

“水之火种”深藏早期地幔，驱动地球宜居演化

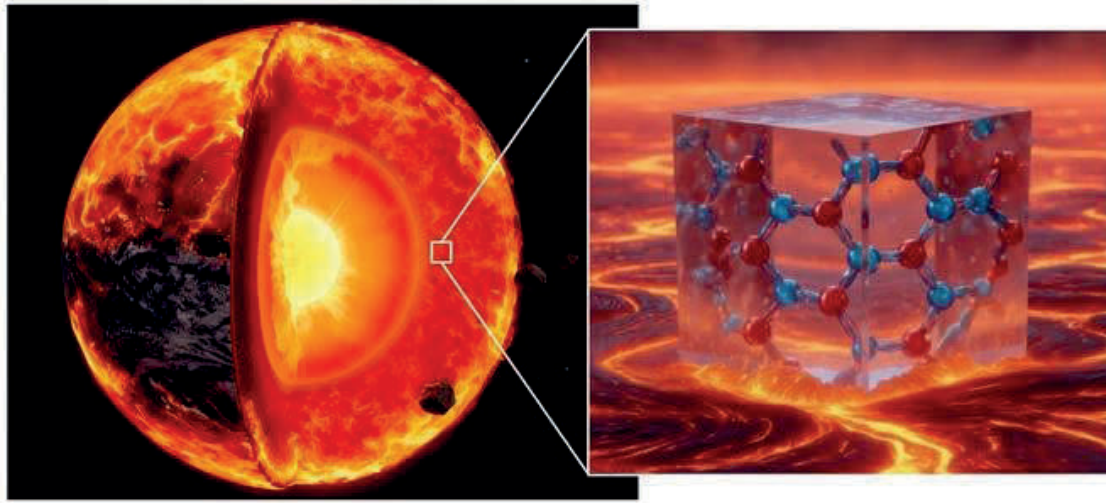


图1 布里奇曼石从地球深部岩浆洋“锁水”的想象示意图 (AI生成)

46亿年前的地球,并非一颗温柔的蓝色星球,频繁而剧烈的星体撞击使其地表与内部翻腾着炽热的岩浆,水无法以液态存在,整个星球如同炼狱,是生命无法立足的绝境。

近期,国际学术期刊《科学》(Science)在线发表了中国科学院广州地球化学研究所杜治学研究员领衔团队的重要成果。该研究首次通过高温高压实验证实:在地球形成初期的极端高温环境下,大量水分可通过矿物的结晶过程,被高效“锁藏”于地幔深处。

这一发现更新了关于地球深部水储存与早期分布的认知,指示深部水可能是驱动地球从炽热炼狱转变为宜居星球的关键力量。

一、革新认知:温度越高,矿物越“锁水”

地球早期的岩浆洋在冷却过程中,会结晶出固态矿物,逐渐形成地幔。其中,布里奇曼石是地幔中最早结晶、且含量超过一半的主要矿物,它如同一个微观的“储水容器”(图1),其“锁水”能力(即矿物/熔体水分分配系数)直接决定了有多少水能从岩浆中转入固态地球。

以往研究基于相对低温的实验条件,认为布里奇曼石的储水能力有限。然而,杜治学团队利用自主研发的“极端温压实验模拟装置”成功将实验温度大幅提升至约4100℃的极端高温。最新数据表明:布里奇曼石的“锁水”能力随温度升高而显著增强。这意味着,在地球最炽热的岩浆洋阶段,正在结晶的布里奇曼石反而能够“捕获”并封存远超以往想象的海量水分,这直接颠覆了“深下地幔几乎不含水”的传统认识。

二、技术突破:于方寸间捕捉痕量“水印记”

要获得上述认识,研究团队面临两大挑战:一是在实验室模拟深度超地下660公里的极端环境;二是在不足头发丝直径十分之一的“微尘”级实验样品中,精准捕捉含量低至万分之一级别的痕量水信号。

为此,研究团队搭建了能实现激光加热和高温成像的金刚石压腔实验装置,成功模拟深部地幔条件,并精准测定了相平衡温度,为揭示温度对水分分配的关键控制作用奠定了坚实基础。

此外,研究团队还依托中国科学院广州地球化学研究所的先进分析平台,利用冷冻三维电子衍射、纳米二次离子质谱(NanoSIMS)等尖端手段,并结合中国地质科学院地质研究所龙涛研究员团队的原子探针断层扫描技术(APT),发展出一系列原创性微纳尺度微量水分析新方法。犹如为微观世界配备了超高分辨的“化学CT”与“质谱仪”,得以成功在微米级样品中清晰识别出水的分布信号(图2),破译了布里奇曼石的“锁水”密码。

三、深远意义:深部“水库存”塑造宜居地球

基于这一新发现,团队构建了岩浆洋结晶模型。模拟结果显示,由于早期高温下布里奇曼石的强效锁水能力,在岩浆洋凝固后,下地幔成为了整个固体地幔中最大的储水层,其储水量可能高达此前模型预估的5至100倍。据估算,早期固体地幔中储存的水量,可能相当于0.08至1个现代全球海洋的总水量。

深埋的水并非静止的“库存”,它如同地球这台巨型地质机器的

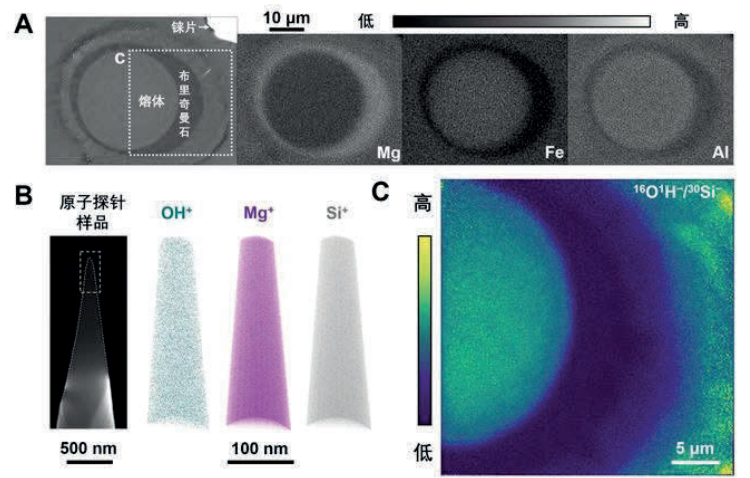


图2 实验样品的微纳尺度表征

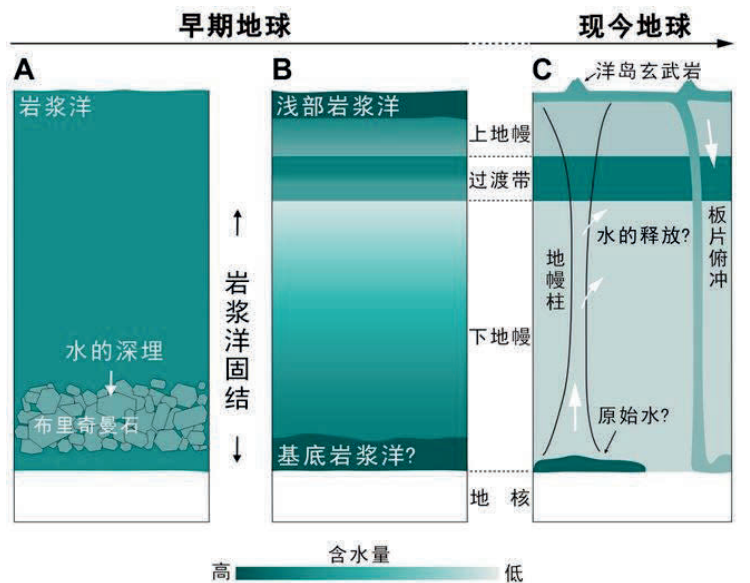


图3 深部水从地球形成早期至今的演化图景

“润滑剂”,能够降低地幔岩石的熔点和黏度,促进内部物质循环与板块运动等重要地质过程,赋予地球持续演化的活力。随着时间推移,深部水通过岩浆活动等地质过程被逐渐“泵”回地表,参与形成原始大气和海洋。这股早在星球初期就被封存于地球“骨骼”中的“水之火种”,很可能正是推动地球从岩

浆炼狱转变为蓝色宜居星球的关键力量(图3)。

该研究在实施过程中成功突破了系列高温高压实验与微纳尺度含水量表征的关键技术瓶颈,将相关实验与分析测试技术的整体水平提升至国际先进行列,未来有望在深地挥发分行为的研究中取得更多突破。

不靠植物,不靠糖:工业微生物如何学会“用光造物”?

如果能够跳过“光合生物中转站”,让工业微生物直接利用太阳能合成化学品,太阳能向生物制造体系的转化效率和产物多样性将实现大幅提升。如何让微生物真正“用光造物”,正成为合成生物学与能源科学交叉领域的重要前沿方向之一。

3月10日,中国科学院深圳先进技术研究院定量合成生物学全国重点实验室、合成生物学研究所研究员高翔团队联合南京大学教授王元元团队、上海交通大学教授杨琛团队,在《自然—可持续发展》(Nature Sustainability)上发表最新研究成果。团队成功构建出一种人工光合工程细胞,使非光合工业微生物能够直接利用太阳能,驱动废弃碳源向高附加值化学品高效转化,为非粮碳源生物制造和绿色低碳产业转型提供了新的技术路径。

让工业微生物“直接用光”

光是地球生命最初的能量来源。此前有研究表明,植物和藻类等光合生物虽能通过光合作用转化太阳能,但光能利用率通常不足1%;而工业常用的大肠杆菌、酵母等微生物无法直接利用光能,只能依赖光合生物合成的糖等,整体光能利用效率通常低于0.05%。在“太阳能—光合生物—糖—微生物—产品”的传统路径中,大量能量

被层层消耗。若能为工业微生物建立直接利用光能的“接口”,生物制造体系的能源效率有望实现根本性提升。

围绕这一目标,研究团队创新性地将半导体材料构建为“人工捕光天线”。通过设计零维、一维、二维等不同形貌的半导体纳米材料,系统优化材料光吸收性能,从源头提升光能转化效率。更关键的是,研究人员将二维半导体材料直接送入微生物细胞内部,在细胞内装上“人工捕光天线”。

与传统胞外材料需要电子跨膜传递的方式相比,这种“入胞式”设计显著缩短了电子传输距离,降低能量损耗,使光生电子直接在细胞内部参与代谢反应,实现从“外部供能”向“内部驱动”的转变。工程微生物由此真正具备了直接利用太阳能进行生物合成的能力。

提升太阳能生物制造效率

在材料创新基础上,团队进一步解析了光电子驱动代谢重构的分子机制。通过代谢组学与转录组学分析,研究人员发现焦磷酸硫胺素(TPP)相关代谢途径在光照条件下显著上调。进一步实验表明,TPP在光生电子向生物能量分子转化过程中发挥关键“桥梁”作用,促进细胞内关键的能量分子(NAD(P)H与ATP)的再生,实现无机光电子与细胞能量分子之间的

高效耦合。

这意味着,研究团队不仅为非光合微生物安装了“人工捕光天线”,还重构了胞内“电子流通道”,实现太阳能向生物能量分子的精准转化与高效利用,从机制层面夯实了太阳能驱动生物制造的技术基础。

在研究试验中,人工光合作用工程细胞成功合成了多种高附加值产品,包括2,3-丁二醇(BDO)、生物塑料PHB和航空燃料 α -法呢烯等生物基化学品、生物材料和生

物燃料,显示出广泛的产品开发潜力。该细胞能利用海藻提取物甘露醇、秸秆水解液等多种废弃物作为碳源。在5升发酵罐中,以工业糖蜜废水为主要原料,BDO的产量达到30.71克/升,验证了该体系在规模化生产和废碳升级转化方面的应用潜力。

“相比传统依赖糖类原料发酵或在体系中自行合成杂合体的生物制造方法,这种新型人工光合工程细胞能够显著减少温室气体排放、降低生产成本,表现出良好的

环境可持续性和产业化潜力。”论文通讯作者表示。

该研究在细胞内部建立了太阳能向生物能量分子高效转化的通路,实现太阳能与生物制造的深度融合,为可再生能源直接驱动绿色化学品生产提供了新范式。未来,团队将进一步融合合成生物学、材料科学与能源化学优势,拓展CO₂、废塑料及工业废水等非粮碳源的高值化利用路径,推动太阳能驱动合成生物制造向高效率、可扩展与可持续方向发展。

