

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

致密含水镁硅酸盐矿物在地幔转换带的命运

郭新转^{1*}, 宋云珂¹

1. 中国科学院地球化学研究所 地球内部物质高温高压院重点实验室, 贵阳 550081

水对地球深部物理化学性质具有重要影响。以往关于深部地幔水分布的研究表明, 致密含水镁硅酸盐 (DHMSs) 是水向深部输运的关键载体——通过冷俯冲板块携带, 水可能被输运至地幔过渡带甚至核幔边界。但是关于 DHMSs 稳定性的实验研究都是在水近饱和体系内开展的, 没有充分考虑水逸度的影响。本研究通过开展 16 GPa、21.5 GPa 压力及 1400 K 温度条件下含水 MgO-SiO₂-H₂O (MSH) 体系的相平衡实验, 揭示了地幔过渡带内 DHMSs 矿物的稳定域。核心发现表明: 当体系总含水量低于 1.23% 时, 水主要赋存于瓦兹利石 (wadsleyite) 和林伍德石 (ringwoodite) 中, 而非形成 DHMSs 矿物; 当含水

量超过该阈值时, E 相 (phase E)、超含水 B 相 (superhydrous phase B) 及含水斯石英 (hydrous stishovite) 等开始形成, 显著改变地幔过渡带的矿物组合与水分布格局。然而, 实际大洋俯冲板片的整体含水量通常低于 1%, 这意味着地幔过渡带可能成为 DHMSs 的“无法形成区”。本研究为深部水循环机制提供了新认识, 指出过渡带中的含水瓦兹利石和林伍德石 (而非 DHMSs) 才是该深度域主要的水赋存载体, 这一结论与地震观测数据高度吻合。

关键词: 地幔转换带; 致密含水镁硅酸盐矿物; 水; 含水矿物; 水逸度

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

金伯利岩石榴石捕虏晶揭示华北稳定和破坏部分之间的复杂岩石圈结构

刘为先¹, 戴宏坤¹, 熊庆¹, 郑建平^{1*}

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

华北克拉通由遭受显著破坏的东部块体和相对完整的西部块体构成, 其中东部块体的岩石圈明显减薄, 西部块体保留有地幔深根。然而, 完整和破坏部分之间的岩石圈结构尚未被有效揭示, 这阻碍了对华北克拉通差异破坏机制的深入理解。为此, 我们利用华北中部鹤壁地区金伯利岩石榴石捕虏晶开展了深部岩石圈化学成像反演研究。这些石榴石可以分为高 $Mg^{\#}$ 和低 $Mg^{\#}$ 两组: 高 $Mg^{\#}$ 石榴石 (>85.5 , 原子比 $Mg/(Mg+Fe) \times 100$) 一般具有较高的重稀土元素含量 ($\Sigma HREE > 20$) 且记录了高温 ($1064 \sim 1191$ °C) 和弱压力变化 ($24 \sim 26$ kbar) 的平衡条件, 低 $Mg^{\#}$ 石榴石 (<85.5) 则具有重稀土元素含量 ($\Sigma HREE < 15$) 并显示较宽泛平衡条件范围 ($817 \sim 1019$ °C, $19 \sim 29$ kbar)。此外, 低 $Mg^{\#}$ 石榴石的平衡温压具有正相关性, 对应

了 $120 \sim 130$ 公里厚岩石圈的稳态地温梯度, 高 $Mg^{\#}$ 石榴石则向高温方向偏离了地温梯度, 显示岩石圈的内部存在过热且难熔 (地幔橄榄石 $Mg^{\#} > 92$), 其相对升高的重稀土元素含量可能是加热驱动石榴石相-尖晶石转变导致重稀土元素重新分布的结果。高 $Mg^{\#}$ 石榴石所记录的岩石圈内部热扰动可能反映了软流圈通过古老岩石圈薄弱带的优先上涌, 这或许与古元古代的克拉通陆核的拼合有关。结合华北东、西部岩石圈结构的研究资料和环克拉通构造演化历史, 我们认为不均匀分布的岩石圈内部薄弱带和周边构造环境可能共同造成了华北岩石圈差异性破坏。

关键词: 石榴石捕虏晶; 地温曲线; 岩石圈地幔; 克拉通差异性破坏

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42320104001 & 42272053), 国家重点研发项目 (2023YFF0804404)

第一作者介绍: 刘为先 (2000-), 博士研究生, 研究方向地幔岩石学. Email: 1202210050@cug.edu.cn

通讯作者介绍:

戴宏坤 (1991-), 研究员, 博士生导师, 研究方向: 地幔岩石学与数值模拟. Email: hkai@cug.edu.cn

郑建平 (1964-), 教授, 博士生导师, 岩石圈演化. Email: jpzheng@cug.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

俯冲沉积物中氮循环效率的高温高压实验研究

黄伟桦¹, 杨燕^{1*}

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310027

作为大气和生命的关键组成元素, 氮在地球表层与深部之间的循环是调控地球宜居性演化的重要驱动力。尽管天然样品观测证实大量氮可通过俯冲带由地表进入地幔, 但俯冲板片对深部地幔氮储库的贡献仍不明确。本研究聚焦于俯冲板片中氮浓度最高的沉积物部分, 探究其在深俯冲过程中氮的分配行为。研究以泥质岩成分为初始体系, 通过添加氨水或硝酸铵作为氮源和水源 (其中氨水用于维持相对还原的实验条件, 硝酸铵用于维持相对氧化的实验条件), 采用多面砧压机在 10~12 GPa 和 800~1100 °C 条件下开展高温高压实验。实验结果表明, 多硅白云母及其分解产物钾-锰钨矿是沉积物中的含氮矿物, 且含氮体系中多硅白云母的的稳定域较无氮体系拓展了 1~3 GPa, 相边界位于 10~10.5 GPa。基于质量平衡原理, 研究进一步量化了含氮矿物与流体相之间的氮分配行为。由于实验条件下流体相为超临界流体 (Schmidt 等, 2004), 可溶解大量硅酸盐溶质, 因此在计算氮分配系数时需考虑溶质的影响。为此, 研究开发了预测超临界流体溶质含量的机器学习模型, 并将其预测结果应用于质量平衡计算, 从而实现了氮分配系数的精确评估。结果显示, 在 10 GPa 和 1000 °C 条件下, 氮在多硅白云母与超临界流体之间的分配系数为 0.031, 且与压强无

关; 而在钾-锰钨矿与超临界流体之间的分配系数范围为 0.008~0.064, 与压强呈正相关, 与温度和氧逸度呈负相关。通过对实验产物的矿物相比例和氮分配系数进行综合分析, 发现多硅白云母分解导致沉积物发生显著脱氮, 仅 43.3% 和 26.0% 的氮能够分别在冷俯冲带和暖俯冲带中得以保存, 并通过钾-锰钨矿继续向深部迁移。基于全球俯冲沉积物输入地幔的氮通量, 研究进一步估算出每年由钾-锰钨矿输入下地幔的沉积物氮最多仅有 1.5×10^8 kg, 相当于初始俯冲氮通量的 20%。即使经过 30 亿年的板块构造运动, 沉积物对下地幔氮储库的贡献也不超过 15%。综上所述, 本研究系统揭示了沉积物在深俯冲过程中的氮分配行为, 并对其氮循环效率进行了定量评估, 结果表明俯冲沉积物对深部地幔氮储库的贡献极为有限。近期研究发现 (Li 等, 2023), 俯冲板片中蚀变洋壳部分同样贡献了显著的氮俯冲通量。那么蚀变洋壳对地球深部氮储库的贡献如何? 这个问题尚缺乏明确认识。基于此, 我们正在开展后续研究, 重点探讨蚀变洋壳深俯冲过程中的氮分配行为, 以全面评估其氮循环效率。

关键词: 高温高压实验; 氮循环; 俯冲沉积物; 分配系数; 矿物稳定性

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

磷灰石中的挥发分揭示了华南板片撕裂引发的高温 S 型花岗岩岩浆作用

聂虎^{1*}, 夏小平¹

1. 长江大学 资环学院, 武汉 430000

沉积岩在白云母脱水熔融或水致熔融作用下形成的 S 型花岗岩, 通常具有较低的形成温度。然而, 研究表明, 存在一些含斜方辉石的高温/超高温 S 型花岗岩, 其成因仍未完全理解。华南印支期的大容山-十万大山花岗杂岩是一个典型的高温/超高温 S 型花岗岩带, 对该岩体的研究有助于揭示晚古生代至早中生代期间华南板块的构造演化过程。然而, 目前关于其构造背景的解释尚存较大争议。已有的解释包括与华南板块和印支板块在西南方向上的碰撞、古太平洋板块在东南方向上的俯冲撕裂, 以及与峨眉山幔柱的加热作用等因素的关联。挥发性成分是示踪流体来源的有效工具, 并为花岗岩的成因研究提供了重要见解。因此, 我们分析了大容山-十万大山花岗岩带中磷灰石的氯、氟和水含量, 以及氢氧同位素组成。基

于磷灰石数据计算的熔体 Cl/F 比值从西南向东北逐渐减小, 表明卤素成分来源于东北方向的俯冲板块输入。磷灰石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 9.7‰至 12.1‰之间, 相对均一, 指示了其来自变沉积岩熔融的来源。磷灰石的 δD 值变化较大, 最低值 ($-272.6 \pm 27.2\text{‰}$) 与地幔过渡带相当, 暗示流体可能源于深部地幔。大容山-十万大山花岗杂岩带的挥发性成分既包括俯冲板片脱水流体, 也包含深部地幔的流体。因此, 我们提出了一种成因模型, 认为特提斯洋的北向俯冲以及随后的俯冲板片撕裂诱发了深部地幔熔融, 基性岩浆底侵导致地壳岩石熔融并形成了这一套高温/超高温花岗岩带。

关键词: 磷灰石挥发分; 古特提斯; 华南; 印支期; 板片撕裂

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

水对硫、金、铜行为的控制及其对巨型斑岩矿床形成的制约

刘星成^{1*}, 李兰琴¹, 熊小林¹, 王锦团¹, 汪在聪²

1. 中国科学院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;

2. 中国地质大学(武汉), 武汉 430074

本研究通过高温高压实验(850~950 °C, 1.0~2.0 GPa)系统研究了水含量与氧逸度对硫溶解度及金铜分配行为的影响。实验结果表明, 富水条件(>10% H₂O)下岩浆中硫溶解度显著高于传统模型预测值, 且水含量对金在硫化物/熔体间分配系数具有决定性影响。在中等氧化条件(FMQ+2)下, 将熔体水含量从 2%增加到 15%可使金溶解度提高达 37 倍。这种显著增加源于高水含量抑制磁铁矿结晶, 导致熔体 FeO 含量升高, 进而增加了 S²⁻的含量, 促进了 Au-S 在熔

体中的络合。富水熔体中金在硫化物/硅酸盐熔体间的分配系数比贫水熔体低一个数量级。相比之下, 铜分配行为对氧逸度的依赖性强于水含量, 解释了金铜在岩浆-热液演化过程中的差异行为。这些发现表明, 对于巨型斑岩型金铜矿床形成而言, 高氧逸度可能不是必要条件, 岩浆水含量可能是更为关键的控制因素, 对于理解金富集的岩浆-热液成矿过程提供了新见解。

关键词: 斑岩型矿床; 硫化物; 分配系数

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

印度大陆俯冲驱动喜马拉雅-青藏高原造山带 地壳碳的大规模活化、迁移与释放

张茂亮^{1*}, 刘伟^{1,2}, 郎赞超¹, 刘丛强¹, 徐胜¹

1. 天津大学 地球系统科学学院, 天津 300072;

2. 内蒙古工业大学 资源与环境工程学院, 呼和浩特 010051

地球 99%以上的碳存储在其内部, 板块构造运动促进了地球深部和浅层之间碳的活化与迁移, 从而影响着区域和全球尺度上的气候与环境变化。喜马拉雅-青藏高原造山带是新生代时期印度大陆与亚洲大陆持续碰撞和俯冲的结果, 对全球碳循环和气候变化至关重要。在过去的几十年, 青藏高原及其周边构造隆升导致的硅酸盐风化和有机碳埋藏消耗了大气 CO₂, 部分学者提出将其作为碳汇。相反, 该地区也被认为是重要的碳源, 这是由于印度-亚洲大陆碰撞驱动的多期岩浆作用和变质作用导致火山与构造活跃区存在强烈的 CO₂ 释放现象。鉴于此, 喜马拉雅-青藏高原造山带是碳源还是碳汇, 长期以来一直存在争论。

本研究利用青藏高原南部定日-当惹雍错裂谷带水热流体的化学成分、He-C 同位素组成以及定量计算模型, 结合水热活动区和断裂带土壤 CO₂ 释放通量, 有效区分并厘清了深部碳来源及其活化、迁移与释放机制, 获得了喜马拉雅-青藏高原造山带前缘地区伸展构造的深部碳释放规模。结果表明, 裂谷带含碳流体主要来源于地壳碳酸盐岩或含碳沉积岩变质脱碳作用。空间上, 裂谷南部和中部含碳流体显示纯

地壳来源, 向北显示出幔源组分的增加。与裂谷中北部相比, 位于喜马拉雅地块的裂谷南部具有较高的地热区土壤 CO₂ 通量, 并且其空间分布与印度俯冲下地壳之上的喜马拉雅造山楔吻合。综合地质和地球物理资料, 认为印度大陆碰撞/俯冲背景下喜马拉雅造山楔地壳增温可能会增强变质脱碳作用, 而中地壳塑性流的加热效应以及含水流体渗透也能够提高变质脱碳反应的效率。构造上, 青藏高原南部的伸展构造利于含碳流体向上运移。因此, 印度大陆俯冲导致的造山带热状态和动力学扰动是地壳碳活化、迁移和释放的根本原因。通过地热区和断裂带空间分布等基础信息, 建立了伸展构造的 CO₂ 释放通量转换函数, 外推估算得到青藏高原裂谷带和正断层深部 CO₂ 释放规模为 $(37 \pm 21) \text{ Mt} \cdot \text{yr}^{-1}$, 其与洋中脊幔源 CO₂ 释放量相当, 表明喜马拉雅-青藏高原造山带是具有全球意义的重要碳源。上述研究结果为厘清全球地质源碳排放规模、评估大陆碰撞造山带的碳源/碳汇效应提供了重要基础数据。

关键词: 深部碳循环; 变质脱碳; 伸展构造; 大陆碰撞造山带; 青藏高原

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

超深地幔橄榄岩捕虏体中水的演化及效应

潘发斌^{1*}, 巫翔¹, 王超¹, 张艳飞¹, 周晓春¹, 何小波², 章军锋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 430078;

2. 浙江海洋大学 海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022

地球内部的水(包括水分子、羟基和氢气分子等)可以显著影响矿物的波速、电导率、热导率、流变学强度、相变温压条件和部分熔融作用等地球物理化学过程,是形成地表生物宜居环境的关键因素之一。上地幔造岩矿物主要包括橄榄石、单斜辉石、斜方辉石、尖晶石/石榴石等名义无水矿物,这些矿物中的水具有强不相容性和极易扩散逃逸等特征,导致地表出露的地幔橄榄岩的水含量普遍很低,阻碍上地幔中水的演化特征的直接研究工作。我们在浙江嵊县组玄武岩中采集了一套石榴石橄榄岩包体,在其退变石榴石中发现富水橄榄石包裹体。富水橄榄石包裹体含有大量纳米级(100~300 nm)的铁镍合金颗粒,并且铁镍合金颗粒附近的橄榄石的三价铁比例($\text{TFe}_2\text{O}_3=\text{Fe}^{3+}/(\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+})$)达到35%~40%,推测为橄榄石中二价铁发生歧化反应的产物,暗示其起源深度至少大于250公里。纳米离子探针(NanoSIMS)测试结果表明,这些橄榄石包裹体普遍具有很高的含水量($190\times 10^{-6}\sim 270\times 10^{-6}$),局部水含量达到 1350×10^{-6} 。拉曼光谱和红外光谱研究结果

表明这些水以弥散状利蛇纹石的形式存在于富水橄榄石的核部,该矿物结构特征表明这些水很可能是深部起源的富水橄榄石的残余水。橄榄石原位氧同位素测试结果表明富水橄榄石包裹体的富水区域和相对贫水区域的一致($\delta^{18}\text{O}=5.1\text{‰}\sim 5.6\text{‰}$),均为地幔正常的氧同位素组成特征,进一步验证了富水橄榄石的水来源于地球深部。根据橄榄石高温高压含水实验研究结果推测,我们新发现的富水橄榄石包裹体记录了橄榄石在350~130公里左右的含水量特征,证明中国东部上涌的软流圈地幔中含有大量水,其可能来自于地幔过渡带。中国东部新生代地幔的高水含量特征可以降低地幔橄榄岩的熔融温度,增加部分熔融程度,促进软流圈地幔的塑性流变过程,加速岩石圈根的破坏等。富水橄榄石的发现对中国东部软流圈地幔部分熔融过程和流变学特征等研究具有重要的科学意义。

关键词: 橄榄石; 水含量; 歧化反应; 铁镍合金; 地幔过渡带

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

拉曼光谱测定单个包裹体二氧化碳同位素揭示壳-幔相互作用与碳循环

吕万军^{1*}, 王浩¹, 王文璟¹, 胡锦涛¹, 张准¹, 王哲¹

1. 中国地质大学(武汉) 海洋学院, 武汉 430074

中国东部新生代多期次玄武岩浆活动携带的深源捕虏体记录了复杂的壳-幔相互作用与深部碳循环过程。研究团队基于新建立的激光拉曼原位碳同位素分析技术, 对山东昌乐一带新生代玄武岩携带的深源捕虏体橄榄石、辉石、刚玉等矿物中不同世代二氧化碳包裹体进行了高精度同位素测量, 发现方山玄武岩中刚玉巨晶生长环带与其核心二氧化碳包裹体有着显然不同的碳同位素组成, 刚玉核部的二氧化碳包裹体 $\delta^{13}\text{C}$ 值-8‰左右, 而多期生长环带中二氧化碳包裹体 $\delta^{13}\text{C}$ 值由内而外由-17‰左右降低到-21‰左右。幔源岩浆成因的刚玉环带记录了含碳同位素负偏的深部流体-熔体加入中国东部壳幔的过程, 是否与华南三叠纪俯冲陆壳底垫于华北南部岩石圈之下、富含有机碳的

陆壳部分熔融形成富硅质熔体向上渗透交代岩石圈地幔有关, 值得探索。北岩含尖晶石二辉橄榄岩捕虏体的橄榄石中包裹体二氧化碳同位素 (-19.6‰~20.4‰)、斜方辉石中包裹体二氧化碳同位素 (-15‰~9.7‰), 则记录了同位素由显著负偏逐渐变得偏重的碳加入过程, 可能记录并指示着古太平洋板块俯冲使得中国东部岩石圈发生的碳酸盐交代作用。理解中国东部地幔在中新生代受到多期次熔体/流体的交代所伴随的含碳物质的循环机制, 需要进一步把碳同位素记录与系统的岩石地球化学相结合深入探究。

关键词: 碳同位素; 流体包裹体; 壳幔相互作用; 拉曼光谱; 深部碳循环

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

挥发分对地幔的影响及其资源环境效应

汤艳杰^{1*}

1. 长江大学 资源与环境学院, 武汉 430100

挥发分(如氢、碳、氮、硫、氟、氯等)不仅影响地幔的物理化学性质、地幔对流和熔融过程,挥发分的分布和循环对地表环境系统和矿产资源富集过程也有重要影响。挥发分的存在显著影响地幔的热力学状态和物理性质。例如,水(以氢的形式)可以降低地幔矿物的熔点,促进部分熔融过程,影响地幔的熔融程度和熔体的成分,也对地幔对流的模式和速度产生影响。研究表明,地幔中的挥发分含量越高,其熔融深度越深,熔融程度也越高,这表明挥发分在地幔对流过程中起着重要的驱动作用。挥发分在地幔交代过程中,通过影响流体的性质和迁移行为,控制着地幔矿物的成分和结构变化。挥发分的分布可能是导致地幔异常结构和地幔柱活动的重要因素。例如,地核出熔体中的原生氢可以通过出熔过程从地核运移至地幔底部,形成深部挥发分储库,这为地幔柱的形成提供了新的解释。挥发分在元素迁移和关键矿产资源富集过程中具有显著作用。例如,富含挥发分的流体可以溶解地幔矿物中的特定元素,并将其迁移至其

他区域,从而形成富集的矿产资源。研究表明,地幔源区的碳含量与岩浆的碱度呈正相关,高碳含量的地幔源区更有利于关键矿产资源的富集。地球内部的挥发分通过火山喷发和地质过程向地表释放,对地表环境和气候产生重要影响。例如,火山喷发释放的二氧化硫可以形成硫酸气溶胶,反射太阳辐射,导致局部地区降温。二氧化碳的释放对全球气候变暖也具有重要影响。通过对火山岩、橄榄岩包体、深源金刚石等样品的地球化学分析,可以确定挥发分的含量、同位素组成以及元素分配系数等信息。可以通过高温高压实验模拟地幔的物理化学条件,研究挥发分在矿物中的溶解行为和分配系数。地球物理探测技术,如地震层析成像,可以揭示地幔的物理性质和结构特征,为挥发分的分布和迁移提供间接证据。此外,通过建立地幔对流、熔融、交代等过程的数值模型,研究挥发分在地球内部的动态行为。

关键词: 挥发分; 地幔过程; 资源环境效应

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

大陆岩石圈地幔来源岩石的卤素组成及改造过程

郑怡欣¹, 汪在聪^{1*}, 汪翔¹, 朱照先¹, 何焘¹

1. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院, 武汉 430070

卤素(F、Cl、Br、I)作为重要的挥发分,在地球长期演化过程中发挥着关键作用。岩石圈地幔是地球重要的卤素储库,研究岩石圈地幔卤素组成是理解卤素圈层循环的重要基础。幔源岩石常被用于推测岩石圈地幔的地球化学组成。然而,由于Cl、Br和I的流体活性强且易挥发,幔源岩石在多大程度上能够代表地幔的原始卤素组成,以及后岩浆过程如何影响幔源岩石的卤素组成,仍有待进一步研究。为此,我们对橄榄岩地体中的橄榄岩、辉石岩及煌斑岩的卤素地球化学特征进行了系统研究,以探讨其来源及改造过程。意大利 Ivrea-Verbano Zone 带的 Balmuccia 和 Baldissero 橄榄岩地体主要由新鲜的二辉橄榄岩组成,并被不同期次的辉石岩脉穿插。“左倾”的稀土元素分配模式图及亏损的 Sr-Nd 同位素均表明,这些岩石代表未受再循环组分交代的亏损大陆岩石圈地幔。然而,橄榄岩和辉石岩的卤素含量变化较大(Cl: <30~244 $\mu\text{g/g}$ Br: <0.10~0.94 $\mu\text{g/g}$ I: <0.015~0.12 $\mu\text{g/g}$),部分样品高于亏损地幔甚至是原始地幔的估算值。镜下观察显示,这些岩石中沿裂隙分布的次生流体包裹体广泛发育。结合高卤素/Nb 比值及其与 Ba/Nb 等流体交代指标的相关性,我们认为卤素的富集主要受后期流体渗滤作用影响,该过程可能发

生于地体抬升过程中。胶东煌斑岩形成于华北克拉通破坏峰期,具有岛弧型微量元素特征及放射性 Sr-Nd 同位素组成,指示其源区经历了俯冲组分的强烈交代。然而,煌斑岩的全岩卤素含量异常低(Cl: 58~170 $\mu\text{g/g}$ Br: 0.28~0.55 $\mu\text{g/g}$ I: <0.005 $\mu\text{g/g}$),与洋中脊玄武岩相当。尽管这些煌斑岩富含角闪石和黑云母等挥发分矿物,但电子探针分析表明角闪石的 Cl 含量很低(0.01%~0.04%)。基于卤素/K 比值的计算结果表明,相较于原始熔体,煌斑岩可能丢失了超过 90% 的卤素。我们推测,卤素的丢失主要由于熔体上升过程中发生流体饱和及出溶,导致卤素优先进入流体相。综上所述,幔源岩石中的 Cl、Br 和 I 易受后岩浆过程的改造。流体出溶过程导致富挥发分岩浆岩中卤素的强烈亏损,而流体渗滤作用则导致亏损的橄榄岩和辉石岩中卤素的不同程度富集。与 Cl、Br 和 I 相比, F 具有较强的亲石性和较弱的流体活性,不易受到后期改造的影响,可能更适合作为示踪地幔挥发分组成的指标。未来研究可结合 F、Cl、Br 和 I 的系统分析,以进一步揭示地幔中卤素的分布及其卤素在岩浆和后岩浆过程中的地球化学行为。

关键词: 卤素; 岩石圈地幔; 后期改造

基金项目: 国家自然科学基金项目(42273023, 41722302, 42103031)和国家重点研发计划项目(2016YFC0600103, 2023YFF0804200)

第一作者简介: 郑怡欣(1999-), 博士研究生, 研究方向: 卤族元素地球化学. Email: zhengyixin@cug.edu.cn

*通信作者简介: 汪在聪(1985-), 教授, 研究方向: 元素-同位素地球化学. Email: zaicongwang@cug.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

俯冲水诱发的金刚石及超低速带的成因

郑旭¹, 蒋佳俊¹, Joshua M. R. Muir¹, 王异¹, 张飞武^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

地球内部的碳和氢循环与关键的行星过程相关, 如影响地幔熔融、脱气和化学分异。但俯冲板片将氢带入深部地幔的命运仍知之甚少。我们首先利用第一性原理密度泛函理论 (DFT) 计算, 研究了极端下地幔条件下含水矿物与铁碳合金之间的化学反应过程。我们的研究表明 phase H 在核幔边界 (CMB) 与 Fe_3C 反应, 形成金刚石、 FeH 和 FeOOH , 如下方程所示: $\text{Fe}_3\text{C} + \text{MgSiO}_4\text{H}_2 \rightarrow \text{FeO} + 2\text{FeH} + \text{MgSiO}_3 + \text{C}$ (1); $\text{FeO} + \text{MgSiO}_4\text{H}_2 \rightarrow 3\text{FeOOH} + \text{FeH} + \text{MgSiO}_3$ (2); $4\text{Fe}_3\text{C} + 6\text{MgSiO}_4\text{H}_2 \rightarrow 3\text{FeOOH} + 9\text{FeH} + 6\text{MgSiO}_3 + 4\text{C}$ (3)。这些反应表明, 含水矿物随着俯冲板片带到下地幔深部与铁碳合金发生反应形成钻石, 同时富集深部地幔的氢和氧。生成的 FeOOH 可能促进富氧层的积累和增厚, 具有深远的全球地质意义。除此之外, 为了有效勘探富含金刚石、 FeH 和 FeOOH 的区域, 对理解它们独特的地震特征至关重要。我们沿地温曲线计算了它们的弹性性质, 研究结果在较低压力和温度下与实验数据吻合良好。计算结果显示金刚石、 FeH 和 FeOOH 的弹性常数和弹性模量都对压力和温度变化表现出显著的非线性变化。此外, 相比于 FeH 和 FeOOH , 金刚石的弹性各向异性非常显著。与 PREM 相比, 金刚石具有较高的体积模量和剪切

模量以及较低的密度。相反, FeH 和 FeOOH 具有较低的体积模量和剪切模量以及较高的密度。此外, 我们还计算了地幔岩模型混合密度和地震波速度 (V_p 、 V_s) 随其含量的变化。结果表明, 即使极少量的金刚石与背景地幔结合, 也能显著降低下地幔的密度并提高地震波速度。这为我们预测金刚石可能会在地球极端压力和温度条件下以及其他行星体上, 富含金刚石的区域将表现出异常高且各向异性的地震波速度。然而, 相反的是 FeH 和 FeOOH 表现出具有高密度和超低波速特征, 表明它们在可能 CMB 附近富集, 可能是 D'' 层中超低速带 (ULVZs) 的起源之一。这些发现为在地球地质历史长河中探测富含金刚石的区域和地球深部碳氢循环的地球物理学提供了潜在的指示方法。因此, 我们模拟计算在下地幔及核幔边界条件下, 铁碳合金和含水矿物之间的相互作用生成金刚石、 FeH 和 FeOOH 的化学反应, 显著影响我们对深部地幔动力学、地震异常和地球化学的理解。例如, 我们的工作为 ULVZs 的成因提供重要见解, 并支持金刚石是理解地球深部物质结构的重要窗口。

关键词: 金刚石; 高温高压; 弹性; ULVZs; 第一性原理

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2024YFF0807500), 国家自然科学基金项目 (42403035), 国家博士后科学基金 (2024 M753196) 和贵州省科技计划项目 (ZK 2024-standard-669)。

第一作者简介: 郑旭 (1996– 至今), 博士研究生, 研究方向: 计算矿物物理. Email: zhengxu@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 张飞武 (1980– 至今), 研究员, 研究方向: 理论地球化学和计算矿物物理. Email: zhangfeiwu@mail.gyig.ac.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

超钾质熔体电导率的实验研究：对印度板片撕裂和岩石圈熔融的指示

韩泽华¹, 王瑞^{1*}, 郭璇², Fabrice Gaillard³, 倪怀玮²

1. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083;

2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 合肥 230026;

3. Université d'Orléans ISTO, Orléans 045071

藏南新生代超钾质岩作为岩石探针是理解印亚陆陆碰撞和壳幔相互作用的窗口。最近, 高分辨率地震图像和大地电磁数据都清晰地表明俯冲到喜马拉雅-青藏高原下的印度板片发生了撕裂并为软流圈上涌提供了通道。来源于岩石圈地幔部分熔融形成的超钾质岩浆对于理解穿地壳的熔融状态及其熔融机制至关重要。本研究在活塞圆筒压机中 973~1773 K 和 0.5~1.5 GPa 条件下, 用阻抗分析仪测定了水含量为 0.01%~6.31% 的高镁超钾质熔体的电导率。通过拟合实验数据, 我们建立了高镁超钾质熔体电导率随温度、压力、水含量变化的定量模型:

$$\log \sigma = 4.963 - 0.576 \times w^{0.4} - [7586 - 1992.16 \times w^{0.4} + (251.2 - 1.608 \times w^2) \times P] / T$$

式中, σ (S/m) 为熔体电导率, w 是熔体中的水含

量(%), P (GPa) 是压力, T (K) 是温度。研究发现, 含水条件下 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 对熔体电导率的贡献变得显著。根据我们的模型, 藏南的高导低速区可能由 5%~15% 的水含量为 4.5%~7.5% 的超钾质熔体导致的。通过地球物理手段和地球化学数据的时空分布特征综合分析认为, 印度板片撕裂诱导了热异常的发育, 促使岩石圈地幔熔融形成超钾质岩浆。幔源含水超钾质岩浆底侵, 诱发地壳熔融形成含水花岗质岩浆, 这套岩石和斑岩成矿密切相关。我们的研究增进了对含水超钾质熔体电导率的理解, 并为青藏高原的岩石圈熔融状态和熔融机制提供了新的见解, 为理解大陆碰撞成矿作用提供了理论依据。

关键词: 电导率; 超钾质熔体; 碰撞带; 板片撕裂; 水含量

基金项目: 创新群体研究项目 (42121002), 国家重点研发计划 (2022YFF0800902), 深时数字地球前沿科学中心 (246 2652023001), “111” 计划 (B18048)

第一作者简介: 韩泽华 (1995-), 博士研究生, 研究方向: 地质学. Email: zehhan@163.com

*通信作者简介:

王瑞 (1986-), 教授, 研究方向: 斑岩铜矿成矿与找矿. Email: rw@cugb.edu.cn

郭璇 (1982-), 教授, 研究方向: 高温高压实验岩石学、熔体和流体的物理化学性质和作用. Email: guoxuan@ustc.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

橄榄石中分子氢的赋存机制与浓度依赖性扩散行为研究

王异¹, 张飞武^{1*}, Joshua M.R. Muir¹, 郑旭¹

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

挥发性氢作为地幔中水的主要载体, 对地球的气候和宜居性起着至关重要的作用。氢作为宇宙中丰度最高的元素, 其中分子氢是其常见的一种存在形式。最近的研究表明, 地幔中的氢并非仅以水合物或羟基(OH)的形式存在。特别是在早期地球或类地行星的高度还原条件下, 氢可能以分子氢(H₂)的形式稳定存在于地幔矿物中。为了深入理解这一过程, 本研究结合第一性原理计算与基于机器学习力场的分子动力学模拟, 系统研究了分子氢在橄榄石中的赋存机制及扩散行为。在橄榄石晶格间隙中, 氢原子通过形成稳定的 H-H 共价键(键长为 0.75 ± 0.03 Å)趋向于以分子形式存在。同时我们从氢在橄榄石中的电荷、

体系能量及运动轨迹等关键证据发现了溶解在橄榄石间隙位的氢倾向于形成分子氢, 且其稳定性与深度呈正相关。此外基于机器学习力场进行的大尺度长时间分子动力学模拟显示 H₂ 的扩散速率呈现出显著的浓度依赖性特征。在低浓度条件下, H₂ 以孤立分子形式缓慢扩散, 随着浓度增加, 扩散速率表现出显著的提高。本研究为理解地球深部水循环及其演化提供了新的视角, 同时也为早期地球和其他类地行星的深部水循环研究提供了重要参考。

关键词: 分子氢; 浓度依赖性; 分子动力学; 赋存机制; 扩散行为

基金项目: 国家重点研发计划资助(2024YFF0807500)

第一作者简介: 王异(2000– 至今), 硕士研究生, 研究方向: 计算矿物物理. Email: wangyi@mail.gyig.ac.cn

*通信作者简介: 张飞武(1980– 至今), 研究员, 研究方向: 理论地球化学和计算矿物物理. Email: zhangfeiwu@mail.gyig.ac.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

机器学习预测单斜辉石三价铁含量及其 氧逸度计对全球地幔氧逸度的意义

叶辰阳¹, 刘纯韬¹, 张舟^{1*}

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

单斜辉石作为地幔造岩矿物中重要的 Fe^{3+} 载体, 可稳定存在于斜长石-尖晶石-石榴石相系的宽泛压力域。尽管 Luth 和 Canil (1993) 早期已论证其作为氧逸度计的潜力, 但单斜辉石在地幔氧逸度评估中的应用仍显不足。本研究应用机器学习实现以下目标: 1) 构建相较 Huang 等 (2022) 更为泛化的单斜辉石 Fe^{3+} 预测模型, 无需预先确定单斜辉石的种类; 2) 基于扩展的高温高压实验数据集 (共 2369 组数据), 迭代 Qin 等 (2024) 训练的单斜辉石温压计; 3) 另整合 1185 组包含单斜辉石成分、温压、氧逸度及预测的单斜辉石 Fe^{3+} 含量和 $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$ 比值的数据集, 我们训练了新的单斜辉石氧逸度计。所有的数据之间无重叠, 已规避过拟合。此外, 模型优选策略采用两阶段流程: 优先选择测试集表现优异者, 继而剔除存在过拟合风险的模型, 表现为: 训练集与验证/测试集得分显著偏

离, 或验证集至测试集性能骤降。将模型应用于全球 9848 组地幔捕虏体、蛇绿岩和构造橄榄岩中的单斜辉石数据, 不仅能够复现此前基于尖晶石/石榴石传统方法揭示的不同构造单元间氧逸度横向分布规律, 更将预测范围从已有成熟研究的地区, 如 Kaapvaal 和 Siberian 克拉通, 拓展至因 Fe^{3+} 分析数据不足而有待进一步研究的地区, 如 Baltica 和 North Atlantic 克拉通, New Caledonia 和菲律宾蛇绿岩, 阿尔卑斯和西藏的构造橄榄岩等。全球各克拉通氧逸度-深度剖面呈现介于 0.8~1.1 对数单位/GPa 的梯度, 且自约 1.18 Ga 以来未呈现梯度随时间的演化趋势。以上工作扩展了地幔氧化还原状态研究的空间覆盖度与垂向分辨率。

关键词: 地幔氧逸度; 机器学习; 单斜辉石氧逸度计

第一作者简介: 叶辰阳 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 地球化学大数据. Email: yechenyang_geo@zju.edu.cn

*通信作者简介: 张舟 (1986-), 研究员, 研究方向: 地球化学大数据. Email: zhangzhou333@zju.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

地球化学与热力学模拟联合约束大洋冷俯冲洋壳的卤素行为

熊庆^{1*}, 李镒聪¹, 郑建平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

卤族元素(F、Cl、Br、I)是地球中关键的挥发分,在俯冲带熔流体活动、物质循环以及动力学演化中起着重要作用。本研究选取新喀里多尼亚变质混杂岩中蓝片岩-榴辉岩团块,通过全岩主微量元素分析、全岩卤素含量测定、矿物主量成分分析及相平衡热力学模拟,揭示冷俯冲背景下俯冲洋壳不同变质深度下的卤素演化规律。变质岩石学与相平衡模拟结果显示蓝片岩和榴辉岩的峰期条件分别达到 450~480 °C、12.2~16.0 kbar 与 510~550 °C、20.8~22.2 kbar。榴辉岩呈现典型拉斑玄武岩地球化学特征,蓝片岩则显示向钙碱性玄武岩演化的趋势。综合稀土元素配分、多元素蛛网图及 Th/Yb-Nb/Yb 比值图解(Th/Yb=0.04~0.52; Nb/Yb=1.24~7.79)分析表明,二者均具有 N-MORB 至 E-MORB 型源区属性,显示俯冲洋壳起源于新喀里多尼亚邻近洋盆。基于峰期变质温压条件与原岩地球化学特征,对比分析的卤素特征显示:(1) F 在蓝片岩($230\times 10^{-6}\sim 610\times 10^{-6}$)和榴辉岩($140\times 10^{-6}\sim 220\times 10^{-6}$)中保存率较高(相比蚀变洋壳 AOC: $17\times 10^{-6}\sim 442\times 10^{-6}$),但 F/Cl 比值显著升高(蓝片岩 4.6~34.4,榴辉岩 4.1~15.3 vs. AOC: 0.1~17.7),表明早期脱水阶段 Cl 优先迁移;(2) Cl 迁移丢失呈现阶段性: Cl 在蓝片岩相($15\times 10^{-6}\sim 79\times 10^{-6}$)已接近完全丢失(较 AOC: $6\times 10^{-6}\sim 1622\times 10^{-6}$),榴辉岩相进一步丢失至 $14\times 10^{-6}\sim 34\times 10^{-6}$;(3) Br/Cl 比值演

化特征为: 蓝片岩($2.8\times 10^{-3}\sim 18.6\times 10^{-3}$)较 AOC($0.5\times 10^{-3}\sim 13.4\times 10^{-3}$)升高,反映俯冲至蓝片岩相之前 Cl 迁移速率>Br(Br 含量: 蓝片岩 $46\times 10^{-9}\sim 571\times 10^{-9}$ vs. AOC: $19\times 10^{-9}\sim 2724\times 10^{-9}$);而榴辉岩 Br/Cl 比值($4.8\times 10^{-3}\sim 7.2\times 10^{-3}$)与 AOC 重叠,但 Br 含量($70\times 10^{-9}\sim 165\times 10^{-9}$)持续下降,指示蓝片岩相至榴辉岩相之间 Br-Cl 同步丢失;(4) I/Cl 比值在蓝片岩相($1.6\times 10^{-4}\sim 31.1\times 10^{-4}$ vs. AOC: $0.03\times 10^{-4}\sim 11.6\times 10^{-4}$)异常升高,反映 I 被相对保留,但在榴辉岩相 I 含量($<5\times 10^{-9}\sim 6\times 10^{-9}$)远低于蓝片岩($<5\times 10^{-9}\sim 65\times 10^{-9}$)与 AOC($4\times 10^{-9}\sim 131\times 10^{-9}$),指示 I 的最终丢失发生于榴辉岩相脱水阶段。本研究厘定冷俯冲体系中卤素分馏序列: Cl(蓝片岩相)>Br>I(榴辉岩相)>F(深部滞留),揭示其受控于多阶段脱水熔融作用,并标定了不同俯冲深度卤素脱挥发分作用的温压临界条件(Cl: 450~480 °C、12.2~16.0 kbar; I: 510~550 °C、20.8~22.2 kbar)。该分馏机制模式可以进一步解释弧火山岩卤素成分分带性,并揭示持续俯冲的蚀变洋壳可能是导致地幔过渡带卤素异常的关键物质载体。研究成果为构建俯冲带卤素循环模型及揭示地幔地球化学不均一性提供了新的制约。

关键词: 大洋俯冲带; 变质洋壳; 卤素行为; 物质循环

基金项目: 国家自然科学基金项目(42322303), 国家重点研发计划课题(2023YFF0804404)

第一作者简介: 熊庆(1986-), 教授, 研究方向: 地幔岩石地球化学. Email: xiongqing@cug.edu.cn

*通信作者简介: 熊庆(1986-), 教授, 研究方向: 地幔岩石地球化学. Email: xiongqing@cug.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

Impact of volcanic volatile fluxes on Mesozoic terrestrial biotas in northern China

王璐^{1,2*}, 徐其虎^{3,2}, 刘佳², 夏群科²

1. 上海大学 文化遗产保护基础科学研究院, 上海 200444;

2. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058;

3. 盐城师范学院 城市与规划学院, 江苏 盐城 224007

Volcanic eruptions significantly modify surface environments and climate, with profound effects on biota across various spatial and temporal scales. The spatiotemporal evolution of the Mesozoic Yanliao and Jehol biotas in northern China—two world-renowned terrestrial lagerstätten—correlates with Jurassic to early Cretaceous volcanic activity during the destruction of the North China craton. However, the coupling mechanisms between terrestrial volcanism and biological evolution remain poorly understood. In this study, we measured chlorine, fluorine, and sulfur concentrations in clinopyroxene phenocrysts and apatite inclusions from Jurassic volcanic rocks in northern China. Using experimentally calibrated clinopyroxene/apatite-melt partition coefficients, we quantitatively estimate the volatile degassing during the origin (0.1-3 Gt Cl, 0.06-1

Gt F, and 0.03-1 Gt S), development and flourishing (3-57 Gt Cl, 2-21 Gt F, and 1-10 Gt S), and decay (34-1002 Gt Cl, 10-216 Gt F, and 4-136 Gt S) phases of the Yanliao Biota. Our results, integrated with previous studies, suggest that environmental degradation and climate cooling induced by substantial toxic gas emissions likely contributed to the decline of the Yanliao Biota and impeded the development of the Jehol Biota. In contrast, the relatively limited volatile fluxes, reduced harmful element delivery, and sufficient nutrient element supply from volcanic products may have fostered favorable conditions for the development and flourishing of both the Yanliao and Jehol biotas.

关键词: volcanic eruption; volatile flux; terrestrial biota; Mesozoic; northern China

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

基于机器学习预测洋中脊玄武岩原始 CO_2 含量 及其对地幔碳循环的启示

雷天婷¹, 刘佳^{1*}, 夏群科¹, 周靖钧¹, 栾志康¹

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

洋中脊玄武岩 (MORB) 是研究上地幔成分和深部碳循环的关键对象, 但其在岩浆上升过程中常经历显著去气作用, 导致原始碳含量难以直接测定。尽管早期研究利用未显著脱气的 MORB 样品的 CO_2/Ba 比值重建原始 CO_2 含量, 但随着数据积累, 发现 CO_2/Ba 比值变化较大, 限制了其作为可靠指标的应用。为此, 我们整合了全球未显著脱气的 MORB 玻璃及熔体包裹体数据, 构建监督式机器学习模型, 基于主微量元素含量精确预测 MORB 脱气前的 CO_2 含量。该模型显著拓展了全球 MORB 原始 CO_2 含量的数据库。模型预测结果表明, 全球

MORB 的 CO_2 含量及其 CO_2/Ba 比值呈现显著的空间不均一性, 其中太平洋 MORB 普遍表现出较高的 CO_2/Ba 比值。此外, 研究表明, 地幔碳含量的富集机制不仅与地幔柱活动密切相关, 再循环洋壳物质及古俯冲板片释放的流体可能同样是重要的碳源。本研究创新性地将机器学习方法引入地幔地球化学研究领域, 为深入理解地幔碳含量、分布特征及其相关动力学过程提供了新的研究范式和技术路径。

关键词: 洋中脊玄武岩; 地幔; 碳; 机器学习

基金项目: 国家自然科学基金 (42022019 和 42373044) 及中央高校基本科研业务费专项资金 (K20210168)

第一作者简介: 雷天婷 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 岩石地球化学. Email: leitt1106@zju.edu.cn

*通信作者简介: 刘佳 (1985-), 研究员, 研究方向: 岩石地球化学. Email: liujia85@zju.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

H₂O 和 CO₂ 在天池火山钠闪碱流岩中的溶解度实验研究

童欣宇¹, 侯通^{1*}, 王萌²

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100000;

2. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100000

挥发分在硅酸盐熔体中的溶解度对于岩浆的熔流性质、元素分配及物理化学条件均有显著的影响, 而 H₂O、CO₂ 作为岩浆中最主要的挥发组分, 其溶解行为直接会影响到岩浆粘度、气体出溶阈值及喷发方式, 所以开展 H₂O 和 CO₂ 在岩浆中的溶解度实验研究, 具有重要的火山学意义。本文以长白山天池火山全新世喷发的钠闪碱流岩 (SiO₂=71.49%, Al₂O₃=11.84%, P.I.=1.10) 为研究对象, 利用高温高压实验系统测定 H₂O 和 CO₂ 在钠闪碱流岩熔体中的溶解度, 并探讨其对喷发动力学的指示意义。实验条件温度为 850 °C, 压力梯度为 50、100 和 200 MPa, 实验设备为冷封式高压釜。实验产物中挥发分含量通过傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 定量分析, 其中测定 H₂O 的吸收峰在 3580 cm⁻¹ 处, CO₂ 吸收峰在 2349 cm⁻¹ 处。实验结果表明在纯 H₂O 体系中, 熔体中 H₂O

溶解度随压力升高显著增加, 硅酸盐熔体溶解度与压力呈正相关关系。在 H₂O-CO₂ 混合体系中, 压力为 50 MPa, 流体相中 H₂O/CO₂ 的摩尔比由 3:1 变化到 1:1 时, 熔体中溶解的 CO₂ 浓度从 7.81×10⁻⁶ 增至 56.26×10⁻⁶, 而 H₂O 的溶解度从 1.53% 降至 1.46%, 揭示了流体相中 CO₂ 的浓度的升高会降低 H₂O 的溶解度。实验初步建立了钠闪碱流岩中 H₂O-CO₂ 溶解度的定量模型, 并与全球 104 次火山喷发, 其中 59 次爆炸性喷发, 45 次溢流式喷发的流纹岩熔体成分和水含量数据作对比, 为评估火山喷发前岩浆储存条件提供了关键参数, 对长白山等大型破火山口的喷发类型预测与灾害预警具有重要应用价值。

关键词: 天池火山; 挥发分; 高温高压; 溶解度实验; 火山喷发

基金项目: 国家自然科学基金项目【岩浆储运系统温压计和速率计的实验优化】

第一作者简介: 童欣宇, 硕士研究生, 专业方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: 1962668750@qq.com

通信作者简介: 侯通, 教授, 研究方向: 岩浆作用与成岩成矿实验. Email: thou@cugb.edu.cn

第二作者简介: 王萌, 副研究员, 研究方向: 岩浆活动与金属成矿作用. Email: mwang@cugb.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

地幔过渡带条件下石榴石含水性的实验研究

张凯¹, 杨晓志^{1*}

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

地幔中的水主要存储在名义上无水矿物的晶体结构中, 其含量显著影响地幔的物理化学性质(如流变强度、电导率、扩散行为等)和动力学过程(如地幔对流、岩浆演化等)。地幔过渡带(约 410~660 km)作为连接上、下地幔的关键层位, 其储水能力对于理解地球深部水储库和水循环至关重要。石榴石是地幔过渡带的主要组成矿物之一(体积占比约 40%), 但其含水性仍存在较大争议。前人大多通过在简单含水熔体体系中生长石榴石晶体进行含水性实验研究, 实验中未严格限定氧逸度、共存矿物组合等关键参数, 且生长晶体的成分与实际天然样品不完全匹配, 导致含水性数据差异显著(约 125×10^{-6} ~ 2900×10^{-6} wt. H_2O), 难以准确评估其对地幔过渡带水储库的贡献及相关的地质学效应。基于此, 本研究选择了三种代表性天然宝石级石榴石单晶(成分匹配天然超深金刚石中源于地幔过渡带的石榴石包体)作为初始样品, 在 15~21 GPa、1300~1500 °C、Fe~FeO (IW) 氧缓冲剂和亚固相线条件下, 系统开展了含水性实验。我们使用了橄榄石和石榴石的混合粉末作为传压介质, 以模拟地幔过渡带的矿物组合(石榴石+瓦兹利石/林伍德石); 除纯 H_2O 体系之外, 还使用了 H_2O - CH_4 混合流体体系来模拟真实地幔的复杂流体环境。实验结束后的样品经检测, 同时存在过剩水和氧缓冲剂的实验才被用于进一步的测定分析。产物石榴石经红外光谱检测表明普遍存在羟基形式的水, 结合进一步的分

析发现: (1) 所有石榴石样品的红外谱图全部在 $\sim 3630 \text{ cm}^{-1}$ 处呈现单一非对称的吸收峰, 这个峰一般被认为与石榴石式取代 ($\text{SiO}_4^{4-} = \text{O}_4\text{H}^{+}$) 有关, 这可能说明在地幔过渡带条件下, 石榴石中水的耦合主要受石榴石式的取代机制控制; (2) 共存流体为纯 H_2O 时, 石榴石羟基溶解度为 85×10^{-6} ~ 360×10^{-6} wt. H_2O , 且系统性随温度和压强升高而增加, 而 H_2O - CH_4 混合流体体系下石榴石羟基溶解度则会大大降低; 此外, 不同成分石榴石中羟基溶解度也存在一定差异(比如在 17 GPa、1400 °C 及纯 H_2O 作为流体时分别为 211 、 115 和 311×10^{-6} wt. H_2O)。这说明体系流体组成和化学成分均会影响石榴石的含水性; (3) 基于实验数据建立石榴石储水能力随深度的定量关系表明, 地幔过渡带中石榴石的储水能力随深度增加呈线性增强, 推测约在 660 km 处的最大值仅为 $300 \times 10^{-6} \pm 50 \times 10^{-6}$ wt. H_2O , 显著低于瓦兹利石/林伍德石 (2%~3% H_2O), 这意味着石榴石不可能显著影响地幔过渡带中水的总储量; (4) 冷俯冲洋壳在地幔过渡带深部以石榴石为主要组成矿物, 而其低温特性将进一步抑制对应条件下石榴石的储水能力, 使得以石榴石为主的俯冲板片不太可能将大量水再循环到地球过渡带。

关键词: 石榴石; 亚固相线; 含水性; 地幔过渡带; 深部水循环

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42230301, 42421002, 423B2202, 41725008)

第一作者简介: 张凯 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 实验岩石学. Email: zhangk@smail.nju.edu.cn

*通信作者简介: 杨晓志 (1980-), 教授, 研究方向: 实验岩石学. Email: xzyang@nju.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

地幔热状态差异控制中-东亚南北重力梯度带 两侧岩浆巨晶种类

胡琳琳¹, 戴宏坤^{1*}, 熊庆¹, 郑建平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

岩浆巨晶(如单斜辉石、角闪石等)通常产于陆内火山岩中,代表了早期岩浆活动的深部堆晶,可以记录岩浆组成和环境条件(如 P - T - fO_2 - H_2O)。中-东亚地区晚中生代-新生代的玄武岩中普遍含有各类岩浆巨晶,晶体种类存在明显的空间差异:南北重力梯度带东侧的玄武岩一般不出现角闪石巨晶,而西侧通常不含单斜辉石巨晶,其控制因素尚不清楚。为此,我们聚焦于华北西北部同时出现单斜辉石和角闪石两种巨晶的狼山-潮格火山岩区,巨晶的寄主岩为玄武岩,其形成年代分别为 95 Ma 和 89 Ma。研究发现,两类巨晶是组成相似的玄武质岩浆在壳-幔过渡带的堆晶,记录了相似的温压条件(单斜辉石: 0.8~1.2 GPa, 1061~1143 °C; 角闪石: 1.1~1.2 GPa, 1068~1129 °C)和不同岩浆含水量(单斜辉石: H_2O =

2.1%~2.8%; 角闪石: H_2O = 3.6%~4.7%),母岩浆都起源于软流圈顶部并不同程度含有水化岩石圈地幔熔体贡献。结合区域岩石圈在 110~80 Ma 期间存在持续冷却和两类矿物的稳定域范围,我们提出地温梯度变化是控制该地区 95 Ma 和 89 Ma 玄武岩中巨晶类型差异的关键因素,即相对热的岩石圈具有较弱的储水能力,难以为岩浆系统提供富水熔体。考虑到中-东亚岩石圈厚度及构造环境在晚中生代以来存在显著东、西差异,我们认为巨晶类型差异主要体现不同热状态岩石圈对挥发分保存能力的差别,东侧大地幔楔环境的高温岩石圈不利于含水矿物长期保存。

关键词: 岩浆巨晶; 华北西北部; 南北重力梯度带; 岩石圈热状态; 中-东亚大陆

基金项目: 国家自然科学基金项目(42320104001 & 42272053), 国家重点研发项目(2023YFF0804404)

第一作者简介: 胡琳琳(1994-), 博士研究生, 研究方向: 地幔岩石学. Email: gemxiaohu@foxmail.com

*通讯作者简介: 戴宏坤(1991-), 研究员, 博士生导师, 研究方向: 地幔岩石学与热力学模拟. E-mail: hk dai@cug.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

华北克拉通东北缘地幔的性质和演化:
以辉南地幔包体为例吴丹¹, 曹毅^{1*}

1. 中国地质大学(武汉) 地球科学学院, 武汉 430074

为精细阐明华北克拉通东北缘岩石圈地幔性质及其所经历的部分熔融作用、地幔交代作用等过程, 本研究以吉林辉南新生代玄武岩中地幔包体为对象, 开展了详细的岩相学和地球学的研究。根据矿物组成, 将地幔包体分为橄榄岩和橄榄辉石岩, 其中橄榄岩可分为两类。第一类橄榄岩为纯橄-方辉橄榄岩系列: 粗粒残斑结构, 具高的全岩 $Mg^{\#}$ 值(90.7~92.1) 以及低的全岩 CaO 和 Al_2O_3 含量, 平衡温度 TBKN 为 937~1116 °C。根据单斜辉石稀土元素配分曲线形态, 可将第一类橄榄岩进一步分为两个亚类: ① LREE 亏损型, 反映不同部分熔融程度的特点; ② LREE 富集型, 可能是部分熔融后受地幔交代的产物。第二类橄榄岩为二辉橄榄岩: 残斑状结构, 具低的全岩 $Mg^{\#}$ 值(89.6~91.4) 以及高的全岩 CaO 和 Al_2O_3 含量, 平衡温度 TBKN 为 848~1175 °C。根据单斜辉石稀土元素配分曲线形态, 可将第二类橄榄岩进一步分为两个亚类: ① LREE 亏损型, 可能是熔体与第一类橄榄岩反应形成; ② LREE 富集型, 可能是二辉橄榄岩形成后受地幔交代作用改造形成的。第一类橄榄岩可能代表了受弱硅酸盐熔体交代改造的古老岩石圈地幔部分熔融残余, 而第二类橄榄岩可能代表了受强硅酸盐熔体交代的再富集地幔。橄榄辉石岩: 具有残斑结构, 斜方辉石具有高的 $Mg^{\#}$ (91.1~91.9), 平衡温度 TBKN 为 921~978 °C, 单斜辉石富集 LREE、U、Th, 是熔体-橄榄岩反应的产物。岩相学和地球化学结果表明: 研究区岩石圈地幔经历

了两期熔体-橄榄岩相互作用。早期交代过程中, 熔体含量高, 发生大规模熔体-橄榄岩相互作用, 使得大部分亏损难熔的岩石圈地幔向富集的岩石圈地幔转变。由于交代的熔体不富集轻稀土元素, 使得形成的二辉橄榄岩单斜辉石轻稀土亏损, 该熔体可能来自于亏损的软流圈上涌。晚期交代过程中, 熔体含量低, 仅发生局部的熔体-橄榄岩相互作用, 形成轻稀土富集的橄榄岩和橄榄辉石岩。这些岩石中广泛发育海绵边和熔体囊结构, 个别样品局部发育嵌晶结构或熔体囊中发育角闪石, 同时单斜辉石具有弱的高场强元素亏损, 富集 Th、U, 高 Ti/Eu, 低(La/Yb)_N, 指示含水硅酸盐熔体的交代作用。这期地幔交代作用可能与太平洋俯冲有关。在俯冲过程中, 滞留在地幔过渡带的俯冲板片脱水部分熔融, 导致上覆大地幔楔中软流圈富集, 发生部分熔融, 形成含水硅酸盐熔体, 熔体在上升的过程中与岩石圈地幔相互作用, 使得部分橄榄岩发生交代作用, 局部熔体聚集的地方形成辉石岩。太平洋的俯冲可能对华北克拉通东北缘岩石圈地幔的形成演化起了重要的作用。该地区岩石圈地幔在垂向上具有明显不均一性, 既有饱满的岩石圈地幔又有古老难熔的岩石圈地幔残余。其中, 饱满的岩石圈地幔的成分接近于原始地幔, 代表了再富集的古老残留岩石圈地幔, 而非从软流圈新增生的岩石圈地幔。

关键词: 熔体-橄榄岩相互作用; 太平洋俯冲; 大地幔楔; 含水硅酸盐熔体

基金项目: 国家自然科学基金面上项目

第一作者简介: 吴丹, 博士研究生, 研究方向: 地幔包体地球化学及其显微构造, 975662285@qq.com

通信作者简介: 曹毅, 教授, 研究方向: 显微构造, caoyi0701@126.com

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

由大陆边缘海地幔不均一水含量揭示板块俯冲作用与大陆裂解的关联

杨帆^{1*}, 黄小龙², 徐义刚², 杨亚楠²

1. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

大陆的聚合与裂解是地球的基本构造演化模式。板块俯冲在大陆裂解过程中所起的作用一直备受争议。前人研究认为板块俯冲可能会引发地幔流循环, 为大陆岩石圈的伸展以及最终裂解提供所需的剪切力。然而, 这一假设常常因缺乏将板块引发的地幔流与裂解过程联系起来的地质证据而受到质疑。我们的研究为此提供了新的地质证据。我们通过对南海初始扩张与扩张期玄武玻璃的系统研究, 发现了南海从初始破裂到结束地幔水含量的高度不均一性。南海初始扩张期间 E-MORB 的关键元素比值 H_2O/F , H_2O/Ce 高于扩张末期西南次海盆 E-MORB 的 H_2O/F , H_2O/Ce , 指示更多的含水再循环洋壳物质的贡献。

南海洋壳的岩浆增生比例(M 值)显著高于开放大洋, 而我们也发现地幔含水再循环洋壳物质贡献与海盆拉张过程中 M 值成正比, 意味着南海初始拉张过程中地幔含水再循环洋壳物质为南海初始裂解提供了额外岩浆来源。我们提出这些额外的岩浆最可能由俯冲板片触发南海北缘地幔过渡带顶部低速层上涌熔融所引发。这些俯冲诱发的额外岩浆供给使得大陆边缘海早期扩张阶段形成了一种过渡型陆缘结构, 这也为过渡型大陆边缘的成因机制提供了一种解释。

关键词: 水; 俯冲; 大陆裂解; 南海; 洋中脊玄武岩

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

利用磷灰石示踪岩浆管道系统挥发分行为： 揭示辽西早白垩世火山喷发前过程

徐其虎¹, 夏群科^{2*}, 刘佳², 王璐³, 顾笑龔², 陈欢⁴

1. 江苏海岸带资源环境演变与智能调控重点实验室, 盐城师范学院 城市与规划学院, 江苏 盐城 224007;

2. 浙江省地学大数据与地球深部资源重点实验室, 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058;

3. 硅酸盐文物保护教育部重点实验室, 上海大学, 上海 200444;

4. 海洋地质与资源探测研究所, 河海大学 海洋学院, 南京 210098

火山作用(喷发类型、规模等)是影响壳幔物质循环、成矿成藏以及地球宜居性的重要过程。岩浆管道系统中挥发分(H、C、S 和卤素等)的迁移行为是控制喷发类型和规模的关键因素,但其动态过程仍缺乏有效示踪手段。磷灰石可以将多种挥发分元素(H、C、S、Cl 和 F)结合其结构中,被认为是追踪岩浆挥发分的重要工具。本文以辽西早白垩世火山岩(流纹岩、玄武岩、安山岩)为研究对象,利用电子探针针对磷灰石包裹体(寄主在其它矿物中的磷灰石)和磷灰石微晶进行测试,结合矿物成分、主微量元素,

从而更加准确地反演岩浆的储存深度并示踪挥发分在不同深度的行为。结果显示(1)张家口组流纹岩和四合屯玄武岩在喷发前水含量趋于饱和,推测可能是爆发式喷发;(2)义县玄武岩和四合屯高镁安山岩喷发前水含量不饱和,推测可能是溢流式喷发。本研究从磷灰石的视角示踪了古火山岩浆通道中挥发分行为,这为探讨火山喷发对环境的影响提供了新的佐证。

关键词: 挥发分; 磷灰石; 岩浆管道系统; 早白垩世火山岩; 辽西

基金项目: 国家自然科学基金基础科学中心项目(41688103), 国家自然科学基金青年基金项目(42403047), 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究面上项目(24KJD170003)

第一作者简介: 徐其虎(1990-), 讲师, 研究方向: 地球内部挥发分, 火山学. Email: xuqh@yctu.edu.cn

通信作者简介: 夏群科(1972-), 教授, 研究方向: 地幔地球化学, 岩石学, 火山学. Email: qkxia@zju.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

Low fraction of volatile-charged carbonate melts in the upper mantle

黄永胜^{1*}, Guoji Wu^{1,2}, Xuran Liang³, Kaiwei Tao^{1,2}, Michihiko Nakamura⁴,
Yuan Li⁵

1. 中国科学院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;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;

4. 日本东北大学 地球科学系, 仙台 000000;

5. 德国拜罗伊特大学 巴伐利亚地球科学研究所, 拜罗伊特 000000

Carbonate melts serve as an ideal medium for metasomatism, facilitating the global material cycle between Earth's surface and its interior. Recently, high electrical conductivity and low seismic wave velocity anomalies have been detected at the bottom of upper mantle, which are attributed to the presence of carbonate-rich melt. However, the spatial distribution of carbonate-rich melt in the mantle rock remains elusive. Here, we experimentally investigate the effects of volatiles (H_2O and NaCl) and Al_2O_3 - SiO_2 on the dihedral angle in olivine-carbonate melt systems under upper mantle conditions. Our findings reveal that the addition of volatiles significantly reduces the dihedral angle, reaching nearly 0° even at 1 GPa and 1200 °C. Our results indicate that, at the bottom of the upper mantle,

volatiles-bearing carbonate melt can completely wet the olivine grain boundaries. The decrease in dihedral angle is probably attributable to the high solubility of olivine in a low-viscosity carbonate melt containing volatiles. Our model calculations show that a minimal volume fraction of volatiles-bearing carbonate melt, ranging from 0.0002 vol% to 0.06 vol%, sufficiently explains the observed high electrical conductivity and low velocity anomalies. The interconnected networks/films of volatile-charged carbonate melts effectively facilitate the permeation of melt, ultimately resulting in extensive metasomatism and matter transport within the upper mantle.

关键词: upper mantle; carbonate-charged melt; dihedral angle; complete wetting; melt volume

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

Fluoritites produced by crystallization of carbonate-fluoride magma

Aleksandr Stepanov^{1*}

1. 中国地质大学(武汉) 资源学院, 武汉 430074

Magmatism on the Earth is dominated by silicate liquids. However, less common sulfide and carbonate melts attract a lot of attention due to their economic significance and anomalous geochemical properties. Experimental data suggest that fluoride and carbonate-fluoride melts could exist at conditions relevant to terrestrial magmatic systems (Veksler 2004; Yang and van Hinsberg 2019; Xue et al. 2024), yet the evidence of such melts in the crust remains tentative. Products of crystallisation of fluoride-rich melts have been observed as aggregates of F-rich minerals in topaz-bearing felsic rocks, peralkaline granites, and calcite-fluorite aggregates. Fluoride-rich melt inclusions have been discovered in the peralkaline granite of the Strange Lake pluton, Canada (Vasyukova and Williams-Jones 2016). The findings of fluid inclusions in fluorite-rich rocks led to interpretation of crystallization of these rocks from hydrous fluids and in magmatic-hydrothermal processes (Redina et al. 2020, 2021). While these observations demonstrate that fluoride-rich melts could form during the late stages of silicate and carbonate magma crystallization, the existence and appearance of rocks produced by such melts remains enigmatic. Rocks with high fluorite content, sometimes associated with carbonatites, have been observed in multiple locations (刘金字 et al. 2024), and are known

in several REE deposits in China (Xu et al. 2008). However, the geology, petrography and geochemistry of these rocks is rarely characterised in detail.

The Dunkeldyk area of the Pamir mountains in south-eastern Tajikistan contains dikes of distinctive rocks composed of calcite, fluorite, celestine-barite, sulfides, apatite, with minor quartz, biotite, and REE-fluorocarbonates (Stepanov et al. 2024; Stepanov et al. 2024). The dikes have sharp contacts with the host (meta-) sedimentary rocks and layering with ribbons, ranging from fluorite-bearing calcite carbonatites to fluoritites (rocks with >50% fluorite). The fluoritites are characterised by high Ca, F, Ba, Sr, REE and S coupled with anomalously low O. The geologic relations and textures suggest a magmatic origin of the dikes from melts close to calcite-fluorite eutectic that experienced nucleation-controlled differentiation during the crystallization of dikes and the formation of fluoritite cumulates in larger intrusions. The Dunkeldyk dikes demonstrate that sizable geological bodies of fluorite-dominated rocks could form from carbonate-fluoride melts originating by differentiation of alkaline silicate magmas.

关键词: fluoride-rich melt; carbonate-fluoride melt; fluoritite; Dunkeldyk dikes

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

俯冲起始含水岩浆诱发地幔辉石岩和纯橄岩形成

李宇¹, 曾罡^{1*}

1. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023

辉石岩仅占上地幔体积的 2%~10%，是地幔中最重要的岩性不均一之一。橄榄岩中辉石岩脉的形成通常归因于迁移的熔体，为壳幔相互作用提供了重要的机制。位于土耳其东北部的 Divrigi 蛇绿岩是新特提斯洋的弧前残片，发育了较为完整的蛇绿岩序列。在局部，观察到单斜辉石岩脉侵入至纯橄岩中，辉石岩的全岩和单矿物主量成分均指示其堆晶成因。计算出与辉石岩中单斜辉石平衡的母熔体具有玻安质岩浆的特征。通过对含水的低 Si 高 Ca 玻安质岩浆的岩石学结晶模拟显示了与单斜辉石岩一致的尖晶石、橄榄石、单斜辉石和斜方辉石结晶序

列。此外在纯橄岩中发育有高 Cr 型铬铁矿，并在铬铁矿中观察到角闪石等含水矿物包裹体，计算出与铬铁矿平衡的母熔体在主量成分上也具有玻安质岩浆的特征。据此我们推测，在俯冲起始阶段，含水的地壳物质俯冲导致地幔橄榄岩部分熔融产生一种含水的低 Si 高 Ca 玻安质岩浆，该岩浆侵入至地幔橄榄岩中经历堆晶形成了单斜辉石岩。同时，岩浆还与周围的地幔橄榄岩发生反应，诱发纯橄岩及高 Cr 型铬铁矿的形成。

关键词：辉石岩；玻安质岩浆；俯冲起始

基金项目：国家自然科学基金项目（42322202）

第一作者简介：李宇（2001-），硕士研究生，研究方向：岩石学. Email: yvli@smial.nju.edu.cn

*通信作者简介：曾罡（1985-），副教授，研究方向：火成岩与地幔地球化学. Email: zgang@nju.edu.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

大陆板内玄武岩铁同位素记录不均一软流圈 与地幔岩石圈的贡献

徐荣^{1*}

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

为了进一步阐明不同地幔组分对大陆板内玄武岩地幔源区的物质贡献, 我们对华南浙江地区新生代玄武岩进行了系统的 Fe 同位素研究 (Xu 等, 2024)。结果表明这些玄武岩的 $\delta^{56}\text{Fe}$ 与 SiO_2 、 $\delta^{66}\text{Zn}$ 、 Ca/Al 、 Zr/Nb 、 Ti/Eu 、 Hf 异常、 Dy/Yb 、 La/Yb 、 Nb/Y 、平衡压力、 K/La 、 Sr/Ce 比值具有相关性。此外, 早期低硅玄武岩具有中等富集的 Sr-Nd 同位素和高的 $\delta^{56}\text{Fe}$; 而晚期高硅玄武岩则表现出随着 SiO_2 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的增加和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的降低, $\delta^{56}\text{Fe}$ 大致呈现逐渐降低的趋势。正常地幔橄榄岩减压或者等压部分熔融都不足以产生足够大的 Fe 同位素分馏; 而源区氧逸度变化以及高压石榴石效应也都无法解释样品的 Fe 同位素变化。在排除了交代橄榄岩部分熔融的可能性之后, 我们认为 Fe 同位素主要反映了辉石岩组分的贡献。结合主-微量元素、其它同位素、温压结果, 我们认为早期重 Fe 同位素的低硅玄武岩是由含碳酸盐化榴辉岩/辉石岩的软流圈地幔在相对高压下发生减压熔融的产物; 晚期高硅岩浆则是由于软

流圈进一步减压熔融到更浅深度的产物, 这导致亏损橄榄岩组分的贡献增加, 从而稀释了易熔组分重的 Fe 同位素信号。然而, Fe 同位素随着 K/La 和 Sr/Ce 的变化趋势以及与 Sr-Nd 同位素的关系无法仅仅用不均一软流圈地幔减压熔融来解释, 还需要有交代地幔岩石圈组分的贡献, 这也可以合理解释样品的主-微量元素以及其它同位素特征。综上所述我们得到以下几点认识: (1) 含碳酸盐化榴辉岩/辉石岩组分的软流圈地幔在高压下发生低程度部分熔融可以形成观察到的重 Fe 同位素特征; (2) 进一步减压熔融随后与岩石圈地幔底部熔体混合导致轻 Fe 同位素特征; (3) 喷发在厚岩石圈之上的大陆板内玄武岩更有利于保存深部软流圈熔体的重 Fe 同位素特征; (4) Fe 同位素可以用来示踪大陆板内玄武岩地幔源区不同岩性的贡献。

关键词: 板内玄武岩; 铁同位素; 辉石岩; 岩石圈; 软流圈

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

循环洋壳中硫的深部循环: 板内玄武岩的记录

汪翔^{1*}, 汪在聪¹, 孙普², 杨宗锋³

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, 地球科学学院, 武汉 430074;

2. 中国科学院 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071;

3. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083

硫是地球系统中常见的挥发分之一。作为多价态的氧化还原敏感元素, 其在俯冲带的迁移循环对于理解地幔不均一性和氧化还原演化、金属的迁移富集与成矿作用、弧火山二氧化硫释放与环境气候变化起着重要的作用。蚀变洋壳是俯冲大洋板片中硫释放的最大贡献者, 尽管前期研究对蚀变洋壳在岛弧弧下/弧前深度释放硫的价态和同位素组成进行了广泛的研究, 但对于硫在更深的地幔循环还不清楚。本研究聚焦于中国东部新生代板内玄武岩, 其深部地幔源区(>100 km)受到了来源于太平洋洋壳来源熔体的改造, 能够揭示循环洋壳对深部硫循环的贡献。这些玄武岩携带许多含硫化物包裹体的高 $Mg^\#$ 单斜辉石巨晶, 其平衡熔体具有和寄主玄武岩一致的微量元素含量、分配模式以及 Sr 同位素组成, 指示其母岩浆与寄主玄武岩熔体来源于相似的深部地幔源区。因此, 考虑到地幔部分熔融和硫化物结晶分异过程中有限的硫同位素分馏, 辉石巨晶硫化物包裹体的硫同位素组成能够揭示新生代玄武岩及其地幔源区的硫同位素组成。结合其略高于亏

损地幔和冰岛玄武岩的 Sr-S 同位素以及低 Pb 同位素和壳源的 O 同位素组成, 这些特征都支持了地幔源区存在有再循环物质的加入。然而, 其地幔源区 $\delta^{34}S$ 值非常一致 ($\delta^{34}S$: $0 \pm 0.9\%$), 且与 MORB 相似, 表明蚀变洋壳来源熔体未能显著改变深部地幔的硫同位素组成。此外, 模拟计算结果表明, 无论是来源于蛇纹岩的氧化性流体还是蚀变洋壳自身释放的氧化性流体或熔体, 均无法解释中国新生代玄武岩地幔源区整体接近于 0 的硫同位素组成。因此, 源于深部循环洋壳的熔体整体是以还原性硫为主, 保留了脱水的玄武质洋壳的特点, 难以显著改造深部地幔的 $\delta^{34}S$ 和氧逸度组成。这与浅部地幔楔和弧岩浆的重硫同位素组成和氧化的特点显著不同, 表明俯冲板片释放流体/熔体中硫的价态、同位素组成以及相关的氧逸度并非恒定的, 而是会随着俯冲深度的变化而变化。

关键词: 硫循环; 大陆板内玄武岩; 循环洋壳; 氧化还原过程; 中国东部

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

岩石圈金刚石记录了克拉通的古地理亲缘性?

Zhou Zhang^{1*}

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

克拉通为理解早期地球的形成过程提供了关键线索, 包括大陆形成、构造活动以及生命的演化。尽管各克拉通具有独特的地质历史, 但其相关性研究能揭示大陆形成与全球构造活动规律。例如, 克拉通关联性为元古代以来的超大陆旋回及太古代超级克拉通假说提供关键证据。虽然地质观测(如镁铁质岩墙和古地磁数据)为重建古大陆提供了关键证据, 但克拉通下伏的岩石圈地幔根部对其形成与演化的理解同样至关重要。本研究通过研究克拉通岩石圈金刚石及其矿物包裹体的成分变化和亲缘关系, 揭示了岩石圈地幔根部的形成与演化过程。我们整合了来自 304 篇文献的全球数据集, 包括 12138 个地幔金刚石和 12080 个包裹体矿物数据, 涵盖了金刚石的地球化学数据($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 同位素比值、氮含量)以及矿物包裹体的元素含量。通过结合机器学习(LightGBM 算法)和统计建模, 我们分析了这些化学成分以评估克拉通之间的亲缘关系和相似性。研究表明, 来自 Kaapvaal、Amazon、Siberia 以及 Slave 克拉通的

金刚石在化学上相似, 这与它们在元古代超大陆聚合过程中的古地理联系一致。相比之下, Kimberley (Australia) 和华北克拉通则表现出独特的化学特征, 与 Kaapvaal, 金刚石和包裹体矿物的中心-中心相似性得分最低, 分别为 0.58 和 0.36, 反映了它们的相对孤立性和独特的构造过程。与太古宙克拉通形成相关的橄榄岩型金刚石表现出更紧密的成分相似性, 而与俯冲相关过程相关的榴辉岩型金刚石则显示出更广泛的变异性。机器学习利用包裹体化学成分有效分类了克拉通亲缘性, 但仅依靠金刚石同位素数据的效果较差, 凸显了多元素分析的重要性。尽管数据集具有较高的鲁棒性, 但采样偏差和稀疏的年代学数据(仅 5% 的金刚石具有年龄信息)等局限性表明仍需进一步研究。本研究建立了一个数据驱动的金金刚石研究框架, 结合机器学习和统计分析与传统地质方法, 推动了对克拉通演化和地球构造历史的理解。

关键词: 机器学习; 金刚石; 地球化学; 克拉通

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

俯冲洋壳中砷化镍型富铝含水二氧化硅在深下地幔条件下的稳定性

姚瑶¹, 张莉^{1*}

1. 北京高压科学研究中心, 上海 201203

部分俯冲板片能够穿越下地幔到达核幔边界, 俯冲板片中的水是否能输送至核幔边界取决于其中含水相在深下地幔条件下的热稳定性。俯冲洋壳中含约 20% 的游离态二氧化硅, 二氧化硅高压相是下地幔重要的水载体。在下地幔顶部压力条件下含 10% 氧化铝的 CaCl_2 型后斯石英的含水量超过 1%, 其 H/Al 摩尔比达到 0.7, 表明电荷耦合取代机制 $\text{Si}^{4+} = \text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ 是下地幔重要的储水机制。更高温高压的实验进一步发现 NiAs 型六方二氧化硅相可包含约 30% 以上的氧化铝且其含水量也进一步增加, 表明在下地幔条件下 AlOOH 组分在水的存储和运输中发挥了重要作用。本研究在激光加热金刚石压腔中开展了高温高压实验, 研究了在深下地幔条件下近似俯冲洋壳成分的多组分

体系 $\text{MgO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 中的储水相及其热稳定性。通过对高温高压实验产物开展的同步辐射 X 射线衍射测试以及对回收样品的透射电镜化学分析, 我们发现在 96~106 GPa 和 2000~2300 K 的条件下, 含 28.5% Al_2O_3 的 NiAs 型二氧化硅与含 8.2% Al_2O_3 的布里奇曼石共存, 表明俯冲洋壳中的 NiAs 型富铝二氧化硅在深下地幔沿正常地温线保持稳定。我们目前正在开展核幔边界条件下俯冲洋壳中该含水相的热稳定性的研究。含水俯冲洋壳在高温高压下的相变以及部分熔融对解释核幔边界的复杂结构有重要意义。

关键词: 下地幔; 高温高压; 俯冲洋壳; 含水相; 二氧化硅

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42150103)

第一作者简介: 姚瑶 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 高温高压实验矿物学. Email: yao.yao@hpstar.ac.cn

通讯作者简介: 张莉 (1980-), 研究员, 研究方向: 高温高压实验矿物学. Email: zhangli@hpstar.ac.cn

• 专题 6: 地球内部挥发分的分布和效应 •

金伯利岩与古老大陆亲缘性蕴含大陆长寿之谜

戴宏坤^{1*}, 郑建平¹, 熊庆¹

1. 中国地质大学(武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

巨厚、难熔、低温岩石圈深根是大陆长寿之根本, 在与软流圈之间相互作用过程中能长期保存, 但具体机制还不清楚。目前的研究大多是基于岩石圈根本身, 主要讨论软流圈如何影响岩石圈, 还缺乏岩石圈根如何影响软流圈的研究。金伯利岩是古老大陆地区特有的来源于软流圈顶部的岩浆岩, 可以用于揭示古老大陆深根之下的软流圈化学组成和物理状态, 进而从软流圈的角度揭示大陆长寿之谜。为此, 我们在详细评估岩石圈混染和后期蚀变影响的基础上, 系统计算了华北及全球典型金伯利岩的熔体抽取条件。研究发现, 金伯利岩岩浆的起源压力一般为 5 GPa 及以上, 熔体抽取主要发生在岩石圈厚度剧变处的软流圈顶部, 熔融区的潜热温度低于同时期软流圈温度、高

于古老大陆深根的温度, 显示低温大陆深根对软流圈热状态的影响, 低温、巨厚的古老大陆岩石圈为金伯利岩的形成创造了合适的温压条件。此外, 黏度估算显示温度对地幔黏度具有重要影响, 软流圈顶部的温度降低会导致黏度显著增加, 从而在低温古老大陆深根之下形成一层粘滞的“保护壳”, 避免下方炙热软流圈对古老大陆深根的侵蚀和改造, 促进了古老大陆长期保存。详细内容见 Dai et al., 2025, *Chemical Geology* 676, 122621. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2025.122621>.

关键词: 金伯利岩; 岩石圈-软流圈界面; 圈层作用; 大陆命运

基金项目: 国家自然科学基金项目(42320104001 & 42272053)和国家重点研发项目(2023YFF0804404)

第一作者简介: 戴宏坤(1991-), 研究员, 研究方向: 地幔岩石学与数值模拟. Email: hkdai@cug.edu.cn

通讯作者简介: 戴宏坤(1991-), 研究员, 研究方向: 地幔岩石学与数值模拟. Email: hkdai@cug.edu.cn