

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

铟在花岗质熔体中的扩散：对铟成矿的启示

张泽伟¹, 朱仁智^{2*}, 张力^{1,2}, 倪怀玮^{1,2}

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;
2. 中国科学技术大学 深空探测实验室/地球和空间科学学院, 合肥 230026

铟是一种关键金属, 通常作为与花岗岩相关矿床的副产品回收。鉴于其在地壳中的丰度极低, 铟从岩浆源区到矿床的富集倍数需超过 100 倍。铟在硅酸盐熔体中的扩散系数 (D_{In}) 是控制其迁移和富集效率的关键参数, 然而目前尚无关于铟扩散系数的实验数据。本研究利用活塞圆筒压机, 采用扩散偶法和铟片溶解法, 在 1073~1873 K 和 0.5~1 GPa 条件下, 获得了铟在含水量高达 6.5% 的花岗质熔体中的扩散系数, 系统揭示了水含量、温度和压力对铟扩散行为的影响。本研究通过 LA-ICP-MS 测定实验产物中的铟含量曲线, 使用误差函数拟合提取铟的扩散系数。实验结果表明, 在 1473 K 和 1 GPa 条件下, 随着熔体水含量从 0 增加到 6.5% 时, 铟的扩

散系数增加了约 3600 倍; 在 1 GPa 的无水熔体中, 温度从 1473 K 升至 1873 K 时, 铟的扩散系数增加了 34 倍; 在 1673 K 条件下, 压力从 1 GPa 降至 0.5 GPa 时, 铟的扩散系数增加了 3 倍。铟的扩散系数属于极慢的范畴, 表现为 $D_{Mo} < D_{In} \approx D_{Sn} \ll D_{H_2O} < D_{Cu} \approx D_{Ag}$ 。结合铟在含氯流体与花岗质熔体之间的极高分配系数, 缓慢的扩散速率会显著限制铟从熔体向流体的迁移, 导致其在流体中的富集程度低于热力学平衡分配所能达到的理论值。此外, 铟与锡扩散系数的显著相似性可能有助于解释铟-锡的共生成矿作用。

关键词: 铟扩散; 花岗质熔体; 铟成矿

第一作者简介: 张泽伟 (2000-), 博士研究生, 研究方向: 实验岩石学. Email: zeweizhang@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 朱仁智 (1991-), 副研究员, 研究方向: 行星与地球化学. Email: renzhizhu@ustc.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

NaAlSi₃O₈-H₂O 超临界地质流体体系的热力学建模

高慧^{1*}, 张志刚^{2,3}

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;
2. 中国科学院地质与地球物理研究所 地球与行星物理重点实验室, 北京 100029;
3. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049

随着温度和压强的变化, 共存的两种性质截然不同的流体逐渐趋于相似, 直至形成一种均匀流体, 被称为超临界流体。这种现象在地球内部广泛存在, 在硅酸盐-水体系中尤为常见。超临界地质流体具有特殊的热力学性质, 是地球内部物种循环、能量交换、花岗岩成矿系统形成及中深源地震发生的重要介质。超临界流体的形成受其复杂相图的控制, 临界曲线和湿固相线共同约束了超临界流体形成的温压和成分区间。NaAlSi₃O₈-H₂O 体系常作为玄武岩-H₂O 体系和花岗岩-H₂O 体系的简单代表。经过调研发现, NaAlSi₃O₈-H₂O 体系的临界曲线仍不清晰, 密度数据非常不足, 能够准确预测该体系在临界曲线附近性质的模型也极其缺乏, 目前常用的热力学模型对于超临界流体形成前后的复杂性质几乎没有预测能力。最近, 我们提出了一个适用于超临界流体、覆盖其临界相变区域的新型热力学模型框架: 利用非随机双液模型 (Non-Random Two-Liquid Model) 重新表征了超临界流体的超额混合自由能, 并在必要时用简化的链式聚合反应进一步表征流体中物种变化所带来的自由能变

化。该框架具有形式简单、参数少、能够同时预测多种相平衡关系和密度以及可扩展性强等优点。该框架已成功应用于硅酸盐-水的另一典型体系: SiO₂-H₂O 体系, 并成功拓展至 NaAlSi₃O₈-H₂O 体系。本模型可以预测 NaAlSi₃O₈-H₂O 体系在 0.5~2.5 GPa、773~1673 K 的各种热力学性质, 是目前能同时预测溶解度、密度、液液平衡的唯一模型。模型预测 NaAlSi₃O₈-H₂O 体系的第二临界端点为 941 K、1.56 GPa。与密度实验数据相比, 模型最大偏差为 0.05 g/cm³, 平均相对偏差小于 1.1%。与溶解度实验数据相比, 模型的平均相对偏差为 11%。我们对比了 NaAlSi₃O₈-H₂O 和 SiO₂-H₂O 体系的模型预测结果, 发现 NaAlSi₃O₈-H₂O 体系的混溶间隙比 SiO₂-H₂O 大得多。地球早期温度梯度较高的俯冲环境可能更接近 SiO₂-H₂O 超临界流体的形成条件, 而 NaAlSi₃O₈-H₂O 较大的混溶间隙使得俯冲带背景下更易形成该体系的不混溶流体。

关键词: 钠长石-水; 超临界流体; 热力学建模; 第二临界端点; 密度

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0702700)

第一作者简介: 高慧 (1997-), 博士后, 研究方向: 计算地球化学。Email: gh0420@mail.iggcas.ac.cn

*通讯作者简介: 高慧 (1997-), 博士后, 研究方向: 计算地球化学。Email: gh0420@mail.iggcas.ac.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

俯冲带熔流体中铁的氧化还原状态及其对弧岩浆氧化性的指示

王沁霞¹, 张力¹, 倪怀玮^{1*}

1. 中国科学技术大学, 合肥 230026

板片俯冲过程释放的熔流体是俯冲带物质迁移的重要载体, 可以将板片的地球化学特征通过交代作用传递给地幔楔, 并在弧岩浆中得到体现。目前普遍认为弧岩浆中的水和大离子亲石元素主要来自俯冲板片, 但关于弧岩浆的氧化性究竟是继承自俯冲板片还是由于地幔楔初始熔体的结晶分异仍存在较大争议。俯冲带熔流体的氧化还原性质可能是解决这一争议的关键突破口。

铁作为岩石中唯一的主量变价元素, 在俯冲带氧化性传递过程中的作用尚未得到足够重视。现有的高温高压实验表明, 板片俯冲过程释放的含水熔体和超临界流体可以携带 wt%量级的 Fe, 因此, 查明含水熔体和超临界流体中 Fe 的氧化还原状态对认识俯冲带熔流体的氧化还原性质具有重要意义。我们通过活塞筒压机模拟俯冲带温压条件, 探究了 850~1300 °C 和 2.5~3.0 GPa 条件下, 含水熔体及超临界流体中

铁的价态随水含量、温度和氧逸度的变化规律。实验结果表明, 熔流体的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 值与氧逸度、温度和水含量密切相关。在 950 °C 和 2.5 GPa 条件下, 当体系的氧逸度为 FMQ+1.4 时, 熔流体的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 值在 0.39~0.56 之间变化; 当氧逸度降低至 FMQ-0.5 时, 含水熔体的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 值降低至 0.22~0.25。水的加入可显著增加熔体的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 值。温度的降低不仅可以增加熔流体的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 值, 还可以放大水对 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 值的提升效益。因此, 即便在相对还原的条件下, 俯冲板片在弧下深度释放的含水熔体或超临界流体仍具有较高的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{total}}$ 值, 板片熔流体可以通过迁移氧化态 Fe^{3+} 的方式将板片的氧化性传递到地幔楔。

关键词: 俯冲带; 铁价态; 含水熔体; 超临界流体; 氧逸度

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42330301)

第一作者简介: 王沁霞 (1996-), 博士后, 研究方向: 实验岩石学. Email: qinxia@pku.edu.cn

第一作者简介 (共同一作): 张力 (1991-), 特任副研究员, 研究方向: 实验岩石学. Email: zl12345@ustc.edu.cn

*通信作者简介: 倪怀玮 (1981-), 教授, 研究方向: 实验岩石学. Email: hwni@ustc.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

桂北摩天岭达亮铀矿床磷灰石化学特征 及对铀成矿作用的指示

史竟存¹, 王凯兴^{1*}

1. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013

达亮铀矿床位于摩天岭岩体西南侧与浅变质岩的接触带上, 为摩天岭岩体最老的富铀矿床。前人对该矿床成矿特征进行了初步研究, 针对达亮铀矿床磷灰石化学特征与铀成矿的关系研究较为薄弱。本文选择摩天岭地区达亮铀矿床成矿前的磷灰石作为研究对象, 开展磷灰石显微结构、电子探针主量元素、LA-ICP-MS 微量元素等方面的研究, 旨在探讨达亮铀矿床成矿前磷灰石的成因, 查明成矿前蚀变流体性质和热液蚀变作用过程, 探讨成矿前蚀变与铀成矿作用的关系。矿相学分析表明, 本次研究的磷灰石呈现不同的明暗区域, 可分为磷灰石 Ap1 和 Ap2。Ap1 颜色明亮表面干净清晰, Ap2 颜色较暗, 表面发育较多的孔洞及裂隙, 局部流体改造痕迹明显并含有少量矿物包裹体。达亮铀矿床磷灰石均具有高 F 低 Cl 的特征, 为典型的氟磷灰石。研究

结果表明, 达亮铀矿床磷灰石 Ap1 为岩浆磷灰石、Ap2 为热液磷灰石。Ap1 源自摩天岭岩体 S 型花岗质岩浆的分离结晶, 而 Ap2 则是 Ap1 经由热液流体改造后的产物。热液流体呈现高温及高氧逸度特征, 为富含 F、 SO_4^{2-} 、Sr 及低含量 Ca 等化学成分的酸性流体。热液蚀变过程是流体诱导的、溶解-再沉淀机制与富 F、 SO_4^{2-} 的酸性流体对 LREE 的优先迁移和沉淀的共同作用密切相关。磷灰石以及在蚀变过程中生成的独居石、磷钇矿等含铀副矿物, 在后期铀成矿阶段均为摩天岭地区的铀成矿作用提供了额外的铀源, 对于理解该地区的铀成矿机制具有重要意义。

关键词: 磷灰石成因; 热液流体; 达亮铀矿床; 热液蚀变; 摩天岭

基金项目: 本文为中国铀业有限公司-东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金项目(编号 2023NRE-LH-01)和中国核工业地质局高校科研攻关项目(编号 201619)联合资助成果。

作者简介: 史竟存(1999-), 男, 硕士研究生, 地质学专业. Email: sjc15027717965@163.com。

*通讯作者: 王凯兴(1985-), 男, 副教授, 矿产普查与勘探专业. Email: xy2gmo02@ecut.edu.cn。

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

地球岩浆洋结晶过程中亲铁和亲铜元素在硫化物和硅酸盐熔体间的分配

张明东¹, 李元^{2*}

1. 云南大学 地球科学学院, 昆明 650500;

2. Universität Bayreuth Bayerisches Geoinstitut, Bayreuth 095440

“冥古宙硫化物”(Hadean matte)是指在早期地球岩浆洋结晶过程中,由于硫含量达到饱和而分离出的硫化物液体。这种硫化物液体在地球核幔分离过程中起到了重要作用。本研究评估了“冥古宙硫化物”从地幔向地核分异的过程对地球硅酸盐部分中亲铜和亲铁元素(CSEs)丰度的控制作用。通过 1~14 GPa、1300~2100 °C 条件下的实验,测定了 CSEs 在硫化物熔体与玄武质-橄榄岩质硅酸盐熔体间的分配系数。实验获得的分配系数范围(Co: 30~160; Ni: 50~1200; Cu: 40~940; Mo: 20~210; Ag: 50~210; Cd: 20~90; In: 4~60; Sb: 30~150; Re: 3900~30000; Pb: 15~210; Bi: 140~1700; Zn: 0.3~7; Ge: 0.7~7; Ga: 0.1~0.9)可通过压力、温度、硅酸盐熔体和硫化物熔体成分等参数进行定量化描述。将这一参数化模型应用于 75 GPa 深部岩浆洋中的硫化物熔体核-幔分异过程时发现: Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Ge、Mo、Ag、Cd、In、

Sb、Pb 和 Bi 等元素被带入地核的比例均低于 10%;而在 10 GPa 的浅部岩浆洋中, Cu、Ag 和 Bi 被带入地核比例可达 50%~80%,其他 CSEs 则低于 50%。但无论哪种情况, Re 的被带入地核的比例都超过 90%,这需要后期增生(Late veneer)来解释现今地幔中的 Re 含量。我们的研究表明:如果地球的挥发性 CSEs (Cu、Zn、Ga、Ge、Ag、Cd、In、Sb、Pb 和 Bi)是在金属分异基本停止后增生的,那么硅酸盐地球中这些挥发性 CSEs 相对于同等挥发性亲石元素的亏损模式无法用硫化物熔体的核-幔分异来解释。因此,前人利用硫化物熔体核-幔分异模型解释硅酸盐地球挥发性 CSEs 亏损的相关研究需要重新审视。

关键词: 亲铁和亲铜元素; 硫化物液体; 分配系数; 冥古宙硫化物; 地球岩浆洋

第一作者简介: 张明东, 博士, 研究方向: 实验地球化学。Email: zhangmingdong18@mails.ucas.ac.cn

*通讯作者简介: 李元, 博士, 研究方向: 实验地球化学。Email: Yuan.Li@uni-bayreuth.de

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

大洋俯冲带变质流体演化研究: 来自西天山含 CH₄ 流体包裹体的定量约束

齐宁¹, 张丽娟^{1,2*}, 张立飞¹

1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

俯冲带变质流体在火山喷发、地震活动及深部碳循环中发挥着至关重要的作用。然而, 目前对俯冲带 C-O-H 变质流体的演化仍缺乏定量约束。本研究以我国西天山高压-超高压变质带中的新鲜榴辉岩和退变质榴辉岩为对比研究对象, 通过对其中含 CH₄ 流体包裹体的系统分析, 定量揭示了俯冲带变质流体的演化规律。基于岩相学研究和 DEW 模型模拟, 我们发现含 CH₄ 的还原性流体主要形成于俯冲进变质的高压-超高压阶段, 并在随后的减压折返过程中逐渐向氧化性流体转变。借助三维拉曼光谱技术, 我们对流体包裹体中 CH₄ 与 H₂O 的比例进行了定量分析。研究结果表明, 新鲜榴辉岩样

品中 CH₄ 与 H₂O 的体积比稳定维持在约 1:3, CH₄ 的重量百分比含量稳定在 0.97%~1.48% 之间; 而退变质榴辉岩则表现出更大的变化范围, CH₄ 与 H₂O 的体积比介于 1:1 至 1:6 之间, CH₄ 的重量百分比含量分布范围更广 (0.57%~11.45%)。这些发现表明, 变质 C-O-H 流体在减压折返过程中可能经历了由 CH₄ 和 H₂O 从混溶态向不混溶态转变的演化过程, 为揭示大洋俯冲带 C-O-H 流体的定量演化提供重要依据。

关键词: 俯冲带变质流体; C-O-H 流体; 三维定量; 不混溶

基金项目: 国家自然科学基金 (42172060, 42472083)、国家重点研发计划 (2019YFA0708501)

第一作者简介: 齐宁 (1994-), 博士生, 研究方向: 变质地质学. Email: 1430067486@qq.com

*通信作者简介: 张丽娟 (1986-), 副研究员, 研究方向: 变质地质学. lijuanzhang@mail.iggcas.ac.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

二氧化碳对于含碳硅酸盐熔体 SCSS 的影响及其 对于地球深部硫循环的指示

刘康^{1*}, 倪怀玮^{1,2}

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;

2. 中国科学技术大学 深空探测实验室/地球和空间科学学院, 合肥 230026

硫化物饱和条件下硅酸盐熔体中的硫溶解度 (SCSS) 是我们约束地幔熔融过程中硫地球化学行为以及认识深部地幔硫循环的关键参数。虽然目前硫在硅酸盐熔体以及碳酸盐化熔体中的溶解度得到了广泛研究, 但是对于熔体 CO₂ 含量对 SCSS 影响的认识仍存在较大争议。基于此, 我们利用活塞圆筒压机在 2 GPa, 1400 °C 的条件下, 系统探究了 CO₂ 对于富钙霞石质熔体 SCSS 的影响。实验后产物玻璃 (硫化物饱和) 中的 CO₂ 含量利用傅立叶变换红外光谱仪 (FTIR) 测定, 其含量范围为 1.00% 到 9.46%。实验结果表明 SCSS 随着熔体 FeO 和 CO₂ 含量的升高而降低, 并且 CO₂ 的效应低于 FeO。鉴于先前基于无碳熔体以及碳酸盐化熔体建立的 SCSS 模型无法很好

地重现我们的实验结果, 我们结合本实验以及前人的实验数据提出了一个新的 SCSS 模型。利用新的模型, 我们估计了全球原始 OIB 岩浆的 SCSS 值 ((1163 ± 38) × 10⁻⁶), 明显低于之前不考虑 CO₂ 效应的值 ((1348 ± 85) × 10⁻⁶)。进一步, 结合 OIB 岩浆的产生速率以及密度, 我们估算出 OIB 从深部地幔迁移的硫通量可达 (6.97 ± 0.23) Mt/yr。此外, 通过对比金伯利岩全岩以及熔体包裹体的硫含量与计算的 SCSS 值, 我们发现硫含量高于 2000 × 10⁻⁶ 的金伯利岩很有可能源于一个氧化性并且含硫酸盐的地幔源区。

关键词: 硫溶解度; 熔体二氧化碳含量; OIB; 地球深部硫循环

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

地幔柱背景下榴辉岩熔体-岩石圈地幔反应的实验研究

侯永胜^{1,2}, 李洪颜^{2*}, 张超¹

1. 西北大学 地质学系, 西安 710000;
2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510000

地幔柱背景下, 榴辉岩熔体在穿越难熔岩石圈地幔过程中地球化学成分如何演化, 目前仍缺乏深入理解。为此, 我们开展了层状接触反应实验工作, 模拟榴辉岩熔体与方辉橄榄岩在 2~3 GPa、1400~1500 °C 条件下的反应, 实验运行时间为 2 小时和 24 小时。实验结果表明, 与初始榴辉岩熔体相比, 反应后残余熔体整体具有较低的 SiO₂、TiO₂、Al₂O₃、FeO、CaO 和全碱含量, 较高的 Ni、MgO 含量和 Mg[#], 然而 CaO/Al₂O₃ 几乎保持不变。残余熔体的化学成分受熔体/方辉橄榄岩比例、实验温度和实验运行时间等因素的影响。降低熔体/岩石比例或增加实验温度和运行时间都会导致熔-岩反应程度变大。与平衡状态 (实验时间 24 小时) 相比, 非平衡状态 (实验时间 2 小时) 时残余熔体具有较高

的 SiO₂、FeO 和 MgO 含量, 而 CaO、Al₂O₃ 和全碱含量较低。这表明残余熔体的成分在非平衡状态下受到界面反应 (橄榄石溶解和斜方辉石沉淀) 缓冲, 而在平衡状态下主要受扩散作用控制。基于实验结果, 我们提出了新的两阶段模型来解释夏威夷造盾期母岩浆的成因: 第一阶段, 榴辉岩熔体迁移过程中与岩石圈地幔方辉橄榄岩按不同熔体/岩石比例反应, 在岩石圈地幔深部产生残余熔体; 第二阶段, 残余熔体在地壳岩浆房内与地幔柱橄榄岩熔体按不同比例混合, 从而导致了夏威夷造盾期岩浆中呈现的地球化学多样性。

关键词: 榴辉岩熔体; 岩石圈地幔; 熔体-岩石反应; 夏威夷造盾期岩浆

国家自然科学基金项目 (92258303) (41972055)

第一作者简介: 侯永胜 (1996-), 博士研究生, 研究方向: 实验岩石学, Email: 1462525148@qq.com

*通信作者简介: 李洪颜 (1981-), 研究员, 研究方向: 岩石地球化学, Email: hongyanli@gig.ac.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

川西龙门山中段磷矿集区深部过程与流体包裹体记录的耦合机制

姚毅^{1,2*}, 王浩^{1,2}, 石亮^{1,2}, 刘军省^{3,4}, 何良^{1,2}, 贺天全^{10,11}, 李晓龙^{8,9}, 徐磊^{5,6,7}

1. 四川蜀道矿业集团德阳吴华清磷矿有限公司, 四川 德阳 618299;
2. 四川蜀道矿业集团德阳吴华清磷矿有限公司技术中心, 四川 德阳 618202;
3. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101;
4. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100083;
5. 金属矿山安全技术国家重点实验室, 长沙 410012;
6. 长沙矿山研究院有限责任公司, 长沙 410012;
7. 湖南省矿山地质灾害防治与环境再造工程技术研究中心, 长沙 410012;
8. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 西安 710077;
9. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 西安 710077;
10. 四川省第二地质大队非金属资源勘查研究中心, 成都 611930;
11. 四川省化工地质勘查院, 成都 611930

川西龙门山中段作为我国磷矿集区的典型代表, 其磷矿床的形成与区域构造活动、深部物质循环和流体动力学过程紧密相关。磷矿作为战略性非金属矿产资源, 对保障国家粮食安全、促进农业可持续发展以及推动磷化工产业高质量发展具有至关重要的作用。因此, 解析川西龙门山中段地区磷矿床的成因及其与地下深部地质过程的相互关联, 对于磷矿资源的勘探与评价具有重要的战略意义。本课题致力于揭示川西龙门山中段磷矿床成矿过程中深部地质活动的角色及其对成矿作用的影响。研究通过综合运用显微测温 and 测压技术、稳定同位素分析以及微量元素地球化学分析等方法, 对磷矿床中流体包裹体的物理化学特性进行了细致的表征。分析结果揭示了流体包裹体中丰富的化学成分和同位素信息, 包括氢、氧同位素比例以及溶解气体和盐类的特征, 为重建古流体的性质和成矿环境提供了关键数据。研究结果表明, 川西龙门山中段磷矿床的形成与地幔热液活动、地壳物质循环

和区域构造应力场的演变紧密相连。流体包裹体的记录进一步证实了成矿流体的地幔源性, 并展示了其在地壳中的演化历程。此外, 同位素和微量元素的特征反映了古气候和古海洋环境的变化, 为理解区域古环境演变提供了宝贵的地质证据。本研究的成果不仅丰富了对川西龙门山中段磷矿床成矿机制的认识, 而且为磷矿资源的勘探与评价提供了重要的地球化学依据。通过耦合深部地质过程与流体包裹体记录, 本研究为理解区域构造活动与成矿作用之间的相互作用提供了新的视角, 并对于揭示地球深部过程对地表地质作用的影响具有重要的科学意义。未来研究将进一步整合多学科数据, 以提高对磷矿成矿作用及其与深部地质过程耦合机制的科学认识, 为磷矿资源的可持续开发和利用提供理论支持和实践指导。

关键词: 川西龙门山中段; 深部地质过程; 地壳物质循环; 微量元素地球化学; 古气候环境重建

基金项目: 全国危机矿山接替资源找矿项目管理办公室“四川省绵竹市清平磷矿接替资源勘查”(项目编号: 200751070)、德阳吴华清磷矿有限公司深部延伸接替工程项目“德阳吴华清磷矿有限公司 100 万吨/年磷矿延伸接替工程”、“高地应力区深部磷矿开采岩爆孕育过程中应力迁移及微震活动性研究”、“深部磷矿开采突水机理与突水防治理论、关键技术及工程示范”、“南高地应力区磷矿深部开采岩体稳定性精细化识别与靶向调控技术集成”等项目联合资助。

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

软流圈熔体分层结构

张军波^{1*}

1. 长江大学 资源与环境学院, 武汉 430100

板块构造是地球区别于太阳系其他类地行星的独特标志, 不仅塑造了地球的地表形态, 还促进了地球宜居性的演变。软流圈是位于刚性岩石圈之下的塑性圈层, 具有异常低的地震剪切波速, 普遍解释是由地幔部分熔融所导致。最新地震层析成像与矿物物理实验研究发现, 构造板块的运动速度与软流圈熔体比例直接相关: 软流圈中少量熔体的出现可降低其粘滞系数, 提高构造板块运动速度, 并促进软流圈中大尺度晶体定向排列。因此, 软流圈是构建经典板块构造理论的主要组成部分, 理解软流圈的结构及其成因机制对人们深刻认识地球内部物质-能量交换、地震波速各向异性 and 构造板块运动驱动力等地球动力学过程具有重要意义。

为了更好地了解地球内部的结构和运行方式, 我们开发了一种新的定量计算地幔熔融深度的地球化学指标, 即玄武岩 Y/Yb 比值。钇 (Y) 与铽 (Yb) 在上地幔深度主要赋存在石榴石和单斜辉石 (地球上地幔重要的造岩矿物) 中, 这两种元素在石榴石和单斜辉石中的相容性具有强烈的压力依赖性, 但随压力增加表现出差异性变化, 因此玄武岩 Y/Yb 比值可以指示含石榴石和单斜辉石地幔部分熔融的深度。通过收集整理全球年轻火山岩地区已有的地球物理-地球化学资料, 发现大陆/大洋玄武岩 Y/Yb 比值和相关地区的岩石圈-软流圈边界 (LAB) 或地震低速异常带 (LVZ) 深度数据之间具有明显的正相关性, 由此建立了基于玄武岩 Y/Yb 比值估算地幔熔融深度的简单

压力计。

通过对全球玄武岩地球化学数据的统计分析发现, 不同构造板块喷发的大洋/大陆玄武岩 Y/Yb 比值具有双峰式分布特征, 对应了两种不同来源深度的软流圈熔体 (80~110 km vs. 140~165 km), 这也大致对应于地球物理观察到的双剪切波低速带深度。此外, 该研究团队还发现不同起源深度的软流圈熔体也对应了截然不同的熔体物理-化学性质, 浅源熔体 (80~110 km) 为富硅熔体 (密度低), 深源熔体 (140~165 km) 为贫硅富铁熔体 (密度高、黏度低以及熔体活动性低), 而铁对深源熔体在软流圈 140~165 km 深度的稳定性可能扮演了极其关键的角色。高温高压实验结果也显示, 熔体活动性 ($\Delta\rho/\eta$) 在 110~140 km 压力范围内最强 (相应深度熔体向上迁移), 导致软流圈 110~140 km 深度处几乎没有熔体出现, 这一过程可能是软流圈熔体分层结构形成的重要机制。

软流圈熔体起源深度揭示出全球范围内软流圈中广泛存在双层熔体结构, 主要形成于岩石圈较薄的构造板块之下, 如快速扩张的太平洋板块、大陆边缘、大陆裂谷和裂解的微陆块, 这对我们理解地球内部的侧向地幔对流、板块漂移和克拉通/超大陆裂解具有重要指示意义。

关键词: 软流圈; 低速带; 分层; Y/Yb 比; 板块构造

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

富水熔体和超临界流体电导率实验研究

丁家乐¹, 郭璇^{1*}, 张力¹, 李云国¹, 倪怀玮¹

1. 中国科学技术大学, 合肥 230026

大地电磁测深常常探测到地球深处存在高导异常, 可能是由于含水熔体、富水流体或超临界流体的存在造成的。将电导率实验测量与大地电磁测深相结合, 可以为熔体或流体的成分和体积分数提供约束。目前已有许多含水熔体电导率实验研究, 实验结果显示无论是哪种岩性的熔体, 水都可以显著提升硅酸盐熔体的电导率。但现有的典型硅酸盐熔体电导率的测量仅限于水含量不超过 12% 的情况。另一方面, 也有多项研究测定了对富水流体的电导率, 但实验对象主要关注水含量高于 90% 的情况。因此, 对水含量超过 12% 的含水硅酸盐熔体以及超临界流体的电导率性质的了解目前仍然存在空白。本研究利用活塞圆筒压机结合阻抗分析仪, 在 1.5 GPa、900~1500 °C 条件下, 测量了 $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 体系在水含量高达 35% 时的电导率。实验结果表明, 水对增强硅酸盐熔体的

电导率有显著影响, 加入 10% 的水可使体系电导率提高两个数量级以上, 但当水含量在 10%~30% 范围内时, 这种提升效应有所减弱。超过 30% 的水含量 (即组成属于超临界流体) 时, 电导率的增加变得不那么显著。但即使如此, 超临界流体的电导率也已经达到 40 s/m 以上, 这一数值明显高于文献中典型含水硅酸盐熔体的电导率值。本研究中获得电导率随水含量增加先急剧提升, 而后增加幅度减缓的趋势与其他传输性质如粘度和扩散系数相似。通过将富水熔体和超临界流体的电导率应用于解释 Cascadia 俯冲带的大地电磁测深结果, 表明只需要 3% 的超临界流体的存在就可以解释在 Cascadia 俯冲板块顶部约 80 公里处探测到的 0.5 s/m 的电导率值。

关键词: 含水熔体; 超临界流体; 电导率

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42222203, 42330301), 国家重点研发计划项目 (2018YFA0702700), 中央高校基本科研业务费专项资金 (WK3410000019)

第一作者简介: 丁家乐, 博士研究生, 研究方向: 实验岩石学. xiaoding@mail.ustc.edu.cn

*通信作者简介: 倪怀玮, 教授, 研究方向: 实验岩石学. hwni@ustc.edu.cn; 郭璇, 特任教授, 研究方向: 实验岩石学. guoxuan@ustc.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

底垫基性岩浆的高温去气驱动的上覆岩浆储库中高硅花岗质熔体与互补晶粥体的有效分离: 来自大兴安岭中南段北大山岩体岩石学、矿物学和地球化学证据

刘翼飞^{1*}, 江思宏¹, 王丰翔¹

1. 中国地质科学院矿产资源研究所 境外矿产研究室, 北京 100037

高硅花岗岩 ($\text{SiO}_2 > 70\%$) 的形成有赖于熔体-晶体的有效分离, 但其机制依旧存在大量的争论。本次研究以大兴安岭中南段的北大山岩体为对象, 通过详细的岩石学、矿物地球化学及全岩地球化学综合分析, 揭示了两类互补岩性单元: (1) 高硅碱性长石花岗岩 ($\text{SiO}_2 = 73.9\% \sim 76.3\%$), 代表了代表高硅花岗质熔体结晶的产物; (2) 相对贫硅石英正长岩 ($\text{SiO}_2 = 64.6\% \sim 70.6\%$), 含大量基性包体, 代表了熔体亏损以后的碱性长石和石英斑晶残留堆积体。并指出, 在基性岩浆地垫释放大量挥发分至上覆岩浆房的条件下, 可以是高硅熔体和晶粥体发生有效的分离。关键证据如下:

1. 岩石学与矿物学特征

(1) 反环带与熔融结构: 石英正长岩中以碱性长石和石英斑晶为主, 均具有显著的溶蚀结构。基性包体斜长石则具有碱性长石增生边, 具有显微 rapakivi 结构, 显示岩浆储库经历了升温过程。

(2) 矿物中相容元素含量的显著差异: 石英正长岩中碱性长石斑晶具有非常高的 Ba, 并显著高于基性包体中长石的 Ba 含量, 并且是通过去除低 Ba 含量的高硅熔体这种机制来不断提升其斑晶中的 Ba 含量。

石英正长岩中黑云母发生了 F 的显著亏损。F 在黑云母中是相容元素, 因此, 石英正长岩中粒间黑云母非常低的 F 含量表明岩浆储库经历了多次高温熔融及含 F 熔体的去除, 使得石英正长岩中黑云母的 F 发生亏损。

(3) 基性包体中辉石的高硅熔体包裹体。拉曼光谱证实高硅熔体包裹体含 H_2O , 电子探针显示 S、F 和 Cl 均具有较高的含量, 显示底垫基性岩浆快速结

晶中释放了以水为主的挥发分。

2. 互补的元素地球化学特征

(1) 主量元素: 两个岩相的主量元素的线性关系是长石和不同碱性长石比例的控制的。

(2) 微量元素: 两个岩相的全岩 Rb、Ba、Zr 和 Rb/Ba 和 Zr/Hf 显示二者是具有互补的特征。

3. 高硅花岗质岩浆与晶粥体分离的机制

基性岩浆底侵至上覆长英质岩浆储库时使其发生升温的同时也释放高温挥发分 (H_2O 等), 使岩浆储库增加部分熔融程度和熔体分数, 提升熔体比例至流变临界阈值以上 (约 50% 晶体含量), 使熔体能够有效地与晶粥体发生分离。同时, 该机制形成的高硅花岗质熔体的温度显著高于水饱和固相线, 因而能够使快速从晶粥体中分离并上侵至地壳浅部, 不至于在上侵的过程中固结。本次研究同时也指出, 低 Rb/Ba、超球粒陨石 Zr/Hf、低黑云母 F 等化学指标, 结合矿物的反环带和溶蚀结构, 可有效识别高硅花岗质熔体驱离后残留的高温花岗质堆积体。

发表论文: Liu YF, Bagas L, Jiang SH, Wang FX. 2024. Efficient segregation of high-silica granitic melt from complementary cumulate caused by high-temperature gas sparging from mafic recharge. *Chemical Geology*, 669: 122364

关键词: 高硅花岗岩; 熔体-晶体分离; 堆晶岩; 熔体驱离; 基性岩浆补给

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

铜在矿物-熔体-流体之间的赋存和分配： 合成流体包裹体新启示

祁冬梅^{1,2}, 张超^{2*}

1. 新疆大学 地质与矿业工程学院, 乌鲁木齐 830017;

2. 西北大学 地质学系, 西安 710069

金属铜的超常富集通常发生于幔源岩浆的分异演化以及后续的岩浆-热液过程, 因此准确测定铜在矿物、熔体、流体(及蒸汽)中的赋存状态和分配系数能够为岩浆分异演化、冷却结晶、流体出溶以及近固相线条件下的水岩反应和含铜矿物沉淀等过程中铜的迁移行为和富集程度提供重要依据。人工合成流体包裹体及其它实验岩石学数据的归纳表明, 铜主要以+1价存在于100 °C以上的成矿热液流体和熔体中, 具体络合形式受到体系成分和温度的影响: Cu在贫 Cl、S 硅酸盐熔体赋存状态为 $\text{CuO}_{0.5}$; 在高温(>300 °C)、酸性、中低盐度热液流体中主要为 $[\text{CuCl}]^0$ 、 $[\text{CuCl}_2]^-$ 和 CuHS^0 ; 在低温(<300 °C)、碱性、中低盐度热液流体中主要为 $\text{Cu}(\text{HS})_2^-$ 和 CuHS^0 ; 在高盐度卤水中 Cu^{2+} 和 Cu^+ 均易与 Cl 发生络合形成高配位络合物。铜分配系数(D_{Cu})的总体变化趋

势为: $D_{\text{Cu}}^{\text{硅酸盐矿物/熔体}} (0.007 \pm 0.002 \sim 0.82 \pm 0.08) < d_{\text{Cu}}^{\text{铁钛氧化物/熔体}} (0.19 \pm 0.02 \sim 1.72 \pm 0.68) < d_{\text{Cu}}^{\text{流体/熔体}} (2 \sim 2698) < d_{\text{Cu}}^{\text{高盐度卤水/气相}} (2 \sim 7066) < D_{\text{Cu}}^{\text{硫化物/熔体}} (180 \sim 42000)$ 。将 D_{Cu} 数据应用于岩浆演化和斑岩体系铜成矿过程的模拟计算, 结果表明: 含硫和贫硫地幔橄榄岩发生中低比例部分熔融(<10%~25%)可导致 Cu 在幔源性基性弧岩浆中的显著富集; (2) 壳内岩浆-热液演化阶段中, 硫化物饱和和流体出溶等过程会导致 Cu 在残余熔体中发生强烈亏损, 但是硫化物的进一步分解可促使 Cu 在成矿流体中的高度富集。综合天然样品和实验结果表明, 成矿流体需至少携带 $1000 \times 10^{-6} \sim 10000 \times 10^{-6}$ Cu 才能导致黄铜矿等矿石矿物的沉淀。

关键词: 铜; 熔体; 流体; 赋存状态; 分配系数

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2023D04067)、国家自然科学基金项目(41972055, 42002059, 42122014)、科技部重点研发计划项目(2023YFF0804200)。

第一作者简介: 祁冬梅(1987-), 副教授, 研究方向: 实验岩石学与地球化学. Email: dongmei.qi@xju.edu.cn

*通信作者简介: 张超(1982-), 教授, 研究方向: 实验岩石学. Email: zhangchao@nwu.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

超临界地质流体的性质和效应

倪怀玮^{1*}

1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026

在地球内部, 特殊组分的加入或温度压力的升高使 H₂O 和硅酸盐的混溶性增强, 形成同时含有大量 H₂O 和硅酸盐溶质的超临界地质流体。在以伟晶岩体系为代表的岩浆-热液体系中, 超临界地质流体的形成受控于熔体-流体临界曲线。在以俯冲板片为代表的变质岩体系中, 超临界地质流体的形成受控于第二临界端点。实验结果表明, 伟晶岩体系中硼和氟的存在使得地壳深度可能形成超临界地质流体, 而俯冲板片则要迟至近 100 km 深度才会释放超临界地质流体。富含 H₂O 和解聚结构单元 (单体、二聚体等) 赋予了超临界地质流体独特的物理性质, 包括低密度、低弹性模量、低黏度、高扩散系数和高电导率。

超临界地质流体可以有效迁移包括高场强元素和重稀土元素在内的多种元素。超临界地质流体的化学特征能被交代地幔和幔源熔体继承, 这可以解释弧岩浆氧化性。超临界地质流体可通过旋节分解发生相分离形成熔体网络。俯冲带岩石和伟晶岩中发现的多相流体包裹体可能是超临界地质流体的残留物。超临界地质流体可以造成俯冲板片顶部附近的低速高导异常, 并且可能与中源地震存在联系。超临界地质流体可能在伟晶岩及其矿床的形成过程中起到了关键作用。

关键词: 超临界地质流体; 混溶; 俯冲带; 伟晶岩

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

超临界 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 流体的结构和输运性质

卢奕帆¹, 孙义程^{1*}, 夏国欣¹, 刘显东², 王国光², 陆现彩²

1. 河海大学 海洋学院, 南京 210024;

2. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

理解超临界地质流体的结构和输运性质对于深入了解它们在俯冲带中的行为至关重要。此前的研究已对源自长英质熔体的超临界地质流体有所了解, 但我们对深俯冲带中由超镁铁质熔体形成的超临界地质流体仍然认识有限。在这项研究中, 我们采用第一性原理分子动力学方法, 系统研究了 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系在 2000~3000 K 和 10 GPa 压力下, 以及水含量范围为 0~70% 的结构、元素自扩散和黏度。我们的研究证实了先前实验观察到的超镁铁质熔体由于溶解水而发生的聚合现象。在 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系中, 水和 OH 主要与 Mg 结合, 形成 $\text{Mg-H}_2\text{O}_n$ 和 Mg-OH 种型。结果表明, 随着水含量的增加, $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系的黏度在开始阶段呈现出快速下降的特点, 随后逐渐降低。在 2000 K 下观察到的黏度快速下降并非由于结构解聚导致, 相反, 在此过程中体系的结构变得更加聚合。驱动黏度快速下降的关键因素是质子化硅酸盐单元比例的增加。超临界 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 流体的低黏度使其迁移率达到比玄武质熔体高 2 到 3 个数量级, 比碳酸盐熔体高 1.7 到 20 倍。通过这些结果与源自长英质熔体的超临界地质流体进行比较, 我

们认为, 俯冲带中由不同硅酸盐组分形成的超临界地质流体表现出相似的低黏度, 仅存在细微差异。超临界地质流体促进元素迁移的能力主要取决于这些元素在超临界地质流体中的溶解度。在超临界 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 流体中, 我们观察到 Q^0 和 Q^1 是主要的种型。在 20% 到 30% 的水含量范围内, 超临界 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 流体中 Q^n 的比例分布为: $Q^1 > Q^0$ 。然而, 当水含量超过 30% 时, Q^n 含量的顺序变为: $Q^0 > Q^1$ 。 Q^2 的含量相对较低, 而 Q^3 和 Q^4 的含量可以忽略不计。这项研究表明, 超临界 $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 流体不仅含有大量低 Q^n ($n \leq 1$) 种型, 而且还含有很大比例的 OH^- 。在深俯冲带中, 由俯冲洋壳释放流体产生的超临界地质流体将更富集单体 $[\text{SiO}_4]$ 。这种结构有利于与特定元素 (例如高场强元素) 形成络合物, 并促进它们被超临界流体迁移。此外, 超镁铁质熔体形成超临界地质流体过程中大量释放的 OH^- 可能是深俯冲带中 OH^- 的重要来源。

关键词: 超临界地质流体; 第一性原理; 俯冲带; 结构; 输运性质

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFA0702700)、国家自然科学基金项目 (42373033)、中央高校基本业务费 (B240201111)

第一作者简介: 卢奕帆 (2003-), 本科生, 研究方向: 计算地球化学. Email: 2113010128@hhu.edu.cn

通讯作者简介: 孙义程 (1987-), 副教授, 研究方向: 计算地球化学. Email: sunyicheng@hhu.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

巴西 Gilbués 砂矿金刚石形态形貌学特征及其指示

战雨仟¹, 梁伟章¹, 丘志力^{1*}, 丁永康²

1. 中山大学 地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082;

2. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310013

巴西钻石的研究历史可追溯至 18 世纪初期, 近年来, 巴西钻石的研究取得了重要突破, 尤其是超深钻石的发现 (Svisero 等, 1995、2017)。这些钻石含有来自地球深部 (如下地幔) 的矿物包裹体, 为研究地球深部过程提供了直接的证据 (Walter 等, 2011; Pearson 等, 2014)。而金刚石表面微形貌作为一种记录地质信息的天然“档案”, 为揭示其形成演化及搬运沉积过程所经历的地质事件、熔流体性质及环境变化等提供了重要依据。本文对从巴西皮奥伊州 (Piauí State) 南部的 Gilbués 矿区收集的 27.4 ct, 共 86 颗金刚石进行形态形貌特征的观察分析, 结合前人在熔/溶蚀实验等方面的研究成果, 探讨巴西 Gilbués 砂矿金刚石对其经历的地幔形成、岩浆流体溶蚀和搬运沉积等形成过程的指示。通过对样品的深入观察, 我们发现: 1、研究样本以“十二面体+深蚀坑、深蚀沟”等严重熔蚀的地幔熔蚀特征组合为主, “八面体+三角形/锯齿状薄层+三角状台阶面/多阶地+深蚀坑”次之, 反映了巴西 Gilbués 砂矿金刚石在地幔中遭受了高程度的熔蚀作用 (Fedortchouk 等, 2017; 薄昊楠等, 2019; 丁永康等, 2024)。此外, 具有多阶地或三角状台阶面的八面体金刚石表明其可能曾经历过温度小于 1450 °C 的含水碳酸盐熔体的熔蚀作用 (Fedortchouk 等, 2019); 2、Gilbués 砂矿金刚石表面呈现尖底/弧底三角形凹坑、拉长形滴状丘和六边形凹坑组合, 具有富 CO₂ 溶蚀的特征, 指示其可能经历过 X_{CO₂}>0.9 的流体环境; 平底浅三角凹坑、圆形蚀坑等的存在则和富 H₂O 流体溶蚀环境有关, 指示了 X_{CO₂}<0.5 的流体环境 (Fedortchouk 等, 2017;

丁永康等, 2024)。Gilbués 砂矿上述金刚石表面的次生形貌特征记录了携带金刚石金伯利岩岩浆流体环境的变化或者显示金刚石来源不同。此外, 四六面体兼具富 CO₂ 和 H₂O 流体的表面微形貌特征的出现可能表明岩浆流体在上升过程中存在富 CO₂ 和富 H₂O 的转变, 在较高压阶段可能为富 CO₂ 流体, 在近地表为富 H₂O 流体。这些形貌特征为理解金伯利岩浆的演化或砂矿金刚石的来源提供了重要线索 (Spark 等, 2009; Fedortchouk 等, 2010、2019); 3、金刚石表面的色斑和蚀象特征揭示了其在沉积过程中的经历。绿色色斑是 α 粒子辐射损伤的结果, 而黄褐色色斑则是绿色色斑在加热条件下转化而来, 表明这批金刚石部分曾经历局部加热的地质环境 (Vance 等, 1972、1973; Eaton-magaña 和 Moe, 2016)。绿色和褐色色斑共存的金刚石可能经历了多次辐照和加热过程, 且绿色色斑清晰、呈现圆形等特征反映 Gilbués 砂矿金刚石在冲积矿床中与放射性矿物共同沉积后的稳定辐射作用 (杨明星等, 2002; Nasdala 等, 2013)。上述研究显示, 巴西 Gilbués 砂矿金刚石的来源可能较为复杂, 晶体表面形态形貌学特征反映其在地幔赋存期间所经历过地幔和岩浆流体的溶蚀作用, 熔流体的性质与特征可能还发生过转换。此外, Gilbués 砂矿金刚石在后期的沉积搬运过程中遭受地层的辐射损伤和机械磨蚀过程。

关键词: Gilbués 砂矿金刚石; 形貌学; 形成过程; 流体环境; 后期变化

第一作者简介: 战雨仟: 硕士研究生 (2001 年-), 女, 主要研究方向: 金刚石形成及其对深部地质过程的指示; E-mail: zhanyq25@mail2.sysu.edu.cn

*通讯作者简介: 丘志力: 教授 (1963 年-), 主要从事宝玉石成矿对重大地质作用过程响应及古玉文化演化研究; E-mail: qiuzhili@mail.sysu.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

部分熔融体系中熔体电导率效应的实验评估

刘汉永^{1*}, 杨晓志¹

1. 南京大学 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 地球科学与工程学院, 南京 210023

电导率作为对熔体存在高度敏感的地球物理参数之一, 被广泛应用于限定地球内部部分熔融区域的熔体含量及分布特征。然而, 其应用需要预先确定固体-熔体混合体系的导电性。当前对固体-熔体混合体系电导率的研究主要采用两种方法: 一种是分别测定熔体和固相矿物的电导率, 然后利用理想几何模型进行计算; 另一种是在高温高压条件下直接测定混合样品。但是, 前者基于熔体完全连通的理想化假设, 忽略了实际岩石中熔体的拓扑结构与三维连通性; 后者则受限于实验条件, 使用样品中固相矿物颗粒远小于实际岩石中的矿物, 却从未考虑过颗粒粒度的电导率效应。

本研究设计了一个新的熔体电导率测定方案, 对上述两种方法的结果进行了验证。实验初始材料为无

水橄榄石和碳酸盐混合物 ($\text{Li}_2\text{CO}_3\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-K}_2\text{CO}_3$), 熔体含量为 0.3%~10%, 橄榄石粒度为 0.5~20 μm , 实验压强和温度为 1 GPa 和 200~700 $^\circ\text{C}$ 。结果表明, 理论模型计算的混合体系电导率显著高于实验测定值, 在低熔体含量条件下 (<5%) 尤为显著; 而当熔体含量相同 (2%) 时, 体系电导率随粒度的升高而降低。以上研究结果表明, 现有方法系统性地高估了地球深部熔体的导电效应及其含量, 对熔体在局部区域特殊地质现象 (如软流圈电导率异常) 成因或动力学过程中所扮演的角色需要重新认识。这一发现也适用于其他矿物-熔体或矿物-流体体系电导率。

关键词: 电导率; 部分熔融; 高温高压实验

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

硅酸盐熔体和沉积物脱水流体交代岩石圈地幔过程的热动力学模拟及定年

王于健^{1*}, 刘金高¹

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083

岩石圈作为地球表层最刚性的圈层, 由地壳和上地幔顶部组成, 不仅是地球生命系统的物理载体(“生命之筏”), 更是地球深部与表层物质-能量交换的核心枢纽。自形成之后, 岩石圈就不断受到俯冲带板片脱水/熔融形成的熔/流体以及下伏软流圈地幔熔体的交代和改造。定量阐明这些交代过程如何改造岩石圈地幔化学成分, 尤其是成矿关键金属元素的分配及分异行为, 以及准确限定交代作用的时间是固体地球科学领域的重要科学问题。本研究利用系统的岩石学、全岩-矿物元素-同位素地球化学, 结合 alphaMELTS 热力学模型, 针对大洋岩石圈地幔橄榄岩(加拿大 Bay of Islands 蛇绿岩地幔橄榄岩), 系统厘定了俯冲带背景下不同熔/流体致使地幔楔发生含水熔融的地球化学过程, 查明了方辉橄榄岩的成因(即俯冲沉积物脱水流体交代亏损地幔, 致使地幔发生进一步含水熔融)。在此基础上, 根据方辉橄榄岩的亲铜元素地球化学特征(低 Re/Ir, 高 Pt/Ir, Pd/Ir)揭示了俯冲带地幔交代过程促使 Re/Ir、Pt/Ir、Pd/Ir 强烈分异的控制机理。然而, 方辉橄榄岩和二辉橄榄岩的 ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 同位素组成基本一

致, 暗示 Re/Os 的强烈分异在短期内并未影响放射性成因 ¹⁸⁷Os, 从而约束了俯冲带地幔交代作用的时间(发生在近期)。此外, 还针对大陆岩石圈地幔橄榄岩(法国 Pyrenees 造山带 Lherz 地幔橄榄岩), 在地球化学尺度上准确识别了地幔再富集过程, 建立了有效的地球化学指标(MgO vs. TiO₂/Al₂O₃)。利用全岩 MgO vs. TiO₂/Al₂O₃ 新指标系统对比全球克拉通岩石圈地幔, 阐明了硅酸盐熔体交代作用在全球克拉通中普遍存在, 而高程度的交代作用会强烈破坏岩石圈的稳定性。利用一维渗滤模型模拟 Re-Os-Al 和 Lu-Hf 体系的行为, 有效限定了 Lherz 二辉橄榄岩发生地幔再富集的时间(约 20 亿年前)。本研究利用热动力学模拟的方式定量刻画了熔/流体交代岩石圈地幔的过程, 展示了不同熔融机制对全球不同构造背景下的岩石圈地幔的形成与演化的贡献, 并揭示了地幔再富集作用对克拉通岩石圈地幔稳定性的深远作用。

关键词: 岩石圈地幔; 交代作用; 热动力学模拟; 硅酸盐熔体

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

黑龙江省铜山斑岩铜矿床磁铁矿地球化学特征： 对成矿热液活动中心的指示意义

甘颜榕¹, 邓晓东^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

黑龙江省铜山斑岩铜矿床位于中亚造山带东段兴安地块的东北缘, 是兴蒙造山带的重要组成部分, 是我国重要铜多金属矿集区——黑龙江多宝山矿集区的重要组成部分。特别近年来紫金矿业有限公司在铜山矿床新发现了 V 号大型铜矿体, 表明该矿区深边部找矿仍具有巨大潜力。前人已对铜山斑岩铜矿床的岩石学、地球化学特征以及矿床成因等进行过一些研究, 但主要集中于浅部矿体, 对于近年来取得重大找矿突破的深部岩体缺少深入研究, 并且该矿床发育大面积青磐岩化, 并且强烈叠加于早期高温蚀变, 具有复杂的蚀变分带, 致使岩浆活动中心和热液活动中心不明确。磁铁矿广泛分布于岩浆岩、变质岩和沉积岩中, 也是大部分热液矿床中重要成矿期的常见金属矿物。并且由于磁铁矿具有反尖晶结构, 晶格中 Fe^{2+} 或 Fe^{3+} 能被 Ti、V、Cr、Mn、Al、Mg 等替代, 这些元素的种类、含量受控于形成时的物理化学条件, 进而反映成矿过程中岩浆-热液系统演变过程。本文以铜山矿床 19 个深钻中的系统采集的磁铁矿样品为研究对象, 利用光学显微镜和扫描电镜 (SEM) 确定其矿物形态和共生组合, 并在此基础上使用电子探针

(EPMA) 和激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪 (LA-ICP-MS) 原位分析技术测定铜山斑岩铜矿床中主、微量元素含量, 研究结果初步显示: (1) 磁铁矿产状为浸染状和脉状, 形态上显示为粒状和板状, 并且具有不同的矿物组合: 磁铁矿+钠长石+黑云母+石英、磁铁矿+黄铁矿+石英±黄铜矿、磁铁矿+黄铜矿+绿泥石±黄铁矿等; (2) 结合各种地球化学图解 (Ni/Cr-Ti、V-Ni、Ti+V-Al+Mn、Ti+V-Ca+Al+Mn 等), 表明铜山矿床中磁铁矿多为热液成因, 基本属于斑岩矿床类型, 且形成过程中温度、氧逸度、水岩交换等物理化学条件对磁铁矿中化学成分变化具有明显影响; (3) 根据 1 个剖面 (3 个钻孔) 中磁铁矿元素 V 随深度的变化趋势, 矿化地段 V 含量显著上升, 证实了磁铁矿在指示热液成矿中心的有效性。综上, 铜山斑岩铜矿床中磁铁矿是一种行之有效的找矿指示矿物, 且其微量元素特征能够指示其岩浆-热液演变过程, 有助于厘定成矿热液中心。

关键词: 铜山矿床; 磁铁矿; 主、微量元素; 成矿热液中心

黑龙江多宝山铜业股份有限公司委托项目《黑龙江多宝山矿集区成矿规律研究与深边部找矿预测》

第一作者简介: 甘颜榕 (2001-), 硕士研究生, 研究方向: 矿床学.Email: 1202311369@cug.edu.cn

通信作者简介: 邓晓东 (1983-), 研究员, 研究方向: 矿床学.Email: dengxiaodong@cug.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

高温高压下水镁石和水之间的 H 同位素分馏及其对进入地球深部水 H 同位素组成的启示

高才洪^{1*}, 刘耘^{1,2}

1. 成都理工大学 地球与行星科学院, 行星科学研究中心, 成都 610059;
2. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

氢同位素 (D/H) 被广泛地应用于示踪俯冲带水的循环过程。传统的观点认为, 在俯冲脱水过程中, 板片释放的水会富集 D 同位素, 而板片中残余的水会富集 H 同位素。然而, 这一观点是基于常压下含水矿物和水之间的 H 同位素分馏实验而提出的。最近的研究表明, H 同位素的分馏存在明显的压力效应, 忽略压力效应的影响可能会造成很大的误差。基于此, 本研究利用路径积分分子动力学 (PIMD) 的方法计算了水镁石和水在高温高压 (0~8 GPa, 300~1273 K) 下的 H 同位素分馏。我们发现压力会导致水镁石和水之间的 H 同位素分馏发生反转: 在低压下, 分馏系数为负; 而在高压下, 分馏系数为正。此外, 我们利用水镁石-水之间的分馏系数, 并结合俯冲带的温压模型, 模拟了不同俯冲带 (cold、warm 以及 hot) 中板片残余水和释放水的 H 同位素演化。模拟结果表明, 板片释放水和残留水的 δD 值与俯冲带的温度和压力密切相关。若板片在 H 同位素分馏

发生反转前完全脱水, 释放的水会富集 D, 板片水和释放水的 δD 值会随俯冲过程而降低; 若板片在 H 同位素分馏发生反转后发生大规模的脱水, 残留水会逐渐富集 D, 最终具有较高 δD 值的水会被板片带入深部地幔。这些结果与以往认为板块会携带极低 δD 值 (-234‰) 的水进入深部地幔的观点截然不同, 表明以往文献报道的具有极低 δD 值的样品可能并非深部俯冲的结果。此外, 具有较高 δD 值的水会被板片带入深部地幔, 其 δD 值特征与原始地幔储库 (-75‰至-220‰) 显著不同, 这将为研究地球深部样品的 H 同位素提供有力的支持。不过, 由于我们使用的是水镁石-水之间的分馏系数来代替俯冲脱水过程的 H 同位素分馏, 模型的结果可能会存在一定的误差, 未来我们会进一步提供更精确的结果。

关键词: 氢同位素; PIMD; 水镁石和水; 俯冲脱水过程; δD 值

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

Fe-Si-C-(H)体系中的轻元素共溶效应与出溶现象

朱峰^{1*}

1. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

液核发电机是类地星球维持全球性磁场并形成宜居环境的关键要素。然而, 目前对驱动液核发电机的能量来源尚存在较大争议。近期研究表明, 在铁-轻元素多元熔体中, 一些轻元素的溶解度之间存在相互制约的关系, 称为共溶效应, 数种共溶轻元素的总含量超出共溶溶解度曲线或曲面即会发生轻元素出溶。本研究利用多面顶压机实验和机器学习力场加速的第一性原理分子动力学计算对类地星球液核条件下 Fe-Si-C-(H)多元体系的相关系进行了探索, 发现其中存在显著的轻元素共溶效应和出溶现象, 且共溶溶解

度随温度降低而降低, 随压力升高而降低。这表明, 在地球、水星等成核可能偏还原的星球液核中, 如果同时存在 Si、C、H 等共溶轻元素且总含量达到共溶溶解度, 其在冷却过程中将持续出溶轻元素引发成分对流, 为星球发电机的运转和全球性磁场的维持提供能量来源。另一方面, Si、C、H 等轻元素在铁熔体中的共溶溶解度也为它们在液核中的总含量提供了约束。

关键词: 液核发电机; 轻元素; 高温高压; 多面顶压机; 第一性原理计算

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

富 Mn 流体对 Nb-Ta-Sn 成矿的重要作用: 埃及东部沙漠 Abu Dabbab 稀有金属花岗岩的证据

孙玉洁¹, 张超^{1*}

1. 西北大学 地质学系, 西安 710069

埃及中东部沙漠 Abu Dabbab 稀有金属花岗岩为高度演化的钠长花岗岩 ($Nb/Ta=0.245$, $Nb=50.34 \times 10^{-6}$, $Ta=215.2 \times 10^{-6}$)。经济资源以富 Mn 的铌钽氧化物和锡石为主。本文综合运用电子探针 (EPMA)、LA-ICP-MS、矿物面扫描和锡石 U-Pb 定年 (641 ± 8 Ma), 分析了白云母和铌钽氧化物成分演化规律, 揭示了富 Mn 流体中的 Mn^{2+} 迁移-沉淀在 Nb-Ta-Sn 成矿过程中的关键控制作用。岩浆演化晚期, Ta 相比于 Nb 具有更高的溶解度, 原生白云母主微量元素显示, 随着 Li-Rb-Cs 等含量的升高, Nb/Ta, Fe/Mn 逐渐降低。白云母 Rb-K/Rb, Cs-K/Cs 指示钠长花岗质岩浆较高的分离结晶程度 ($F=75\% \sim 95\%$)。前人实验岩石学数据表明, 流体饱和性熔体与富集活动性阳离子 (Mn) 流体相互作用时, 当共存流体中 Mn^{2+} 浓度 $>1\%$ ($450^\circ C$), 熔体中仅需 17×10^{-6} Nb, 铌锰矿即可达到饱和。钠长花岗岩中石英 Cl 环带记录了 $450 \sim 650^\circ C$ 结晶温度区间。富 Mn 流体可以提供必要的 Mn^{2+} , 促进铌钽矿物的饱和结晶。流体演化晚期, 由于温度和氧逸度等条件的影响导致软锰矿的沉淀

而致使热液中 Mn 活动性降低。Abu Dabbab 钠长花岗岩岩相学观察显示: (1) 铌钽族矿物颗粒 $Mn^{\#}$ ($Mn/(Mn+Fe) \times 100$) = 90, 边缘 Mn 含量略微降低。 $Ta^{\#}$ ($Ta/(Ta+Nb) \times 100$) 演化呈现核部铌锰矿 (42.33 ± 3.24) \rightarrow 幔部铌锰矿 (60.87 ± 8.80) \rightarrow 边缘锡锰矿 (76.49 ± 4.58) 的规律性分带; (2) 多期白云母的 Mn-F-Li 演化揭示阶段性富 Mn 流体行为: 热液次生白云母 (第二期) 在主成矿期富 Mn^{2+} 流体的环境下结晶形成, 具有较高的 Mn、F 含量, 而蚀变边缘 (第三期) 标志成矿后期氧化性流体中 Mn^{2+} 活动性逐渐降低的交代反应, 指示了富 Mn 流体阶段性的结晶交代作用; (3) 细晶石被软锰矿包裹, $Mn^{\#}$ 从核部 (97.26 ± 3.16) 至边缘 (51.83 ± 4.15) 显著降低, $Ta^{\#}$ 变化不明显, $Ta^{\#}$ 、 $Mn^{\#}$ 与 F 含量呈正相关, 该研究揭示了富 Mn 流体在稀有金属钠长花岗岩成矿 Nb-Ta-Sn 成矿中的控制机制。

关键词: Abu Dabbab 稀有金属花岗岩; Nb-Ta-Sn 矿化; 富 Mn 流体; 锡石定年

基金项目: 科技部重点研发计划项目 (2023YFF0804200)

第一作者简介: 孙玉洁 (2000-), 硕士研究生, 研究方向: 岩石学. Email: Syj243660@outlook.com

*通信作者简介: 张超 (1982-), 教授, 研究方向: 岩石地球化学和实验岩石学. Email: zhangchao@nwn.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

俯冲沉积物熔融过程中亲硫元素地球化学研究

薛硕^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 成矿室, 广州 510640

亲硫元素是指在地球化学性质上表现出强烈亲硫性的元素。亲硫元素不仅是一类重要的战略性矿产资源, 更是揭示地球深部动力学过程的关键地球化学探针。然而, 当前研究对俯冲沉积物熔融过程中, 亲硫元素的迁移机制及其控制因素尚不明确, 制约了我们对亲硫元素在地球各圈层的分布富集规律的认识。针对上述问题, 我们通过高温高压实验岩石学模拟, 系统揭示了沉积物熔体对亲硫元素的迁移能力和控制因素, 并阐明了地幔亲硫元素

在地幔的分布和富集规律。申请人重点开展了两个方面的研究, 主要包括: (一) 厘定了沉积物俯冲过程中碳酸质熔体对亲硫元素的迁移能力和控制因素; (二) 揭示了沉积物俯冲过程中硅酸质熔体对亲硫元素铈的携带能力, 破解“地球铈储库丢失之谜”。

关键词: 俯冲作用; 沉积物熔体; 碳酸质熔体; 硅酸质熔体; 亲硫元素

· 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 ·

熔体包裹体记录碱性玄武岩中的“碳印记”

曾罡^{1*}, 张慧丽¹, 陈立辉², Stephen Foley³, 刘建强², 王小林¹, 王小均²,
于津海¹, 任钟元⁴, 徐夕生¹

1. 南京大学 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 关键地球物质循环前沿科学中心, 地球科学与工程学院, 南京 210046;
2. 西北大学 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 地质系, 西安 710069;
3. 麦考瑞大学 自然科学学院, 悉尼 210900;
4. 广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640

原生的碳酸岩熔体在地球内部碳循环过程中扮演着重要角色, 但其在自然界中却极为罕见, 这严重阻碍了我们对这类熔体起源和演化的深入理解。本项研究在中国东部新生代碱性玄武岩中发现了天然的、碳酸盐化的硅酸盐熔体包裹体(其 SiO₂ 含量为 32.4%~40.0%)。通过对熔体包裹体的拉曼光谱分析, 也进一步证实这些熔体包裹体中溶解了 CO₃²⁻。对这些熔体包裹体的元素分析发现, 它们富含稀土元素(REEs)和 P₂O₅ (>2.0%), 具有高的 P₂O₅/TiO₂ 比值(>1.0)以及低 Ti/Gd 和 Hf/Sm 比值, 这些都是碳酸岩熔体的典型化学特征。同时, 这些熔体包裹体具有低的 K/U 和 Ba/Th 比值, 与前人提出的再循环含碳酸盐沉积物释放的原生碳酸岩熔体特征一

致。据此我们提出, 这些熔体来源于地幔过渡带中储存的含碳酸盐沉积物。进一步地研究发现, 这些熔体包裹体不同元素成分和元素比值之间呈现出很好的协变关系, 这一现象可以用熔体与橄榄岩的反应解释, 且该过程会导致原生碳酸岩熔体逐步转变为碳酸盐化的硅酸盐熔体。前人对中国东部新生代碱性玄武岩(尤其是霞石岩、碧玄岩)的研究揭示, 这些硅不饱和的岩石中普遍存在碳酸岩熔体的化学特征。因此, 本项研究的发现就为解释这一现象提供了重要的成因机制。

关键词: 碳酸岩熔体; 碱性玄武岩; 熔体—岩石反应; 地幔过渡带; 中国东部

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

Identifying dehydration-induced shear velocity anomaly in the Earth's core-mantle boundary

韩松松^{1*}

1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430077

Steep temperature gradient near the bottom of the mantle is known to generate a negative correlation between the shear wave velocity (VS) and the depth in most regions of the D'' layer, as detected by seismological observations. However, increasing VS with depth is observed at the D'' layer beneath Central America where the Farallon slab sinks, and the origin of this anomaly has not been well constrained. Here, we calculate the thermoelastic constants and obtain the elastic wave velocities of hydrous phase H with various Al contents and cation configurations, which may act as a water carrier to the D'' layer. We find its VS substantially

lower than the post-perovskite-type bridgmanite. The dehydration of Al-enriched phase H and the redistribution of Al from the hydrous component to dry silicates would raise the VS at approximately 100-150 kilometers beneath the top of the D'' layer. The presence of 3.5 wt.% water is sufficient to compensate for thermal effects to match the seismic anomaly at the bottom of the mantle beneath Central America. The positive slope of VS versus depth in the D'' layer may fingerprint deep water recycling.

关键词: 含水矿物; 地震波速异常

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

锆在含 F-B 花岗质熔体中的扩散实验研究

黄金花¹, 朱仁智^{2*}, 倪怀玮^{1,2}

1. 中国科学技术大学 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 合肥 230026;

2. 深空探测实验室, 中国科学技术大学, 合肥 230026

锆 (Zr) 是重要的战略性关键金属。研究发现, 与锆成矿相关的花岗岩富含挥发分氟 (F) 和硼 (B), 暗示 F 和 B 可能在锆成矿过程中起到了重要的作用。目前, 锆在含 F 花岗质熔体中的扩散实验研究十分有限, 且不同研究获得的 F 效应结果不能自洽, 而 B 对 Zr 扩散的影响尚缺乏实验研究。因此, 本项目采用活塞圆筒压机装置, 在 0.5 GPa 压力、1200~1400 °C 条件下, 通过天然锆石扩散进入熔体的系列实验, 测定了含 F (0~4%) 或 B (0~4%) 花岗质熔体的 Zr 扩散系数, 并同时探究了水和熔体成分对锆扩散速率的影响。实验结果表明, 在挥发分种类、含量及温压条件一致的情况下, Zr 在过碱性熔体中的扩散系数高于准铝质熔体, 表明熔体成分对元素迁移能力具有重要影响。在无水体系统中, F 含量由 0 增至 4% 时,

锆的扩散系数提升约 1 个数量级; 而 B 对 Zr 扩散的影响呈现非线性特征: 当 B_2O_3 含量从 0 增加到 0.7%, Zr 扩散系数增长了 6 倍; 而当 B_2O_3 含量从 0.7% 增加到 4% 时, Zr 的扩散系数降低为原来的 1/5。综合对比挥发分 F、 B_2O_3 、 H_2O 对 Zr 扩散系数的影响发现, 在挥发分总量含量较低 ($\leq 2\%$) 时, 各挥发分对 Zr 扩散的促进效应排序为: $H_2O > B_2O_3 > F$; 在挥发分含量较高 ($\sim 4\%$) 时, 促进作用变为: $H_2O > F > B_2O_3$ 。值得注意的是, 当 F、B、 H_2O 共存时, 其共同作用对锆扩散的促进效果显著低于各组分单独作用的线性叠加, 揭示多组分挥发分之间存在竞争性耦合机制。

关键词: 锆的扩散; 氟; 硼; 花岗质熔体

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

磷灰石示踪熔体-流体演化及稀土元素富集过程： 以南秦岭紫阳地区碱性岩为例

杨丽莎¹, 王连训^{1*}, 张超², 朱煜翔¹, 马昌前¹

1. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院, 武汉 430074;

2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

南秦岭紫阳地区发育一系列早古生代碱性岩, 包括辉长岩类(辉石岩、玄武岩、辉长岩和辉绿岩)、闪长岩类(辉石闪长岩和角闪二长岩), 以及正长岩类(黑云母正长岩和粗面岩)。前人研究认为这些岩石源自同一富集地幔源区, 并形成于同一岩浆演化序列。本文通过对这套杂岩中岩浆成因和交代成因的两类磷灰石进行系统研究, 揭示了它们在结构、微量元素(特别是稀土元素)和 Rb-Sr 同位素组成方面的变化规律, 进一步探讨了熔体-流体演化过程中 REE 的富集机制, 为理解碱性岩型 REE 矿床的形成机制提供了重要的理论依据。研究发现, 岩浆磷灰石的 REE 含量从辉长岩类(平均 2823×10^{-6}) 到闪长岩类(5417×10^{-6}) 再到正长岩类(37103×10^{-6}) 逐渐增加。与此同时, 大离子亲石元素(如 Sr、Ba)和相容元素(如 V、Sc)的含量呈现下降趋势。这一现象反映了熔体演化过程中辉石、角闪石和长石等造岩矿物的分离结晶作用, 导致残余熔体中 REE 逐渐富集。这与全岩成分中 REE 含量从镁铁质向长英质逐渐增加的规律一致, 表明磷灰石中的 REE 含量变化主要受控于熔体成分。通过计算磷灰石与熔体之间的 REE 分配系数, 我们发现随着熔体聚合度的降低, REE 在磷灰石与熔体中的分配系数呈指数升高, 进一步解释了磷灰石中的 REE 含量会在熔体演化末期显著提

升的现象。此外, 利用磷灰石 F 含量反算推熔体 F 含量, 结果显示熔体 F 含量从辉长岩类(平均 25026×10^{-6}) 到闪长岩类(25685×10^{-6}), 再到正长岩类(27983×10^{-6}) 逐渐增加, 与 REE 含量的变化趋势一致, 表明熔体 F 含量的增加可以进一步促进 REE 的溶解和富集。交代磷灰石主要发育于长英质岩中, 通常沿着岩浆磷灰石的边部或裂隙发生交代, 并伴生次生独居石。交代磷灰石的 REE 含量(平均 10482×10^{-6}) 显著低于岩浆磷灰石, 但更富 Sr、F、Cl、Ca, 表明富 Sr、F、Cl 和 Ca 的热液流体活化了磷灰石中的 REE, 并将其迁出且在附近沉淀形成了次生独居石。各类岩石中岩浆磷灰石具有一致的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7033~0.7046), 表明它们源自同一岩浆源区; 而交代磷灰石则表现出更高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.7090~0.7107), 表明交代热液并非来自同一岩浆源区, 可能为自三叠纪区域变质流体。因此, 研究区碱性岩的 REE 富集机制可归因于两个主要过程: (1) 熔体结晶分异导致 REE 在残余熔体中逐渐富集; (2) 后期外来流体交代作用导致 REE 活化并进一步迁移富集沉淀。

关键词: 磷灰石; 稀土元素富集机制; 熔体演化; 流体交代; 紫阳-竹溪碱性岩

基金项目: 湖北省自然科学基金(2022CFB116), 国家自然科学基金(42072082)

第一作者简介: 杨丽莎(1998-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: yls@cug.edu.cn

*通讯作者简介: 王连训(1983-), 教授, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: lianxunwang@cug.edu.cn

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

实验限定地幔楔碳封存

吴国济¹, 黄永胜^{1*}

1. 中国科学院大学广州地球化学研究所, 广州 510640

俯冲带在全球碳循环中起着至关重要的作用。近期的地球化学和地球物理研究发现, 地幔楔内的地幔岩石 (包括蛇纹岩和橄榄岩) 存在广泛的碳酸盐化, 这表明地幔楔存在一个潜在的碳储库。然而, 目前的研究缺乏对于多组分俯冲流体与地幔岩石反应所产生的碳封存的定量评估。在本研究中, 我们模拟地幔楔中的各种 P-T 条件, 研究了蛇纹石和橄榄石在 H₂O-CO₂-NaCl 流体中的碳酸盐化过程。研究结果表明, 碳酸盐化反应程度随流体中 P-T 和 CO₂ 浓度的升高而增加, 但随盐度的增加而降低, 尤其是在低盐度水平 (<10%) 下。盐度的增加会导致流体 pH 值下降、CO₂ 和 H₂O 的活度降低以及含盐流体中菱镁

矿溶解度增加, 从而影响矿物的碳酸盐化程度。基于前人的实验数据和本实验研究的数据, 我们得出了一个经验方程来量化流体中蛇纹石和橄榄石的碳酸盐化反应程度。通过经验公式外推到地幔楔条件得出对应的碳酸盐化反应程度, 我们估计在全球范围内俯冲过程中每年可在地幔楔中封存 33.7~42.4 Mt C/y。其中一部分封存的碳可能滞留在地幔楔的冷区域, 对长期碳储存和地震活动产生潜在影响。此外, 俯冲下沉拖拽和俯冲侵蚀等过程会将碳输送到部分熔融区域, 进而影响弧火山的喷发。

关键词: 俯冲带; 地幔楔; 碳循环; 多组分流体

第一作者简介: 吴国济 (2000-), 博士研究生, 研究方向: 实验岩石学. Email: 1969588288@qq.com

*通信作者简介: 黄永胜 (1990-), 副研究员, 研究方向: 实验岩石学. Email: mountainandspring@gmail.com

• 专题 5: 地球内部熔体和流体的性质、演化与效应 •

高温流体中稀土元素赋存形式的第一性原理模拟研究

楼彦成¹, 陈锰^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

流体与碳酸岩型、碱性岩型、热液型等典型稀土矿床的成矿过程关系紧密, 厘清流体中稀土元素的赋存形式是研究稀土矿床成因的关键基础之一。多数研究已表明, 稀土络合物是流体中稀土元素的主要存在形式。因此, 探究温度、压力和流体成分对不同种类稀土络合物稳定性的影响十分关键。研究稀土络合物的微观结构和稳定常数是研究其稳定性的常用可靠方法。目前, 相关研究在 $>300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度条件下较匮乏, 只在 La(III)-Cl^- 、 Y(III)-Cl^- 、 Y(III)-F^- 、 Y(III)-SO_4^{2-} 等少数络合物体系存在较详细的研究。因此, 我们运用第一性原理分子动力学模拟进行了 $300\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1000\sim 3000\text{ bar}$ 条件下 Gd(III)-Cl^- 络合物体系的稳定性的研究。结构信息的研究结果表明 (1) $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 Gd(III)-Cl^- 络合物的最大 Cl^- 配位数可能为 3, $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 Gd(III)-Cl^- 络合物的最大 Cl^- 配位数可能为 5;

(2) 随着温度的升高, Gd(III)-Cl^- 络合物的总配位数有所下降, 且随着 Cl^- 配位数的增加总配位数会降低 (大约从 8 降到 6 左右), 此外压力对配位数的影响较小; (3) 离子间距方面, 随着温度的升高, $r(\text{Gd-O})$ 有所增加, 而 $r(\text{Gd-Cl})$ 有所下降, 此外压力对两种离子间距的影响均较小。稳定常数的研究主要通过热力学积分结合约束分子动力学模拟的方法进行, 结果表明 (1) Gd(III)-Cl^- 络合物的累积稳定常数呈现上升趋势, 说明高 Cl^- 配位数的 Gd(III)-Cl^- 络合物在理论上能稳定存在; (2) Gd(III)-Cl^- 络合物的逐级稳定常数随着级数的增加而逐渐降低, 说明高 Cl^- 配位数的 Gd(III)-Cl^- 络合物的出现需要溶液中 Cl^- 具有较高的浓度。

关键词: 稀土络合物; 流体; 第一性原理; 分子动力学; 热力学积分

第一作者简介: 楼彦成, 博士后, 研究方向: 计算地球化学. Email: louyancheng@gig.ac.cn

*通信作者简介: 陈锰, 特任研究员, 研究方向: 计算矿物学、计算地球化学. Email: chenmeng@gig.ac.cn