的成分特征与华北克拉通中生代、新生代岩石圈地幔及周边火山岩存在什么样的联系和指示意义. 拆沉的下地壳榴辉岩部分熔融产生的熔体与地幔橄榄岩反应是否能够形成辽西等地的高镁火山岩, 其反应产物的矿物组合和熔体性质如何变化; 俯冲或拆沉的大陆中、下地壳来源的熔体与地幔橄榄岩相互作用能否导致华北中生代岩石圈地幔的快速富集; 幔源玄武质熔体与地幔橄榄岩的反应在华北克拉通新生代大洋型岩石圈地幔的形成过程中起到了什么样的作用, 这些问题都有待高温高压实验的进一步证实.

本实验拟以下地壳榴辉岩、地幔尖晶石橄榄岩为初始反应物, 查明它们发生相互反应的温度、压力条件及产物成分特征, 为探讨地壳拆沉模型的合理性和华北克拉通岩石圈地幔破坏的熔体-橄榄岩反应机制提供高温高压实验方面的约束.

1 实验

1.1 起始样品

实验起始原料为大别山碧溪岭的含柯石英榴辉岩和河北大麻坪的新鲜尖晶石二辉橄榄岩. 碧溪岭榴辉岩的矿物组合为石榴石+绿辉石+石英及少量的金红石; 二辉橄榄岩的矿物组合为橄榄石+斜方辉石+单斜辉石+尖晶石. 起始原料的成分和各矿物相含量见表 1. 为避免天然样品颗粒粒度过大的影响, 减少采用天然样品给实验带来的不确定因素, 先对天然新鲜粗粒岩石进行机械粉碎并分选得到矿物单晶, 单晶经过精细研磨后获得单矿物粉末(90%小于 5 μm), 然后按照原岩的矿物比例混合单晶粉末. 所有榴辉岩熔体-橄榄岩反应实验的样品填装均采用双层式, 即样品坩埚的底部先填装一层榴辉岩, 然后在榴辉岩上方填装一层二辉橄榄岩.

1.2 实验条件的选择

由于本实验的目的是模拟拆沉进入软流圈的榴

表 1　实验起始原料的全岩和单矿物化学成分 a)

氧化物	大麻坪二辉橄榄岩(DMP-018)					碧溪岭榴辉岩(D95-25)			
	全岩	Opx	Sp	Ol	Cpx	全岩	Grt	Omp	Qz
SiO_2	44.31	56.26	0.03	41.09	52.98	48.08	39.51	55.86	99.42
TiO_2	0.07	0.11	0.09	0.03	0.51	0.75	0.04	0.05	0.032
Al_2O_3	2.28	3.79	57.01	0.03	6.15	19.31	22.80	10.59	0.039
Cr_2O_3	–	0.32	11.43	0.01	0.84	–	0.03	0.01	–
FeO	–	6.38	11.02	9.92	2.43	0.9	13.32	1.74	0.138
Fe_2O_3	8.66	–	–	–	–	8.32	–	–	0.027
MnO	0.12	0.14	0.12	0.14	0.08	0.15	0.33	0.01	0.015
MgO	42.71	32.26	20.03	48.29	14.18	8.53	9.03	10.03	0.018
CaO	1.68	0.44	0.01	0.02	20.75	10.84	14.13	14.70	0.016
Na_2O	0.26	0.06	0.02	0.01	1.87	2.03	0.02	6.07	–
K_2O	<0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.05	–	–	–
P_2O_5	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	–	–	–
H_2O	–	–	–	–	–	0.68	–	–	–
NiO	–	–	–	–	–	–	0.01	0.02	–
合计	99.85	99.75	99.77	99.55	99.80	99.72	99.22	99.17	99.714

a) 起始榴辉岩矿物组成: 52 wt%石榴石 + 38 wt%绿辉石 + 10 wt%石英 + 少量金红石; 起始橄榄岩矿物组成: 66 wt%橄榄石+ 24 wt%斜方辉石 + 8 wt%单斜辉石 + 2 wt%尖晶石. 表中给出的单矿物的成分为 5~6 个测试点的平均值; Ol, 橄榄石; Opx, 斜方辉石; Cpx, 单斜辉石; Sp, 尖晶石; Grt, 石榴石; Omp, 绿辉石; Qz, 石英, 下同. 单位 wt%

辉岩部分熔融产生的熔体在上升过程中与岩石圈地幔反应, 因此我们以岩石圈内部的压力作为实验压力, 即压力选择 2 GPa(相当于地球内部 70 km). 实验温度的选择是根据 Anderson[31]给出的干二辉橄榄岩和榴辉岩的熔融关系(图 1). 在 2 GPa 压力条件下, 干榴辉岩的固相线温度约为 1150~1200℃, 而干二辉橄榄岩的固相线温度约为 1400℃, 因此我们的实验温度选择在 1250~1400℃(表 1). 如果实验温度低于

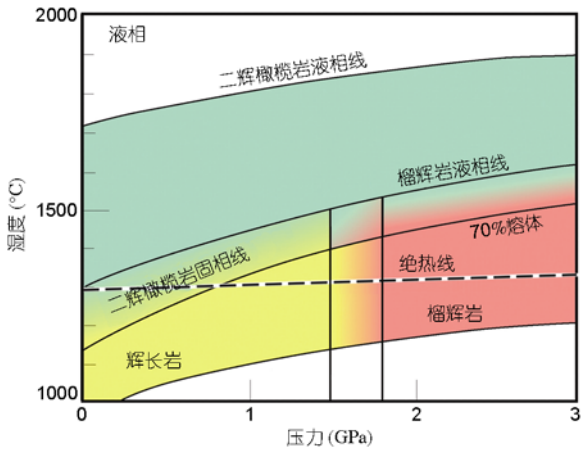

图 1　干二辉橄榄岩和干榴辉岩的熔融关系曲线

虚线为 1300℃时的地幔绝热参考线, 垂直的两条直线为榴辉岩区和辉石岩区的分界线, 两条竖线之间是两种岩石的混合区[31]

1250℃, 则榴辉岩部分熔融产生的熔体的量势必非常少, 很难准确测定榴辉岩部分熔融熔体和二辉橄榄岩反应生成的熔体的成分.

1.3　高温高压实验技术

高温高压实验是在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室的 Quick Press 3.0 活塞-圆筒型压机上进行的. 实验组装件如图 2 所示, 样品坩埚与石墨加热炉之间用 h-BN 隔开. 样品坩埚分为两层, 内层为石墨坩埚(内径 1 mm; 外径 2.8 mm), 外层为铂金坩埚(内径 2.8 mm; 外径 3.0 mm). 在焊封铂金坩埚之前, 将开放的样品坩埚放到 400℃的马弗炉中加热 12 h 以上, 以去除样品及石墨坩埚中的吸附水. 温度监测使用的是 C 型 W5Re-W26Re 热电偶, 根据以前实验室进行的温度校正数据, 本文实验中温度的误差在 10℃以内; 压力误差约在 0.1 GPa 左右. 实验过程中首先将压力以 10 MPa/min 的速度升至 1.8 GPa, 然后升温至 1100℃, 放置 30 min, 待硅硼酸玻璃管彻底软化后将压力升至 2.0 GPa, 最后将温度升至实验温度. 实验完成之后直接关闭加热电源, 将实验样品在 10 s 之内淬火至 200℃以下. 实验结束以后, 取出铂金坩埚, 用慢速据沿着垂直坩埚上下底面的方向切至刚刚露出实验样品(在直径的 1/4 处切开), 然后用环氧树脂粘好进行抛光处理(图 3). 在本文所列出

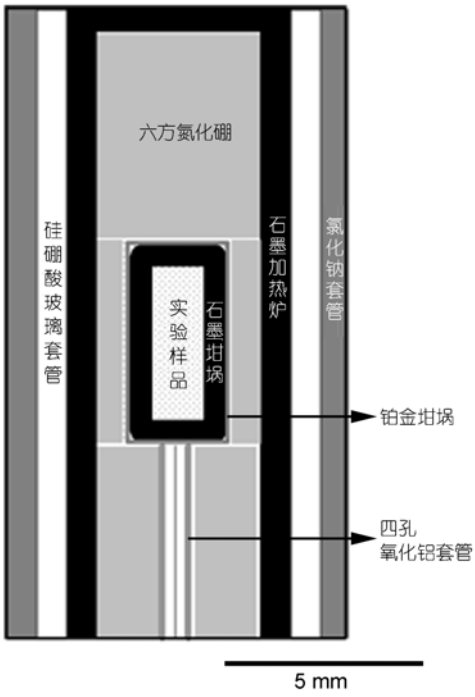

图 2　QuickPress 3.0 活塞-圆筒压机实验组装件示意图

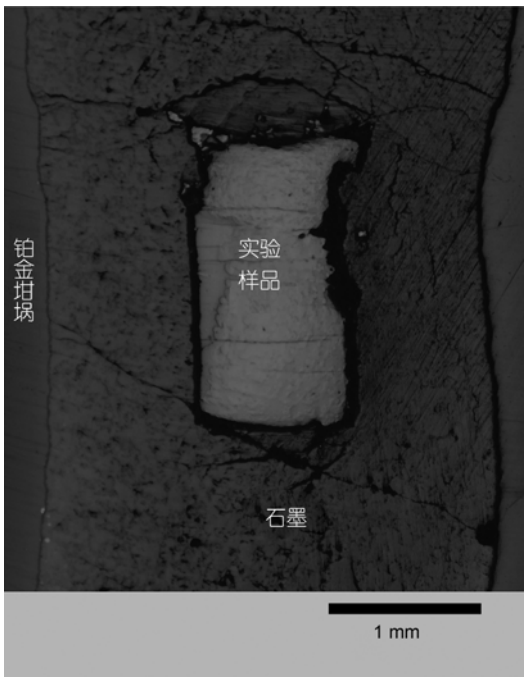

图 3　2.0 GPa, 1300℃条件下榴辉岩熔体-橄榄岩反应实验产物的剖面图

的实验中, 石墨管均保持的非常好, 没有发现熔体和铂金坩埚发生反应的现象.

1.4　化学成分分析

全岩主量元素分析在西北大学教育部大陆动力学重点实验室进行, 采用 XRF(RIGAKU 2100 型)玻璃熔片法完成. 单矿物和实验产物的主量元素在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室的 OL-JXA-8100 电子探针测得. 分析条件为加速电压 15 kV, 电流为 20 nA, 计数时间 10 s. 分析矿物颗粒时, 电子束斑直径采用 1 μm, 并尽量避开淬火时过度生长形成的颗粒边部和颗粒内部的包裹体. 收集熔体成分数据时, 为了减少 Na 含量的流失, 在熔体面积允许的情况下尽量使用大的束斑来收集数据(直径为 5~25 μm), 并在收据收集过程中首先收集 K 和 Na 等元素. 在束斑大于 10 μm 的情况下得到的熔体主量元素的完整度一般在 97 wt%~100 wt%.

2　实验结果

2.1　榴辉岩部分熔融实验

对比榴辉岩部分熔融实验产物中熔体及矿物的成分发现(表 3), 同一实验中, 不同位置的熔体及矿物的成分在误差范围内基本相同, 只是石榴石存在少量环带. 但这些存在环带的石榴石的中心在样品中所占的比例非常小, 可近似认为体系已基本达到平衡. 利用石榴石-单斜辉石温度计[32,33]计算的温度(表 2)与实测温度吻合的非常好, 误差在±25℃以内, 也表明体系基本达到平衡. 其中石榴石的成分采用了无环带石榴石成分的平均值, 以避免环带的影响. 利用记点法得到的榴辉岩部分熔融产物中熔体、单斜辉石、石榴石等相的比例如表 2 所示, 各矿物及熔体的平均化学成分见表 3.

温度为 1250℃时, 实验样品的矿物组合为熔体(7%)+单斜辉石(37%)+石榴石(47%)+斜长石(7%)和石英(2%). 但在 Pertermann 和 Hirschmann[34]的实验中, 石英在 2 GPa, 1185~1225℃就已经消失. 造成上述差别的原因可能是两个实验的起始原料的成分不同. 众所周知, 石英在 2 GPa 条件下的熔点远高于 1250℃. 因此, 本实验中石英是否完全熔融主要取决于熔体中的 SiO_2 是否饱和, 石英仍旧存在说明此时熔体的 SiO_2 已经达到饱和. 温度为 1300 和 1350℃时石英和长石消失, 实验产物为熔体+单斜辉石+石榴石. 温度为 1400℃时, 虽然在实验产物的背散射照

表 2　榴辉岩熔体-橄榄岩反应实验条件及实验产物的矿物组合 a)

实验序号	实验条件				起始原料		产物中的矿物相及比例
	压力 (GPa)	温度 (℃)	计算温度 (℃)	时间 (h)			
012	2.0	1250	1235*, 1245**	72	榴辉岩		Melt(7) + Cpx(37) + Grt(47) + Qz(2) + Pla(7)
015	2.0	1250		72	二辉橄榄岩+榴辉岩	二辉橄榄岩区 石榴辉石岩区 反应区	Ol + Opx + Cpx + Sp Melt(10) + Cpx(37) + Grt(47) + Qz(1) + Pla(5) Cpx + Opx + Ol
017	2.0	1300	1302*, 1324*	72	榴辉岩		Melt(27) + Cpx(38) + Grt(35)
018	2.0	1300		72	二辉橄榄岩+榴辉岩	二辉橄榄岩区 石榴辉石岩区 反应区	Ol + Opx + Cpx + Sp Melt(20) + Cpx(48) + Grt(32) Cpx + Opx + Ol
021	2.0	1350	1332*, 1347*	48	榴辉岩 二辉橄榄岩+榴辉岩	二辉橄榄岩区 石榴辉石岩区 反应区	Melt(60) + Cpx(22) + Grt(8) Ol + Opx + Cpx + Sp Melt(8) + Cpx(54) + Grt(38) Cpx + Opx + Ol
023	2.0	1400		24	榴辉岩 二辉橄榄岩+榴辉岩	二辉橄榄岩区 石榴辉石岩区 反应区	Melt(85) + Cpx(13) + Grt(2) Ol + Opx + Cpx + Sp Melt + Cpx +Grt Cpx + Opx +Ol

a) *温度计算是基于 Ravna[32], **温度计算是基于 Ellis 和 Green[33]给出的石榴石-单斜辉石温度计. Melt, 熔体; Pla, 斜长石, 下同

片上只发现了熔体和单斜辉石, 但是通过质量平衡计算得出体系中还应该存在 2 wt%左右的石榴石. 表明 2 GPa 压力条件下, 干榴辉岩的液相线超过 1400℃.

在 TAS 图解中(图 4), 温度为 1250, 1300, 1350 和 1400℃时产生的熔体分别落在英安岩、玄武质安山岩和玄武岩区域内. 实验产物中各矿物相化学成分随温度的变化如图 5 所示. 随温度的升高, 熔体中 SiO_2, TiO_2, Na_2O 和 K_2O 含量逐渐降低, 而 Al_2O_3, FeO, MgO 和 CaO 的含量逐渐升高, 这与前人的结果一致[34,35].

残余单斜辉石的 Na/(Na+Ca)均小于 0.2, 表明榴辉岩中大部分的 Na 已经进入熔体. 残余单斜辉石中 $Mg^{\#}$和 MgO 含量随温度增加而增加, $Mg^{\#}$由 1250℃时的 74.5, 增加到 1400℃时的 81.4. SiO_2, Al_2O_3, CaO 和 FeO 含量基本保持不变. 残余石榴石中 SiO_2, TiO_2, Al_2O_3 和 MgO 的含量随温度升高而逐渐增加, 而 FeO 和 CaO 的含量则逐渐减小. 说明残余石榴石中的镁铝榴石端元组分与温度呈正相关, 而铁铝榴石和钙铝榴石则呈负相关. 起始原料中石榴石的含量最高(52 wt%), 但是随反应温度的升高石榴石的含量急剧减少, 到 1400℃时只剩下约 2 wt%左右.

2.2　榴辉岩熔体-橄榄岩反应实验

2 GPa, 1250~1350℃条件下, 榴辉岩与二辉橄榄岩反应的实验样品可分为 3 个区域, 分别称为橄榄岩区、石榴辉石岩区和反应区(图 6(a)~(c)). 1400℃的实验中, 熔体被完全消耗, 产物可分为两个区域, 橄榄岩区和石榴辉石岩区(图 6(d)).

(i) 反应区. 实验产物的反应区可以分两层(图 6(a) ~(c)), 靠近橄榄岩区一侧是一条低镁的斜方辉石条带($Mg^{\#}$=84.5~88.6). 在所有实验中这个条带的厚度均无大的变化, 总是保持在 5~10 μm 左右. 低镁斜方辉石条带和石榴辉石岩区之间是杂有少量石榴石的单斜辉石层. 这层单斜辉石的 $Mg^{\#}$大于辉石岩区的单斜辉石, 而小于二辉橄榄岩区的单斜辉石(图 7(a)~(c)), 说明它是橄榄岩熔体反应的产物.

(ii) 橄榄岩区. 在榴辉岩与二辉橄榄岩反应实验中, 榴辉岩部分熔融产生的熔体除了与紧邻的橄榄岩反应之外, 还会通过颗粒边界渗入橄榄岩内部与

表 3　2 GPa, 1250~1400℃条件下榴辉岩部分熔融和榴辉岩熔体-橄榄岩反应实验产物的化学成分(wt%)[a)]

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	NiO	总计	$Mg^{\#}$
榴辉岩部分熔融实验(1250℃)													
Melt	63.36	1.23	17.12	0.00	4.98	0.06	1.74	8.15	2.78	0.34	0.04	99.79	38.6
Cpx	48.33	0.99	13.97	0.05	6.03	0.07	9.79	18.53	1.78	–	0.04	99.58	74.5
Grt	39.65	0.16	22.44	0.04	14.64	0.30	9.19	13.03	0.02	–	0.05	99.52	53.0
Pla	57.45	0.05	26.11	0.00	0.44	0.00	0.08	9.52	5.80	0.09	0.03	99.58	
榴辉岩熔体-二辉橄榄岩反应实验(1250℃)													
反应区													
Opx-条带	54.46	0.22	3.99	0.09	7.39	0.11	31.96	1.38	0.06	0.02	0.17	99.86	88.6
Cpx	50.16	0.27	11.30	0.06	5.74	0.10	12.23	17.88	1.73	–	0.07	99.53	79.3
石榴辉石岩区													
Melt1	62.94	0.73	17.49	0.00	5.06	0.05	2.09	8.48	2.77	0.18	0.06	99.84	42.7
Melt2	63.23	0.75	17.29	0.00	5.07	0.05	2.06	8.41	2.73	0.21	0.05	99.85	42.3
Melt3	63.53	0.73	17.26	0.01	4.99	0.06	1.98	8.54	2.64	0.21	0.04	99.97	41.6
Melt4	63.52	0.76	17.09	0.00	5.08	0.05	2.03	8.35	2.68	0.24	0.05	99.85	41.9
Melt5	63.48	0.78	17.33	0.00	5.04	0.05	1.95	8.22	2.66	0.17	0.00	99.69	41.1
Melt6	63.41	0.74	17.64	0.00	5.15	0.04	1.91	8.24	2.46	0.21	0.05	99.85	40.0
Cpx1	49.90	0.99	11.53	0.07	6.17	0.10	11.14	18.09	1.77	0.00	0.06	99.83	76.5
Cpx2	49.53	0.24	11.96	0.05	6.39	0.10	11.05	19.08	1.46	0.03	0.03	99.91	75.7
Cpx3	49.19	0.52	12.89	0.04	6.28	0.08	10.51	18.66	1.62	0.01	0.05	99.86	75.1
Cpx4	48.47	0.53	13.85	0.03	6.27	0.10	10.07	18.61	1.66	0.00	0.03	99.63	74.3
Cpx5	48.51	0.44	14.80	0.01	6.20	0.06	9.58	18.67	1.57	0.00	0.07	99.91	73.6
Grt1	39.53	0.28	22.33	0.03	15.45	0.34	10.57	10.46	0.05	0.01	0.03	99.09	55.2
Grt2	39.63	0.31	22.35	0.04	15.54	0.33	10.52	10.67	0.00	0.00	0.06	99.45	54.9
Grt3	39.53	0.28	22.33	0.03	15.45	0.34	10.57	10.46	0.05	0.01	0.03	99.09	55.2
Grt4	39.63	0.31	22.35	0.04	15.54	0.33	10.52	10.67	0.00	0.00	0.06	99.45	54.9
Grt5	39.55	0.07	22.59	0.02	15.42	0.28	10.17	11.27	0.02	0.00	0.04	99.44	54.3
二辉橄榄岩区													
Ol1	39.45	0.02	0.10	0.01	11.60	0.10	47.58	0.18	0.00	0.00	0.44	99.48	88.10
Ol2	39.79	0.00	0.05	0.00	10.64	0.12	48.51	0.16	0.00	0.01	0.37	99.65	89.10
Ol3	39.63	0.02	0.08	0.02	10.86	0.10	48.14	0.15	0.01	0.01	0.42	99.97	88.9
Ol4	39.81	0.03	0.06	0.02	10.12	0.11	48.69	0.13	0.02	0.01	0.40	99.41	89.7
Ol5	40.10	0.02	0.07	0.02	9.18	0.14	49.63	0.12	0.01	–	0.38	99.68	90.7
Ol6	40.07	0.02	0.05	0.00	9.21	0.14	49.38	0.12	0.02	0.01	0.39	99.41	90.6
Opx1	55.47	0.10	3.23	0.03	6.52	0.12	33.00	1.11	0.05	0.00	0.16	99.78	90.1
Opx2	55.06	0.11	3.67	0.34	6.03	0.11	33.65	0.48	0.02	0.00	0.09	99.55	90.9
Opx3	55.27	0.11	3.49	0.30	5.96	0.12	33.84	0.40	0.04	–	0.12	99.66	91.1
Cpx1	51.71	0.45	6.23	0.93	3.29	0.06	16.87	18.69	1.72	–	0.11	99.55	90.2
Cpx2	53.47	0.44	5.27	0.90	2.90	0.05	16.05	21.16	1.34	0.00	0.08	101.66	90.9
Cpx3	53.78	0.43	5.34	0.87	2.94	0.07	15.49	20.87	1.58	0.00	0.12	101.48	90.5
Cpx4	53.29	0.46	5.65	0.92	2.97	0.04	15.78	20.53	1.35	0.01	0.10	101.10	90.5
Sp	0.10	0.19	52.96	13.45	13.50	0.08	19.42	0.10	0.00	0.02	0.39	100.22	
榴辉岩部分熔融实验(1300℃)													
Melt	56.30	0.64	18.71	0.00	7.35	0.11	3.21	10.60	2.92	0.11	0.06	99.99	44.0
Cpx	48.02	0.39	13.95	0.05	6.18	0.08	10.90	18.76	1.41	0.01	–	99.75	76.1
Grt	40.10	0.30	22.51	0.02	13.67	0.40	12.71	10.09	0.02	0.00	0.00	99.85	62.6
榴辉岩熔体-二辉橄榄岩反应实验(1300℃)													
反应区													
Opx-条带	52.91	0.15	6.05	0.10	9.56	0.10	28.96	1.84	0.12	–	–	99.79	84.5
Cpx	50.47	0.21	9.75	0.13	7.53	0.13	15.95	14.49	1.11	–	–	99.78	79.2

(续表 3)

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	NiO	总计	$Mg^{\#}$
石榴辉石岩区													
Melt1	54.01	0.70	16.45	0.00	9.44	0.11	6.59	8.94	3.06	0.12	0.00	99.43	55.70
Melt2	53.88	0.69	16.38	0.00	9.34	0.09	6.45	8.79	3.04	0.12	0.00	98.80	55.40
Melt3	54.24	0.71	16.38	0.00	9.37	0.08	6.33	8.82	2.87	0.13	0.00	98.92	54.90
Melt4	53.71	0.66	16.52	0.01	9.25	0.09	6.12	8.80	2.77	0.11	0.00	98.04	54.40
Melt5	54.23	0.69	16.79	0.00	9.24	0.10	5.42	8.95	3.12	0.14	0.00	98.67	51.40
Melt6	53.73	0.73	16.63	0.01	9.33	0.08	5.68	9.12	3.16	0.13	0.00	98.59	52.30
Melt7	54.41	0.73	16.83	0.02	9.23	0.10	5.06	8.69	3.14	0.13	0.00	98.34	49.7
Cpx1	49.74	0.24	11.39	0.09	6.72	0.12	14.12	16.29	1.13	0.01	0.00	99.84	79.1
Cpx2	48.75	0.24	12.71	0.03	6.29	0.09	12.17	18.40	1.22	0.00	0.00	99.89	77.7
Cpx3	49.18	0.22	12.11	0.09	6.54	0.11	13.25	17.17	1.11	0.00	0.00	99.78	78.5
Cpx4	47.26	0.28	14.99	0.07	6.14	0.10	11.19	18.39	1.25	0.01	0.00	99.70	76.6
Cpx5	46.60	0.28	16.19	0.05	6.14	0.11	10.36	18.95	1.14	0.02	0.00	99.85	75.2
Cpx6	45.79	0.28	17.17	0.04	6.21	0.05	9.88	19.17	1.20	0.00	0.00	99.79	74.1
Cpx7	46.79	0.27	15.79	0.02	6.23	0.11	10.29	19.10	1.10	0.01	0.00	99.69	74.8
Cpx8	47.34	0.28	15.15	0.03	6.18	0.12	10.70	18.90	1.17	0.00	0.00	99.88	75.7
Grt1	40.58	0.20	22.88	0.10	12.87	0.33	15.25	7.23	0.00	0.00	0.00	99.44	68.1
Grt2	40.81	0.20	22.93	0.12	12.64	0.33	15.91	6.85	0.01	0.00	0.00	99.81	69.4
Grt3	40.77	0.21	22.81	0.14	12.68	0.32	15.81	6.86	0.02	0.01	–	99.62	69.2
Grt4	40.66	0.24	22.71	0.07	13.13	0.31	14.97	7.39	0.00	0.00	0.00	99.49	67.2
Grt5	40.77	0.24	22.95	0.01	13.35	0.34	14.59	7.28	0.03	0.00	0.00	99.56	66.3
橄榄岩区													
Ol1	40.09	0.04	0.14	0.02	14.66	0.07	44.64	0.24	0.02	0.01	0.00	99.94	84.6
Ol2	40.21	0.04	0.14	0.03	13.70	0.10	45.50	0.23	0.02	0.01	–	99.97	85.7
Ol3	40.32	0.04	0.14	0.03	12.75	0.12	46.36	0.23	0.02	0.00	0.00	100.00	86.7
Ol4	40.93	0.04	0.12	0.04	10.01	0.09	48.33	0.23	0.04	0.00	0.00	99.80	89.7
Ol5	40.70	0.03	0.12	0.05	9.94	0.12	48.64	0.20	0.02	0.00	0.00	99.81	89.8
Ol6	40.74	0.04	0.12	0.06	9.62	0.11	48.98	0.20	0.02	0.00	–	99.89	90.2
Ol7	40.50	0.03	0.08	0.06	9.38	0.12	49.48	0.22	0.01	0.00	0.00	99.88	90.5
Ol8	40.55	0.06	0.11	0.02	9.68	0.10	49.00	0.22	0.02	0.00	0.00	99.77	90.1
Opx1	55.44	0.13	3.78	0.38	6.02	0.12	33.43	0.54	0.07	0.00	0.00	99.91	90.9
Opx2	55.41	0.08	3.47	0.31	6.05	0.12	34.04	0.41	0.01	0.03	0.00	99.91	91.0
Opx3	55.50	0.10	3.42	0.27	5.99	0.16	33.83	0.46	0.03	0.00	0.00	99.75	91.1
Opx4	55.61	0.10	3.30	0.27	6.02	0.13	34.00	0.41	0.02	0.01	–	99.88	91.0
Cpx1	51.49	0.67	7.36	0.71	3.77	0.08	18.55	15.56	0.99	0.00	0.00	99.18	89.9
Cpx2	51.98	0.43	5.66	0.85	2.90	0.07	15.55	20.72	1.30	0.00	0.00	99.45	90.6
Cpx3	52.77	0.40	5.50	0.67	3.90	0.07	20.98	14.31	0.87	–	–	99.48	90.6
Sp	0.21	0.20	52.87	15.24	8.10	0.11	21.94	0.01	0.03	0.00	0.44	99.12	
榴辉岩部分熔融实验(1350℃)													
Melt	53.68	0.52	18.82	0.00	8.82	0.14	5.07	9.91	2.32	0.06	0.00	99.34	50.9
Cpx	47.98	0.22	14.02	0.09	6.26	0.10	11.70	18.72	1.41	–	0.04	100.54	77.1
Grt	40.13	0.08	23.77	0.03	13.22	0.36	15.02	8.16	0.01	0.00	0.00	100.78	67.2
榴辉岩熔体-二辉橄榄岩反应实验(1350℃)													
反应区													
Opx-条带	51.82	0.23	7.07	0.15	8.80	0.13	29.34	1.97	0.11	0.00	0.19	99.80	85.7
Cpx1	51.34	0.44	9.83	0.15	5.82	0.05	18.00	12.90	1.07	0.00	0.09	99.7	84.80
Cpx2	50.93	0.33	9.64	0.07	6.32	0.10	17.77	13.60	1.02	0.00	0.18	99.77	83.5
Cpx3	51.14	0.38	9.74	0.11	6.07	0.08	17.88	13.25	1.04	0.00	0.13	99.73	84.10
Grt1	41.99	0.39	22.92	0.12	9.56	0.22	19.01	5.67	0.05	0.02	0.05	99.99	78.20
Grt2	41.46	0.24	23.53	0.12	9.97	0.22	18.66	5.39	0.01	0.01	0.04	99.65	77.10
Grt3	41.22	0.31	23.55	0.10	9.84	0.21	18.86	5.62	0.03	0.00	0.10	99.83	77.5

(续表 3)

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	NiO	总计	$Mg^{\#}$
石榴辉石岩区													
Melt1	52.66	0.74	18.08	0.00	9.48	0.12	6.69	8.01	3.81	0.19	0.06	99.84	56.00
Melt2	52.85	0.74	17.64	0.00	9.45	0.12	6.49	8.01	3.82	0.13	0.05	99.31	55.30
Melt3	53.75	0.73	18.02	0.00	9.36	0.07	5.73	7.89	3.69	0.20	0.05	99.48	52.4
Melt4	52.99	0.78	18.21	0.00	9.52	0.11	5.01	7.69	3.78	0.20	0.03	98.33	48.7
Cpx4	49.32	0.16	10.23	0.11	5.89	0.09	14.56	15.76	1.33	0.00	0.07	97.52	81.6
Cpx5	48.10	0.25	13.53	0.03	6.28	0.11	12.39	18.15	1.32	0.00	0.08	100.25	78.0
Cpx6	48.21	0.30	13.08	0.09	6.33	0.11	12.62	17.84	1.23	0.01	0.04	99.86	78.2
Cpx6	48.13	0.26	13.36	0.07	6.30	0.10	12.42	18.10	1.30	0.01	0.07	100.09	78.0
Grt4	40.44	0.18	23.40	0.09	12.49	0.30	16.68	6.11	0.02	0.00	0.06	99.76	70.6
Grt5	40.85	0.20	23.36	0.07	12.79	0.29	16.59	6.01	0.01	0.00	0.01	100.19	70.0
Grt6	40.47	0.19	23.37	0.07	13.50	0.37	14.74	7.04	0.00	0.02	0.06	99.82	65.6
Grt7	40.44	0.22	23.00	0.08	13.63	0.35	15.32	6.97	0.01	0.00	0.03	100.03	66.9
Grt8	40.45	0.21	23.18	0.07	13.36	0.36	15.53	7.05	0.01	0.01	0.05	100.28	67.7
橄榄岩区													
Ol1	39.51	0.03	0.09	0.02	13.02	0.13	46.22	0.22	0.00	0.02	0.28	99.53	86.50
Ol2	39.44	0.04	0.08	0.03	12.33	0.11	46.92	0.16	0.01	0.00	0.42	99.54	87.3
Ol3	39.90	0.00	0.09	0.00	12.05	0.13	48.04	0.21	0.01	0.00	0.37	100.79	87.8
Ol4	39.66	0.02	0.13	0.04	11.85	0.13	47.81	0.24	0.00	0.00	0.39	100.26	87.90
Ol5	40.05	0.03	0.12	0.02	11.44	0.12	47.84	0.19	0.00	0.00	0.41	100.23	88.30
Ol6	40.56	0.02	0.13	0.04	10.00	0.11	48.90	0.21	0.03	0.00	0.40	100.39	89.80
Ol7	40.16	0.05	0.12	0.01	10.04	0.11	48.25	0.23	0.01	0.00	0.36	99.34	89.6
Opx1	52.31	0.23	6.21	0.27	7.84	0.13	29.68	1.90	0.13	0.00	0.19	98.89	87.2
Opx2	51.53	0.23	7.85	0.13	7.61	0.10	29.97	1.69	0.16	0.00	0.15	99.43	87.6
Opx3	53.21	0.16	4.78	0.29	7.71	0.13	31.18	1.32	0.15	0.01	0.15	99.07	87.9
Opx4	53.65	0.19	4.39	0.30	6.89	0.13	31.91	1.72	0.17	0.00	0.13	99.50	89.3
Opx5	54.62	0.13	3.47	0.34	6.87	0.06	32.85	0.89	0.11	0.00	0.18	99.52	89.6
Cpx7	48.25	0.35	6.70	0.43	6.21	0.11	22.44	12.73	0.83	0.00	0.13	98.2	86.7
Cpx8	49.25	0.35	6.70	0.43	4.61	0.11	21.44	14.73	0.83	0.00	0.13	98.59	89.3
Sp	0.08	0.26	54.60	13.53	10.57	0.11	20.00	0.02	0.00	0.00	0.36	99.52	
榴辉岩部分熔融实验(1400℃)													
Melt	47.74	0.39	19.29	0.00	10.37	0.19	7.30	12.21	1.36	0.05	0.02	98.91	55.9
Cpx	47.26	0.18	14.31	0.12	5.38	0.16	13.11	18.47	0.64	0.00	0.03	99.65	81.4
榴辉岩熔体-二辉橄榄岩反应实验(1400℃)													
石榴辉石岩区													
Ol1	39.11	0.05	0.08	0.01	14.10	0.14	45.70	0.29	0.00	0.00	0.00	99.5	85.4
Opx1	52.19	0.13	8.44	0.23	8.84	0.12	27.52	2.20	0.17	0.00	0.00	99.80	84.9
Cpx1	51.76	0.15	7.09	0.72	6.25	0.11	21.72	11.21	0.66	0.00	0.00	99.67	86.2
Cpx2	51.01	0.22	8.44	0.18	6.04	0.12	19.51	13.54	0.74	0.00	0.00	99.79	85.3
Cpx3	50.97	0.18	8.97	0.15	6.37	0.13	19.65	12.77	0.69	0.00	0.00	99.86	84.7
Cpx4	50.23	0.16	8.25	0.10	6.29	0.14	19.37	13.36	0.71	0.00	0.00	98.61	84.7
Cpx5	51.13	0.15	8.30	0.16	6.52	0.15	20.27	12.09	0.74	0.00	0.00	99.51	84.8
Cpx6	51.49	0.14	7.40	0.10	5.91	0.12	19.49	14.01	0.80	0.01	0.00	99.47	85.6
Cpx7	50.97	0.18	8.97	0.15	6.37	0.13	19.65	12.77	0.69	0.00	0.0	99.9	84.7
Grt1	41.84	0.15	23.26	0.24	8.26	0.22	20.22	5.47	0.02	0.01	0.0	99.7	81.5
Grt2	41.82	0.15	23.23	0.22	8.41	0.19	20.34	5.35	0.00	0.00	0.0	99.7	81.3
Grt3	41.65	0.19	23.29	0.28	8.48	0.19	20.09	5.21	0.00	0.02	0.0	99.4	81
Grt4	41.70	0.21	23.03	0.29	8.45	0.24	20.29	5.27	0.00	0.01	0.0	99.5	81.2
橄榄岩区													
Ol2	39.37	0.03	0.11	0.00	13.86	0.16	45.94	0.25	0.03	0.00	0.00	99.73	85.6
Ol3	39.85	0.03	0.07	0.00	13.68	0.14	45.74	0.31	0.01	0.01	0.00	99.83	85.8

(续表 3)

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	NiO	总计	$Mg^{\#}$
橄榄岩区													
Ol4	39.51	0.03	0.11	0.02	13.51	0.12	46.28	0.29	0.00	0.00	0.00	99.87	86.0
Ol5	39.46	0.01	0.05	0.00	13.33	0.09	46.34	0.25	0.00	0.00	0.00	99.5	86.2
Ol6	39.17	0.00	0.11	0.01	13.72	0.11	46.32	0.28	0.01	0.01	0.00	99.74	85.9
Ol6	39.54	0.00	0.11	0.02	13.27	0.11	46.47	0.21	0.00	0.02	0.00	99.76	86.3
Ol7	39.83	0.02	0.10	0.02	12.03	0.11	47.29	0.22	0.00	0.00	0.00	99.616	87.6
Ol8	39.32	8.00	0.11	0.02	11.83	0.10	48.03	0.22	0.00	0.00	0.00	99.7	88.0
Ol9	39.92	0.02	0.11	0.02	11.43	0.10	48.12	0.20	0.00	0.00	0.00	99.93	88.3
Ol10	40.01	0.03	0.12	0.10	10.58	0.11	48.48	0.26	0.01	0.01	0.00	99.72	89.2
Ol11	39.88	0.02	0.14	0.09	9.62	0.09	49.31	0.24	0.04	0.01	0.00	99.43	90.2
Ol12	40.33	0.05	0.11	0.06	9.47	0.11	49.12	0.25	0.00	0.00	0.00	99.52	90.3
Ol13	40.49	0.03	0.18	0.06	9.42	0.10	48.85	0.27	0.00	0.03	0.00	99.44	90.3
Opx2	52.39	0.13	7.44	0.23	7.84	0.12	29.25	2.06	0.16	0.00	0.00	99.61	87.0
Opx3	52.36	0.21	8.01	0.28	6.81	0.10	29.44	2.09	0.18	0.00	0.00	99.49	88.6
Opx4	55.42	0.09	3.21	0.30	6.24	0.13	33.65	0.44	0.04	0.00	0.00	99.52	90.7
Opx5	55.31	0.11	3.50	0.30	6.16	0.11	33.40	0.52	0.04	0.00	0.00	99.44	90.7
Opx6	55.68	0.10	3.33	0.28	6.04	0.14	34.04	0.37	0.01	0.00	0.00	100.00	91.0
Cpx8	51.43	0.16	7.97	0.17	6.38	0.13	20.58	12.22	0.61	0.01	0.00	99.64	85.3
Cpx9	51.76	0.15	7.09	0.72	6.25	0.11	21.72	11.21	0.66	0.00	0.00	99.67	86.2
Cpx10	50.84	0.38	8.51	0.44	5.01	0.12	19.06	14.58	0.83	0.00	0.00	99.76	87.3
Cpx11	50.47	0.35	8.84	0.29	5.35	0.11	20.04	13.45	0.79	0.00	0.00	99.7	87.1
Cpx12	48.27	0.14	5.57	0.58	7.05	0.10	28.12	9.09	0.54	0.00	0.0	99.446	87.8
Cpx13	51.49	0.24	7.35	0.90	4.29	0.08	20.54	14.35	0.57	0.01	0.00	99.8	89.6
Cpx14	51.19	0.27	7.55	0.80	4.49	0.10	20.61	13.87	0.60	0.00	0.0	99.476	89.2
Sp	0.17	0.19	53.76	13.60	10.59	0.12	19.89	0.02	0.00	0.02			

a) 产物中所有的 Fe 均被当作 Fe^{2+}; $Mg^{\#}=Mg/(Mg+Fe^{2+})\times100$; 榴辉岩部分熔融实验体系均达到平衡, 故此给出的熔体和矿物的化学成分均为平均值. 榴辉岩与橄榄岩反应实验中, 体系没有达到平衡, 故此给出的数据均为单点分析.

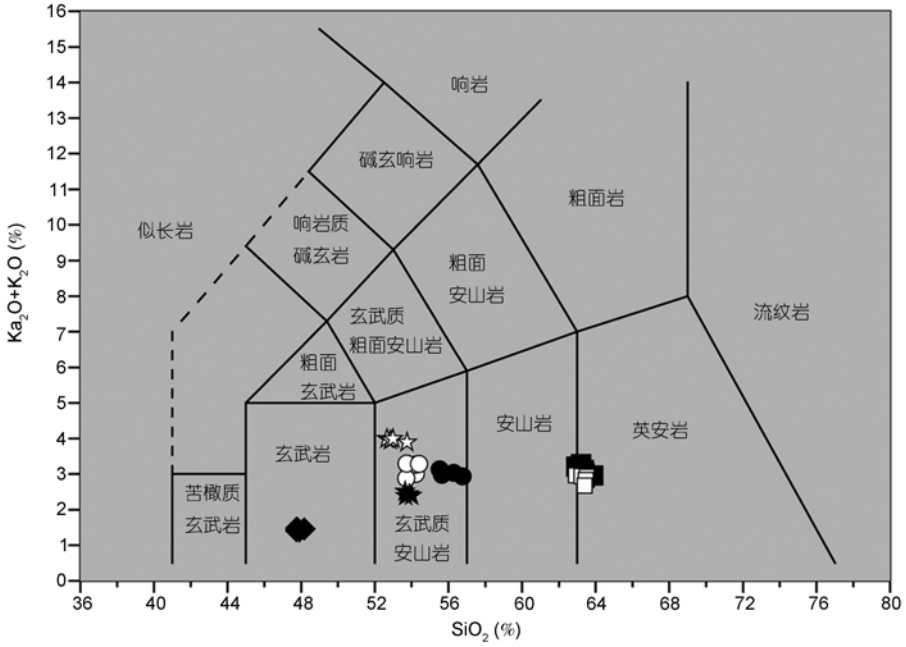

图 4　不同条件下产生的熔体 SiO_2-(K_2O+Na_2O)图解

■, ●, ★和◆分别为 1250, 1300, 1350 和 1400℃时榴辉岩部分熔融产生的熔体; □, ○和☆分别为 1250, 1300 和 1350℃榴辉岩熔体-橄榄岩反应产生的熔体

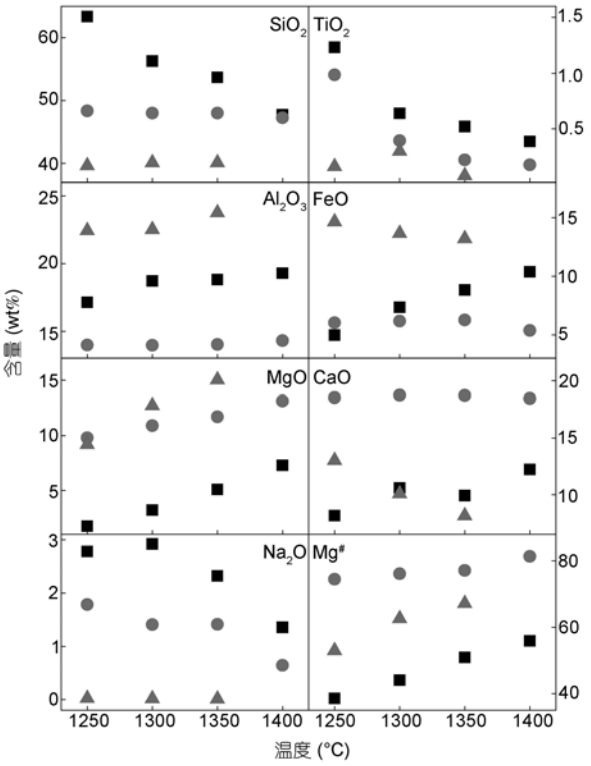

图 5　榴辉岩部分熔融产物成分随温度的变化

■为熔体, ●为单斜辉石, ▲为石榴石

橄榄岩发生相互作用. 橄榄岩中随着距反应区的距离的减小, 橄榄石、斜方辉石和单斜辉石的 $Mg^{\#}$均逐渐减小(图 7(a)~(d)), 而其 CaO 和 FeO 含量则逐渐增加, 表现出典型的成分扩散作用的特征. 这说明富硅榴辉岩熔体和橄榄岩的反应将导致橄榄岩向富 Ca, Fe 和贫 Mg 的方向演化.

(iii) 石榴辉石岩区. 石榴辉石岩区的熔体、单斜辉石和石榴石的 $Mg^{\#}$与距反应区的距离存在明显的相关性(图 7(a)~(d)), 越靠近反应区它们的 $Mg^{\#}$越高, 表明体系没有完全达到平衡. 但在反应区附近, 我们可以近似的认为熔体和矿物之间已经达到平衡. 因此, 下文中我们均采用反应区附近的熔体、单斜辉石和橄榄石的成分作为熔体-橄榄岩反应的结果.

1250℃辉石岩区的矿物组合为熔体+单斜辉石+石榴石+长石+石英. 与榴辉岩部分熔融实验相似, 当温度超过 1300℃时, 长石和石英消失. 1250, 1300 和 1350℃时产物中熔体的 $Mg^{\#}$分别为 42.7, 55.7 和 56. 在 TAS 图解上, 1250℃实验的熔体落入安山岩区域, 而 1300 和 1350℃实验的熔体落入玄武安山岩区域. 这说明在 1300 和 1350℃时, 榴辉岩熔体-橄榄岩反应形成的熔体属于高 $Mg^{\#}$安山岩($Mg^{\#}$>45[7]). 榴辉岩部分熔融实验产生的熔体与榴辉岩熔体-橄榄岩反应实验产生的熔体之间的成分差异如图 8 所示. 可以看到, 榴辉岩熔体与橄榄岩反应之后将导致熔体、单斜辉石和石榴石向 $Mg^{\#}$增加, CaO 含量减小的方向演化. 值得注意的是, 相对于部分熔融实验, 榴辉岩熔体-橄榄岩反应之后石榴辉石岩区熔体的比例急剧下降, 而单斜辉石和石榴石的比例则明显升高. 温度大于 1300℃的实验中, 这种现象尤为明显. 这说明, 在榴辉岩熔体与橄榄岩反应的同时, 由于熔体成分的变化将导致大量的单斜辉石和石榴石从熔体中结晶出来.

3　讨论

3.1　榴辉岩熔体-橄榄岩反应的机制

起始原料中各矿物是均匀混合的, 因此从样品的结构上可以很容易的看出位于反应区的斜方辉石条带和含有石榴石的单斜辉石层都是榴辉岩熔体-橄榄岩反应的结果. 关于富硅熔体和橄榄岩之间的反应, 前人已经做了一些研究[29,36,37]. 与我们的实验结果不同, 在这些实验中富硅熔体-橄榄岩反应的结果均是消耗橄榄石生成斜方辉石. 从化学成分角度看, 斜方辉石较单斜辉石富 Mg 和 Fe, 贫 Ca 和 Na. 因此, 榴辉岩熔体和二辉橄榄岩反应是生成斜方辉石, 还是生成单斜辉石, 应取决于熔体能否提供足够的 Ca 和 Na. 从表 3 可以看出, 即使在榴辉岩部分熔融程度很低的情况下, 绿辉石也会转变成普通辉石, 使大量的 Na 进入熔体. 另外, 碧溪岭榴辉岩的 CaO 含量较高(表 4). 因此, 我们认为起始榴辉岩的化学组成, 特别是 Ca 含量是决定榴辉岩熔体和橄榄岩反应产物的关键, 即起始榴辉岩如果富 Ca 则生成单斜辉石, 否则生成斜方辉石. 但榴辉岩熔体-橄榄岩反应是一个比较复杂的过程. 在反应的初始阶段, 熔体应该是消耗橄榄石和斜方辉石生成单斜辉石. 随着反应的进行, 熔体中的 CaO 含量急剧降低, 形成高硅而低钙的熔体. 此时的熔体消耗橄榄石生成斜方辉石, 并与残余的单斜辉石和石榴石发生 Ca-Mg 交换导致残余的单斜辉石和石榴石的 $Mg^{\#}$增加, 导致熔体的 CaO 浓度再次回升, 其结果是消耗先前生成的斜方辉石生成单斜辉石. 因此, 采用分步平衡的方法[38], 可近似

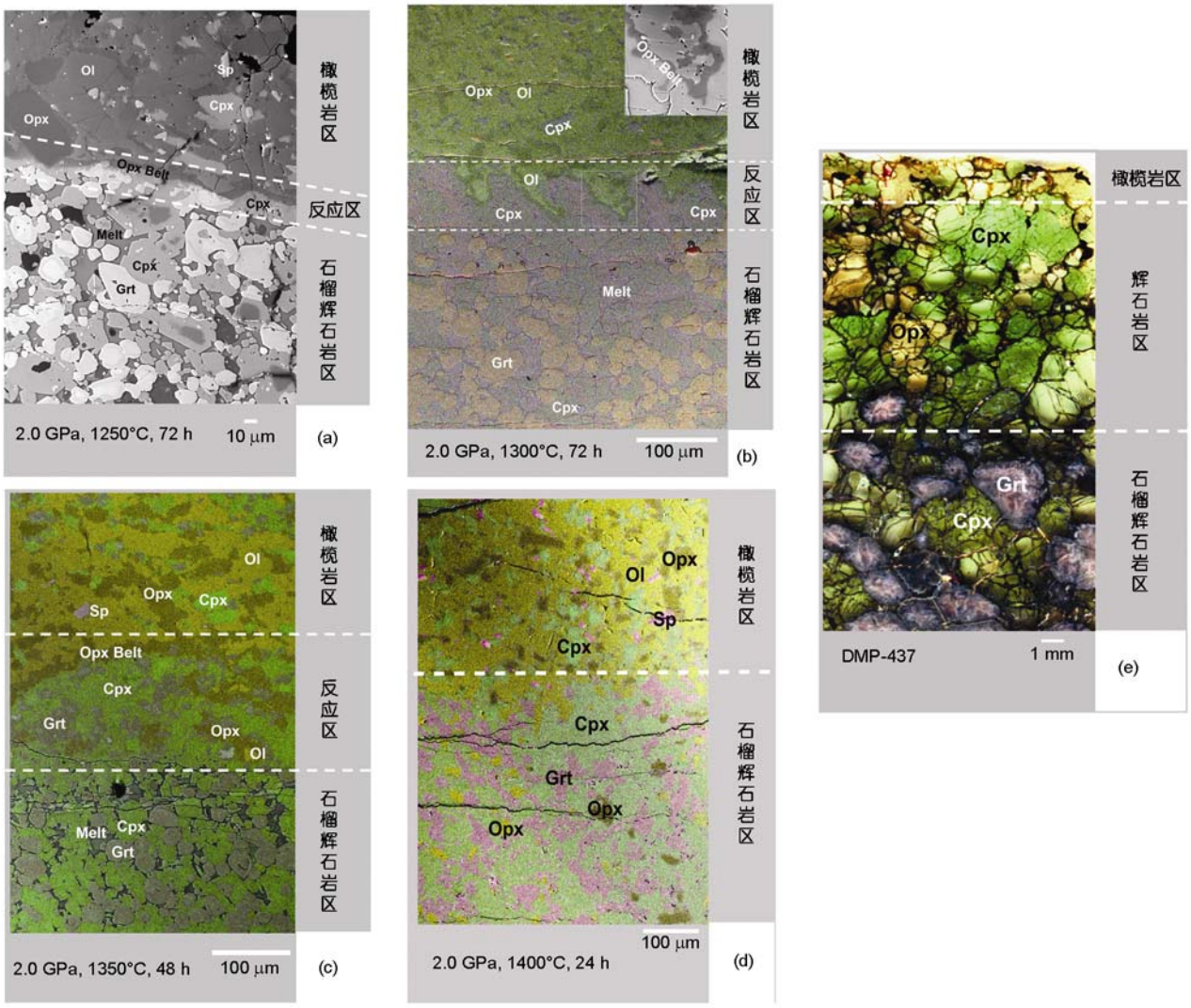

图 6　榴辉岩熔体-橄榄岩反应产物

(a) 1250℃时榴辉岩部分熔融熔体-橄榄岩反应产物的电子背散射图片; (b)~(d)分别为 1300, 1350 和 1400℃时榴辉岩部分熔融熔体-橄榄岩反应产物的电子背散射图像和面扫面成分图像的叠加; (e) 大麻坪复合橄榄岩包体的显微构造照片(DMP-347)[39]

的将榴辉岩熔体和橄榄岩反应的过程分成 4 个阶段:

第 1 阶段: Ol + Melt1 → Cpx + Melt2;

第 2 阶段: Ol + Melt2 → Opx + Melt3;

第 3 阶段: Melt3 + 残余高钙 Cpx + Grt → Melt4 + 高镁低钙 Cpx + Grt (残余 Cpx 和熔体之间的 Ca-Mg 交换);

第 4 阶段: Melt4 + Opx → Cpx + Melt5;

其中, Melt1 可视为榴辉岩部分熔融产生的熔体, Melt5 为榴辉岩部分熔融熔体和橄榄岩反应产物中的熔体, Melt2, Melt3 和 Melt4 是为了清楚的描述榴辉岩部分熔融熔体-橄榄岩反应的过程而人为虚拟"过度阶段"的熔体.

3.2　对拆沉作用和华北克拉通破坏的启示

我们的实验产物, 如果除去熔体将形成石榴辉石岩+单斜辉石岩+橄榄岩的结构(图 6(a)~(c)), 与 Liu 等[39]在华北克拉通内部的汉诺坝地区发现的大量地幔复合包体的结构非常吻合(图 6(e)). 从而证明汉诺坝地幔复合包体可能是华北克拉通下地壳拆沉进入软流圈后发生部分熔融熔体和地幔橄榄岩相互作用

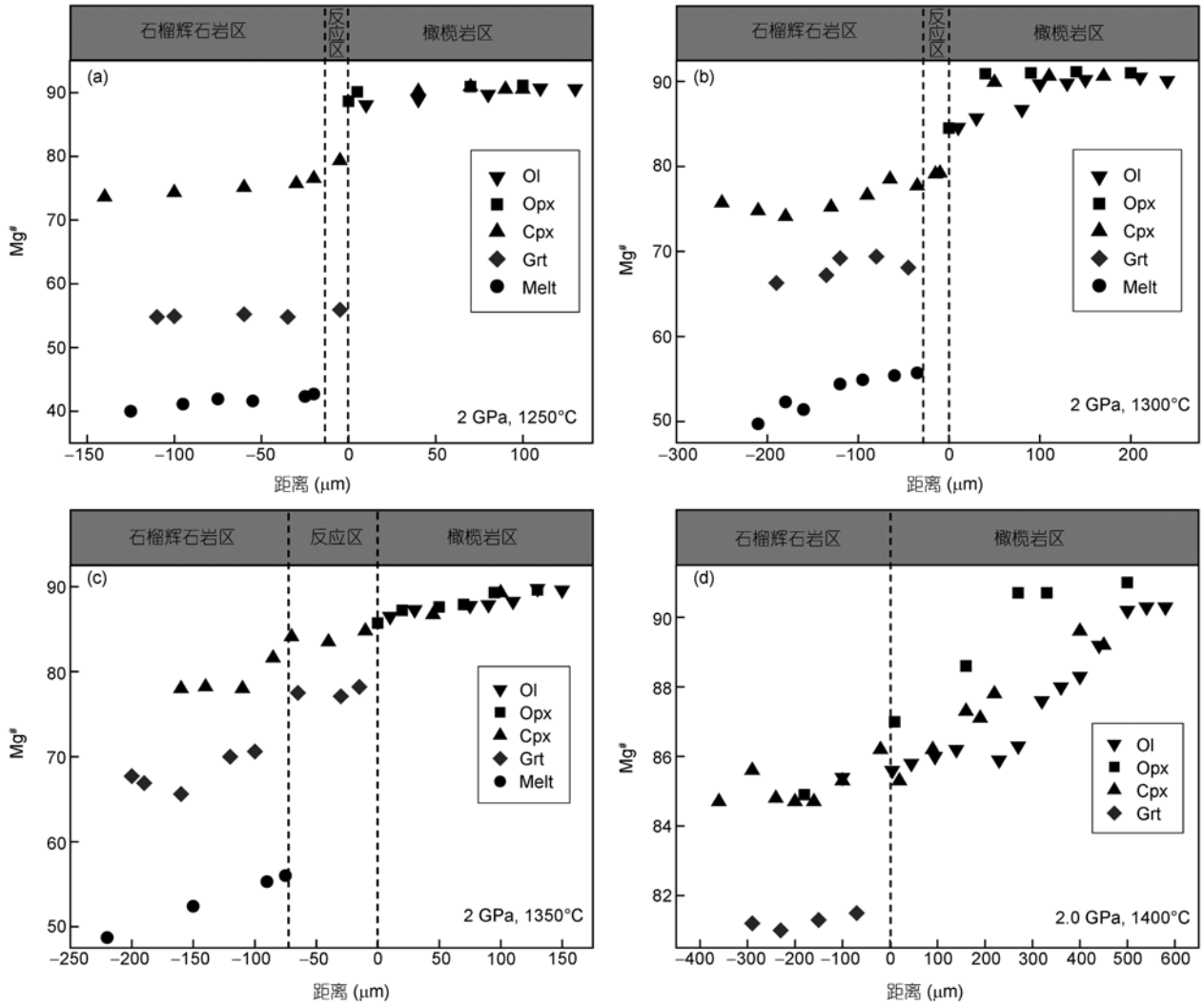

图 7　不同实验产物中熔体和各矿物的 $Mg^{\#}$到低镁单斜辉石条带/橄榄岩接触面距离的变化

低镁单斜辉石条带/橄榄岩接触面处距离=0; (a)~(d)分别为 1250, 1300, 1350 和 1400℃时榴辉岩部分熔融熔体-橄榄岩反应产物中各矿物相的 $Mg^{\#}$的变化

的结果.

3.3　对高$Mg^{\#}$安山岩成因的启示

在温度为 1300 和 1350℃时, 榴辉岩熔体-橄榄岩反应产生的熔体具有高 $Mg^{\#}$安山岩的成分特征($Mg^{\#}$=56), 与辽西兴隆沟组、义县组和彰武地区的高$Mg^{\#}$安山岩非常相似[7,40,41], 但后者的 K_2O 含量明显偏高(2%~3%). 因此, 榴辉岩熔体-橄榄岩反应可能是形成高镁安山岩的主要机制之一. 已有实验研究表明, 榴辉岩在较高压力条件下(>3 GPa)的低度部分熔融作用可以产生富钾的熔体[35]. 因此, 辽西的高$Mg^{\#}$安山岩可能是榴辉岩在较高压力下部分熔融的熔体与地幔橄榄岩反应的结果.

4　结论

通过榴辉岩熔体与橄榄岩反应的高温高压实验研究得出如下认识:

榴辉岩熔体-橄榄岩反应产物与汉诺坝地幔复合包体具有相同的结构, 表明中生代华北克拉通下地壳可能发生过拆沉作用. 拆沉榴辉岩部分熔融熔体与岩石圈地幔反应导致华北克拉通的减薄.

表 4　本实验和前人实验中所使用的玄武质起始原料的成分 [a)]

氧化物	B95-25	AB-1	GA1	MONT147
SiO_2	48.08	51.19	50.35	54.86
TiO_2	0.75	1.18	1.49	0.77
Al_2O_3	19.31	16.62	16.53	18.78
Cr_2O_3	–	–	–	–
FeO	0.9	11.32	9.83	8.96
Fe_2O_3	8.32	–	–	–
MnO	0.15	0.23	0.17	0.21
MgO	8.53	6.59	7.94	3.66
CaO	10.84	5.49	9.60	8.80
Na_2O	2.03	4.33	3.49	3.08
K_2O	0.05	0.82	0.44	0.78
P_2O_5	0.08	–	0.16	0.14
H_2O	0.68	–	–	–
NiO	–	–	–	–
CaO/SiO_2	0.23	0.11	0.19	0.16
总计	99.72	99.30	100	100.02

a) 单位: wt%. B95-25 为本研究数据; Ab-1, Kelemen 等[29]; GA1, Yaxley 和 Green[36]; MONT147, Morgan 等[37]

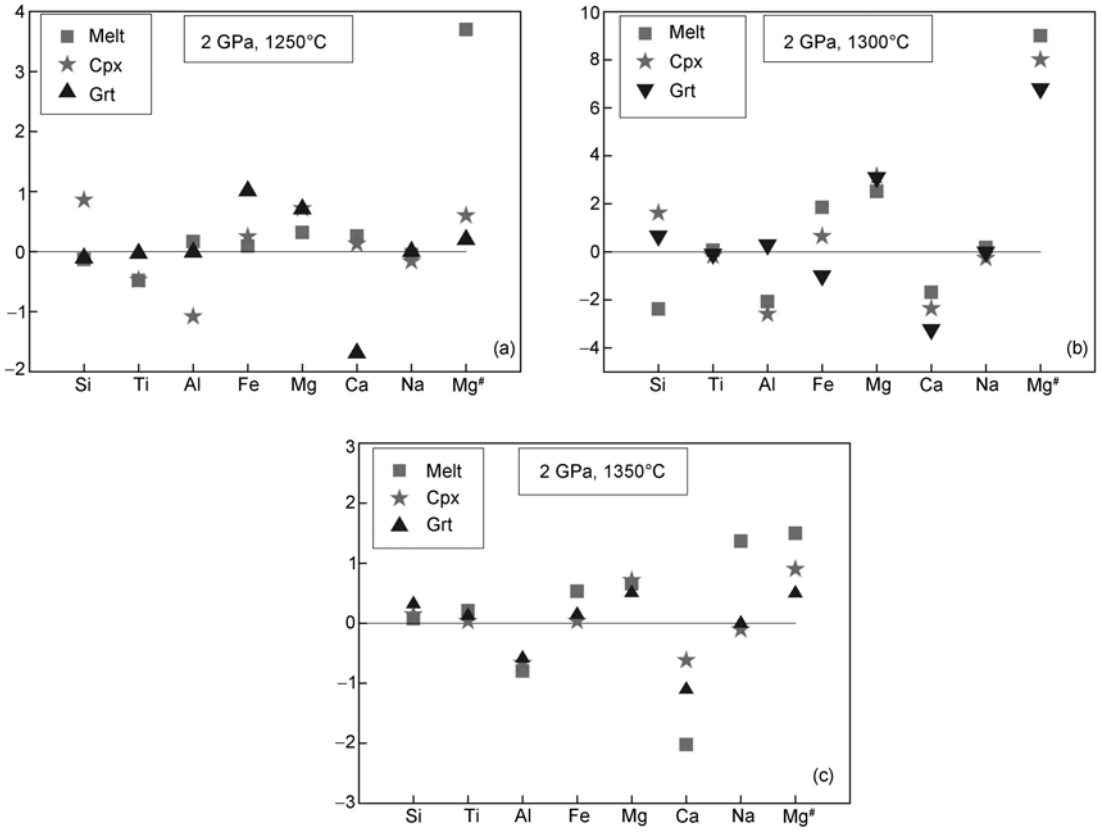

图 8　不同温度条件下反应前后熔体、单斜辉石和橄榄石中的各元素百分含量的变化

图中纵坐标为反应后各相的成分百分含量减去反应前各相的百分含量

温度 1300 和 1350℃条件下榴辉岩熔体-橄榄岩反应后熔体的成分具有高$Mg^{\#}$安山岩的成分特征, 表明榴辉岩熔体-橄榄岩反应是形成 $Mg^{\#}$安山岩的重要机制之一.

致谢 衷心感谢中国地质大学地球科学学院刘勇胜教授和审稿人对本文提出的宝贵意见.

参考文献

1 Fan W M, Zhang H F, Baker J, et al. On and off the North China Craton: Where is the Archean keel? J Petrol, 2000, 41: 933—950
2 Menzies M A, Xu Y G, Zhang H F, et al. Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. Lithos, 2000, 96: 1—21
3 Niu Y L. Generation and evolution of basaltic magmas: Some basic concepts and a new view on the origin of mesozoic-cenozoic basaltic volcanism in eastern China. Geol J China Univ, 2005, 11: 9—46
4 周新华. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究的若干问题. 地学前缘, 2006, 13: 50—54
5 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根-柱构造——大陆动力学的钥匙. 北京: 地质出版社, 1996
6 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 论燕山运动的深部地球动力学本质. 高校地质学报, 2000, 6: 379—388
7 Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China craton. Nature, 2004, 432: 892—897
8 徐义刚. 岩石圈的热-机械侵蚀和化学侵蚀与岩石圈减薄. 矿物岩石地球化学通报, 1999, 18: 1—5
9 Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath eastern China: Evidence, timing and mechanism. Phy Chem Earth, 2001 26: 747—757
10 路凤香, 郑建平, 李伍平, 等. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式: “蘑菇云”模型. 地球前缘, 2000, 7: 97—107
11 张宏福, 周新华, 范蔚茗, 等. 华北东南部中生代岩石圈地幔性质、组成、富集过程及其形成机理. 岩石学报, 2005, 21: 1271—1280
12 Kay R W, Kay S M. Creation and destruction of lower continental crust. Geol Rund, 1991, 80: 259—278
13 Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism. Tectonophysics, 1993, 219: 177—189
14 高山, 金振民. 拆沉作用(Delamination)及其壳-幔演化动力学意义. 地质科技情报, 1997, 16: 1—9
15 闫峻, 陈江峰, 谢智, 等. 鲁东晚白垩世玄武岩中的幔源捕虏体: 对中国东部岩石圈减薄时间制约的新证据. 科学通报, 2003, 48: 1570—1574
16 Zhang H F, Nakamura E, Sun M, et al. Transformation of subcontinental lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: Evidence from a highly fertile mantle xenolith from the North China Craton. Int Geol Rev, 2007, 49: 658—679
17 Zhang H F. Transformation of lithospheric mantle through peridotite-melt reaction: A case of Sino-Korean craton. Earth Planet Sci Lett, 2005, 237: 768—780
18 Zhang H F, Sun M, Zhou M F, et al. Highly heterogeneous Late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: Evidence from Sr-Nd-Pb isotopic systematics of mafic igneous rocks. Geol Mag, 2004, 141: 55—62
19 裴福萍, 许文良, 王清海, 等. 鲁西费县中生代玄武岩及幔源捕掳晶的矿物化学: 对岩石圈地幔性质的制约. 高校地质学报, 2004, 10: 88—97
20 汤艳杰, 张宏福, 英基丰. 太行山中段新生代玄武岩中高镁橄榄石捕虏晶: 残留古老岩石圈地幔样品. 岩石学报, 2004, 20: 1243—1252
21 邵济安, 路凤香, 张履桥, 等. 辽西义县组玄武岩捕虏晶的发现及其意义. 岩石学报, 21: 1547—1558
22 Ying J F, Zhang H F, Kita N, et al. Nature and evolution of Late Cretaceous lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton: Constraints from petrology and geochemistry of peridotitic xenoliths from Junan, Shandong Province, China. Earth Planet Sci Lett, 2006, 244: 622—638
23 张宏福. 橄榄岩-熔体的相互作用: 岩石圈地幔组成转变的重要方式. 地学前缘, 2006, 13: 65—75
24 张宏福. 辽西义县组火山岩: 拆沉作用还是岩浆混合作用的产物? 岩石学报, 2008, 24: 37—48
25 Xiong X L, Xia B, Xu J F, et al. Na depletion in modern adakites via melt/rock reaction within the sub-arc mantle. Chem Geol, 2006, 229: 273—292
26 Fisk M R. Basalt-magma interactions with harzburgite and the formation of high magnesium andesites. Geophys Res Lett, 1986, 13: 467—470
27 Kelemen P B, Joyce D M, Webster J D, et al. Reaction between ultramafic rock and fractionating basaltic magma II. Experimental investigation of reaction between olivine tholeiites and harzburgite at 1150—1050℃ and 5 kbar. J Petrol, 1990, 31: 99—134
28 Carroll M, Wyllie P J. Experimental phase relations in the system tonalite-peridotite-H_2O at 15 kbar: Implications for assimilation and

differentiation processes near the crust-mantle boundary. J Petrol, 1989, 30: 1351—1382
29 Kelemen P B, Hart S R, Bernstein S. Silica enrichment in the continental upper mantle via melt/rock reaction. Earth Planet Sci Lett, 1998, 164: 387—406
30 Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Eperimental constraints at 3.8 GPa. Chem Geol, 1999, 160: 335—356
31 Anderson D A. Large igneous provinces, delamination, and fertile mantle. Elements, 2006, 1: 271—275
32 Ravna E K. The garnet-clinopyroxene Fe^{2+}-Mg geothermometer: An updated calibration. J Metamorph Geol, 2000, 18: 211—219
33 Ellis D J, Green D H. An experimental study of the effect of Ca upon the garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. Cont Mineral Petrol, 1979, 71: 13—22
34 Pertermann M, Hirschmann M M. Anhydrous partial melting experiments on MORB-like eclogite: Phase relations, phase compositions and mineral-melt partitioning of major elements at 2—3 GPa. J Petrol, 2003, 44: 2173—2201
35 Spandler C, Yaxley G, Green D H, et al. Phase relations and melting of anhydrous K-bearing eclogite from1200 to 1600℃ and 3 to 5 GPa. J Petrol, 2008, 49: 771—795
36 Yaxley G M, Green D H. Reaction between eclogite and peridotite: Mantle refertilisation by subduction of oceanic crust. Schweiz Mineral Petrogr Mitt, 1998, 78: 243—255
37 Morgan Z, Liang Y. An experimental study of the kinetics of lherzolite reactive dissolution with applications to melt channel formation. Contrib Mineral Petrol, 2005, 150: 369—385
38 Kelemen P B. Reaction between ultramafic rock and fractionating basaltic magma I. Phase relations, the origin of calc-alkaline magma series, and the formation of discordant dunite. J Petrol, 1990, 31: 51—98
39 Liu Y S, Gao S, Lee C A, et al. Melt-peridotite interactions: Links between garnet pyroxenite andhigh-Mg# signature of continental crust. Earth Planet Sci Lett, 2005, 234: 39—57
40 王晓蕊, 高山, 柳小明, 等. 辽西四合屯早白垩世义县组高镁安山岩的地球化学: 对下地壳拆沉作用和 Sr/Y 变化的指示. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35: 700—709
41 黄华, 高山, 胡兆初, 等. 辽西彰武地区中生代高镁安山岩地球化学及其对新生下地壳拆沉作用的指示. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37: 1287—1300