
地化所在嫦娥五号月壤中年轻的富硅岩屑岩石学成因研究中获进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/21307.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

地化所在嫦娥五号月壤中年轻的富硅岩屑岩石学成因研究中获进展。尽管已知的月球高度演化的岩石样品量较少，但它们记录了月球岩浆从玄武质到硅质熔体演化的极端分异过程，对月球样品的岩石学成因研究有重要意义。Roedder和Weiblen（1970）在多种阿波罗月球样品的熔融包裹体中发现液相不混溶现象，并推测硅酸盐的液相不混溶可能在月球早期大规模发育，或许高地斜长岩的一部分是“花岗质”的。实验研究证明，阿波罗月球样品中的硅质岩无法通过玄武岩分离结晶形成，而是硅酸盐液相不混溶作用的产物（Rutherford et al., 1976），但学界关于硅酸盐液相不混溶是否可以形成较大规模的、相互分离的“富硅”和“富铁”熔体存在争议。中国科学院比较行星学卓越创新中心成员、中科院地球化学研究所研究员杜蔚团队在嫦娥五号月壤样品中发现了两类具有高度演化成分的岩屑样品。通过详细的岩石学、矿物学、地球化学和年代学方面的研究并结合热力学计算模拟，研究推断A类岩屑形成于月壳浅部，其母岩浆经历硅酸盐液相不混溶作用，所产生的富硅熔体缓慢结晶形成侵入岩。根据遥感探测结果，A类岩屑极有可能来自Aristarchus撞击坑出露的年轻的（~25-37亿年）的“花岗质”侵入岩。B类岩屑则形成于高程度分离结晶的残留熔体。根据钙钛锆石定年（~26亿年）和计算模拟，研究推测其是嫦娥五号着陆区的Em3玄武岩经历约75%的分离结晶之后进入硅酸盐液相不混溶区间再进一步演化形成。研究证明：嫦娥五号月壤中存在其他较年轻的（~26亿年）玄武岩；硅酸盐液相不混溶作用可能在形成月球年轻的硅质侵入体和富铁玄武岩的后期演化过程中具有关键作用。

月壳主要由基性的斜长岩和玄武岩组成，并不存在一个与地球类似的花岗岩月壳。然而，阿波罗返回样品和月球陨石中存在少量的高度演化岩石，主要由石英二长闪长岩/二长辉长岩（QMD/QMG）和花岗质岩石（granite/felsite）等组成，其形成年龄介于38.8-43.2亿年之间（Meyer et al., 1996）。最为古老的高度演化岩石的年龄（~43.2亿年）与亚铁斜长岩和镁质岩套的结晶年龄相重叠，研究推测其或形成于月球岩浆洋（LMO）的最终残余物质，或为镁质岩套分离结晶后的残余熔体。其他较为年轻的花岗岩则可能是与前月海岩浆发生大规模结晶分异后可能出现的硅酸盐液相不混溶作用（SLI）有关，或者通过月壳岩石的部分熔融而形成，以及可能由形成雨海盆地的撞击事件产生的富KREEP成分的冲击熔体结晶形成。总之，这些高度演化的岩石记录了月球岩浆从基性的玄武质到富硅质熔体的形成过程，为月球早期岩浆活动和演化提供了宝贵的约束信息。

近年来，遥感探测发现月表分布着一系列硅质火山穹窿（如Mairan穹窿、Gruithuisen穹窿等）和少量的硅质侵入岩（如出露于Aristarchus撞击坑）（图1），其成分可能与地球粗面岩或流纹岩相似。而根据撞击坑统计定年结果，其中的一些硅质岩的形成年龄比阿波罗返回样品和月球陨石中的高度演化岩石更加年轻。这些相对年轻的硅质岩主要分布PKT内，因而先前研究认为它们的形成与富KREEP源区和玄武岩底侵作用存在关联。而对于嫦娥五号（CE-5）任务返回的位于风暴

洋北部的、结晶年龄仅为~20亿年 (Che et al., 2021; Li et al., 2021) 的月海玄武岩样品的研究显示, 其月幔源区贫KREEP (Che et al., 2021; Tian et al., 2021, 2022; Yang et al., 2022; Zong et al., 2022), 这表明KREEP可能不是PKT内较年轻的玄武岩以及富硅岩浆形成的先决条件。

此外, 部分学者认为SLI与月球花岗质或硅质侵入岩的成因有关 (Glotch et al., 2010, 2021), 且SLI形成的富铁熔体可能与月球富铁拉斑玄武岩的源区有关 (Hollister and Crawford, 1977)。然而, 学界对岩浆结晶分异到晚期发生SLI是否可以形成较大规模的、相互分离的“富硅”和“富铁”的熔体存在争议。因此, 包括硅质岩在内的月球高度演化岩石的成因和其源区与KREEP的联系均需要更多的月球样品研究进行验证和约束。

CE-5月壤样品虽以本地玄武岩为主, 但含有约10%由撞击带来的月表其他区域的物质 (Qian et al., 2021; Li et al., 2022)。CE-5着陆区周边的Mairan穹窿、Gruithuisen穹窿、Aristarchus撞击坑等出露硅质喷出岩或侵入岩, 因此, CE-5样品可能含有来自这些区域的高度演化岩石样品。

杜蔚团队在一块CE-5月壤粉末光片 (编号CE5C0800YJFM00101GP) 中发现了少量具有高度演化成分的岩屑 (图2), 并对这些岩屑开展了岩石学、矿物学、地球化学和年代学的研究。同时, 该团队针对不同的初始物质 (月球QMD、KREEP玄武岩、CE-5玄武岩), 运用不同的计算模型 (rhyolite-MELTS_v1.0x和MAGFOX) 进行了平衡结晶 (部分熔融) 和分离结晶的热力学模拟, 以探讨这些高度演化岩屑的成因、评估SLI机制在岩屑形成过程中的作用。

根据岩屑结构和钾长石成分, 可将鉴定出的岩屑划分为A型 (Type A, 岩屑01-04) 和B型 (Type B, 岩屑05)。A型岩屑亏损稀土元素, 具有典型月球花岗岩的V形稀土配分模式 (图3a), 其Th/La比值 (约0.34) 高于QMD和KREEP玄武岩 (0.11-0.19)。这些地球化学特征支持A型岩屑的母岩浆具有类似KREEP岩的稀土元素特征 (如QMD、KREEP玄武岩和CE-5玄武岩), 再经过陨磷钙钠石 (白磷钙矿) 等矿物的分离结晶之后发生SLI, 产生的富Si熔体结晶形成A型岩屑。研究认为, A型岩屑的形成必然经历SLI, 原因在于: 热力学计算结果表明月球QMD、KREEP玄武岩和CE-5玄武岩等经过分离结晶, 残余熔体势必会进入硅酸盐不混溶区域 (图4); 若不经历SLI, 无论发生分离结晶还是部分熔融, 具有类似KREEP微量元素特征的源区产生的熔体都会非常富集稀土元素, 与A型岩屑的地球化学特征不符。另外, A型岩屑中光滑的石英晶体表明其形成于一个低温 (<870 °C) 和缓慢冷却的环境, 说明A型岩屑的母岩是一个近月表的浅层侵入体。结合CE-5采样地点以及可能的富硅质侵入体位置, 研究提出A型岩屑的源区可能是Aristarchus撞击坑出露的富硅质侵入体 (模式年龄25-37亿年) 并通过撞击溅射到CE-5采样区域。

B型岩屑极度亏损Mg但强烈富集不相容元素。岩屑结构、组成矿物和全岩的稀土元素配分模式 (图3b) 表明, B型岩屑是具有与KREEP岩相似的微量元素特征的母岩浆 (如QMD、KREEP玄武岩和CE-5玄武岩) 发生高程度分离结晶并伴随SLI而形成。通过热力学模拟结合SLI过程中的元素分配行为计算发现, QMD和KREEP玄武岩中不混溶硅酸盐熔体的La/Yb比值低于B型岩屑, 而CE-5玄武岩中不混溶硅酸盐熔体的轻重稀土之间的分配与B型岩屑非常一致 (图5)。而B型岩屑中钙钛锆石的结晶年龄 (2.57 ± 0.26 Ga) 明显老于CE-5玄武岩, 因此排除了CE-5玄武岩是其母岩浆的可能。而CE-5玄武岩下腹的Em3玄武岩具有与CE-5玄武岩类似的主微量元素特征 (Qian et al., 2018, 2021), 且其撞击坑绝对模式年龄 (~2.54 Ga, Jia et al., 2020) 与B型岩屑的形成时间接近。因此, 研究认为B型岩屑可能形成于Em3玄武岩分离结晶后期 (分离结晶程度~75%) 的SLI过程。

该研究表明硅酸盐液相不混溶机制可能是月球岩浆活动的重要影响因素, 在月球年轻的硅质侵入体的形成和富铁玄武岩的后期演化过程中起到重要作用。此外, CE-5月壤中存在其他较年老的

(~26亿年) 月海玄武岩样品。

研究工作得到国家自然科学基金、中科院类地行星战略性先导科技专项、民用航天预先研究项目、中科院重点部署项目、中国博士后科学基金的支持。国家航天局提供了嫦娥五号样品。

[论文链接](#)

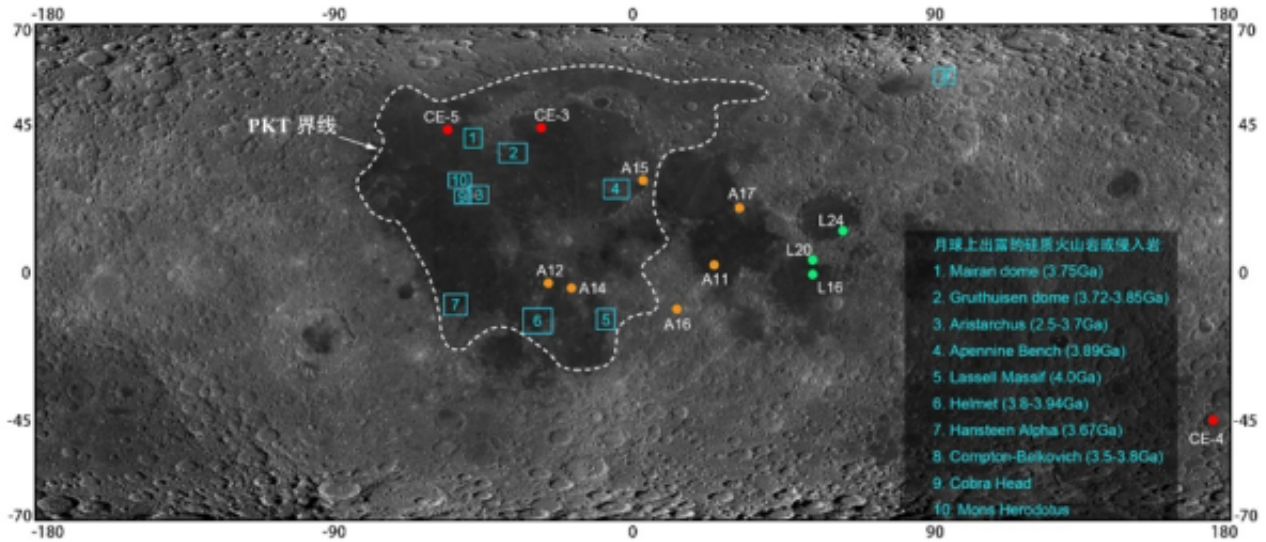


图1.遥感探测显示的月球硅质喷出岩和侵入岩位置示意图。图中标注的硅质岩形成时间为撞击坑绝对模式年龄（参考自Ashley et al., 2016；Boyce et al., 2018；Chevrel et al., 2009；Glotch et al., 2010, 2021；Shirley et al., 2016；Taylor et al., 2012；Wagner et al., 2002）。

图2.CE-5月壤光片样品CE5C0800YJFM00101GP中具有高度演化成分的岩屑的背散射电子照片。

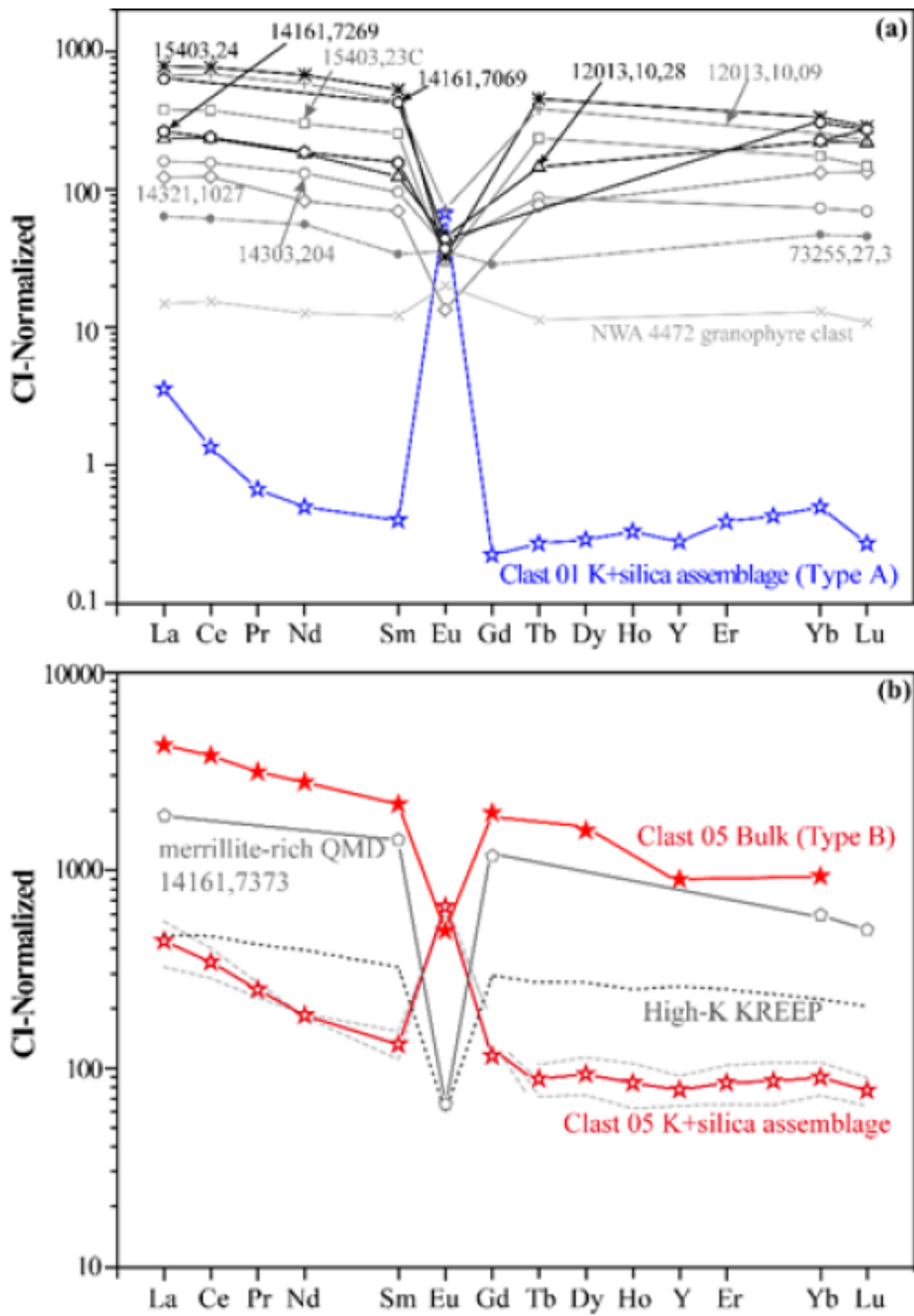


图3.岩屑 (clast) 01和岩屑05全岩的稀土元素配分模式。

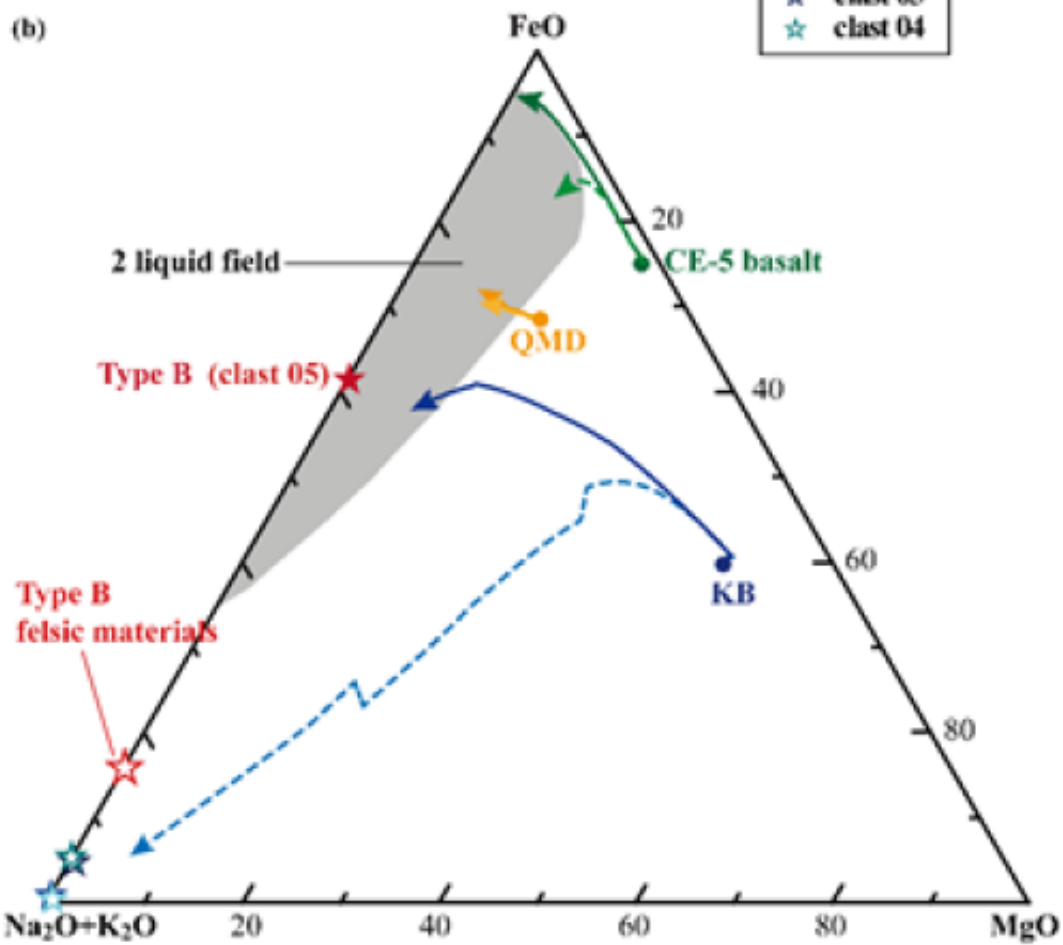
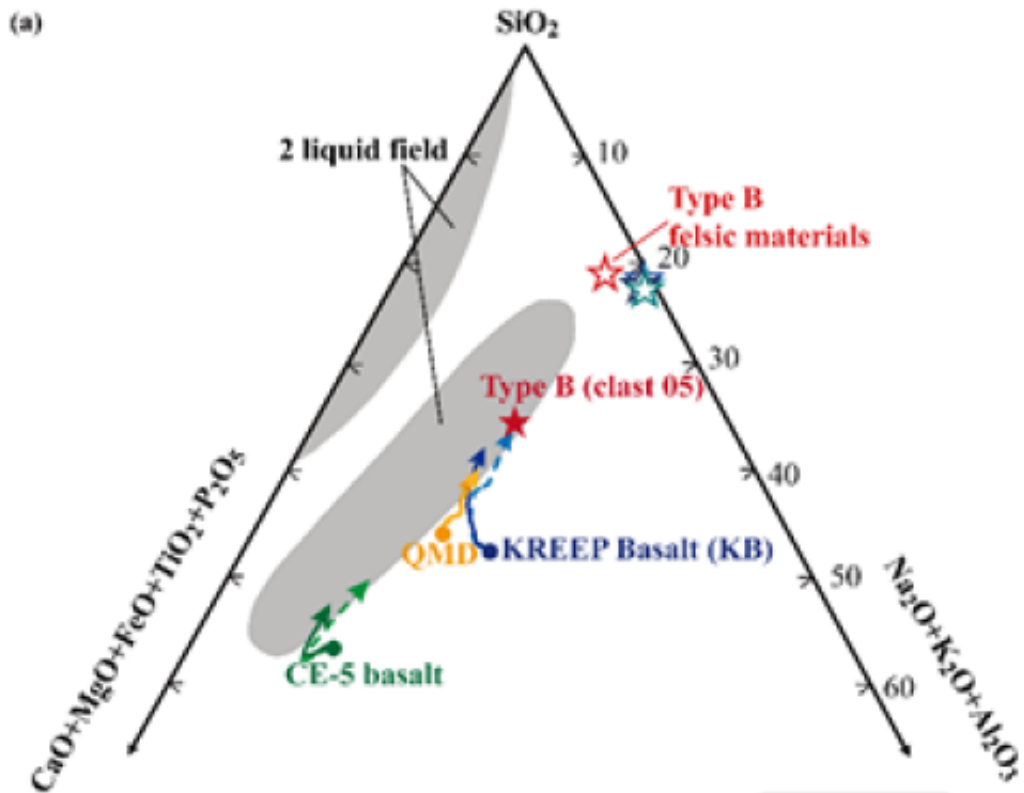


图4.不同氧化物体系中的硅酸盐液相不混溶区域。图中实线和虚线分别代表QMD、KREEP玄武岩和CE-5玄武岩发生分离结晶和平衡结晶过程其残余熔体的成分演化趋势。

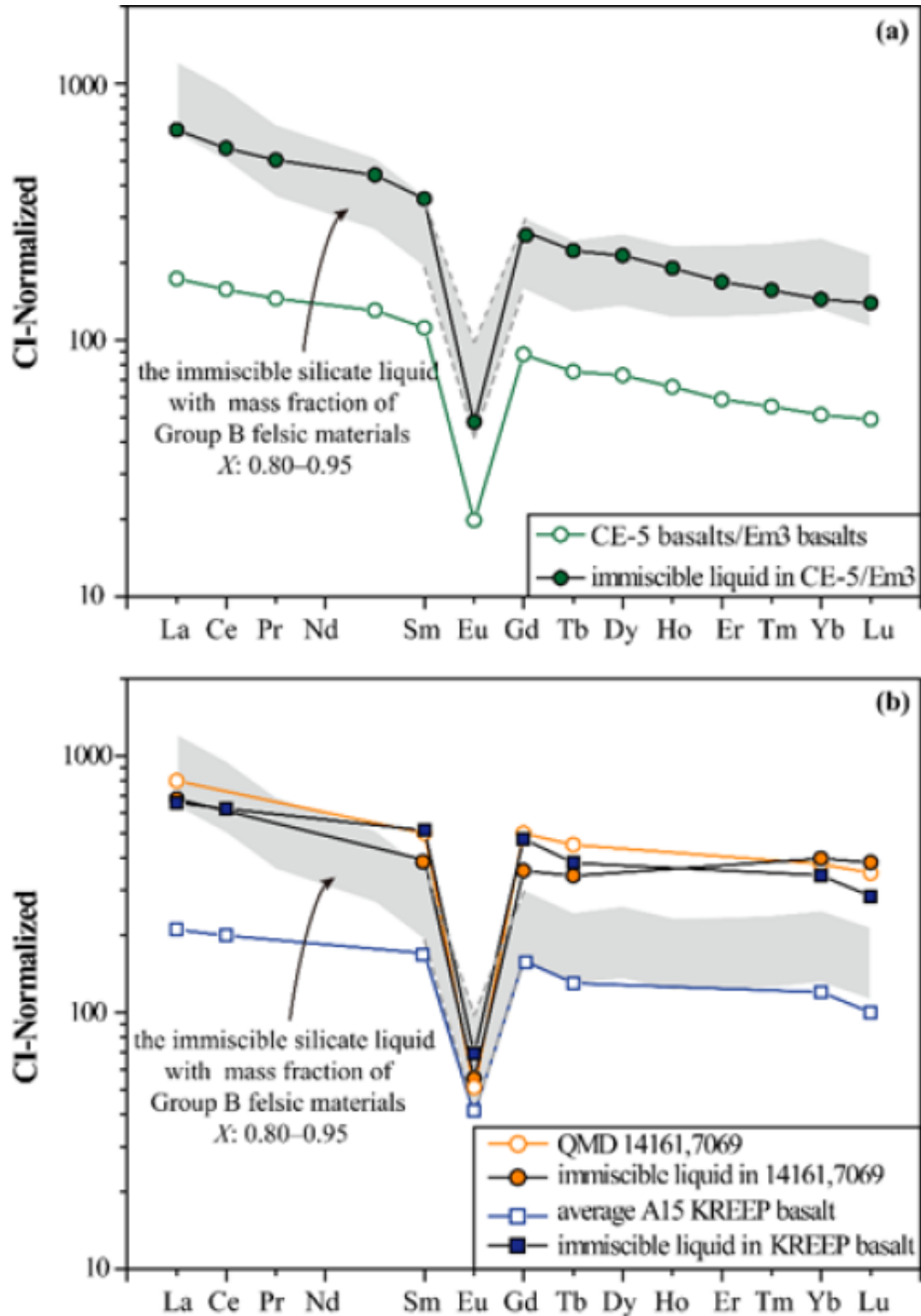


图5.月球QMD、KREEP玄武岩和Em3玄武岩中不混溶熔体的稀土元素配分模式。

研究团队单位：地球化学研究所

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发