



## Topic Insights

## 深部挥发物是四维地球系统中能源与环境的关键

毛河光<sup>a</sup>, Craig M. Schiffries<sup>b</sup><sup>a</sup> Center for High Pressure Science and Technology Advanced Research (HPSTAR), Beijing 100094, China<sup>b</sup> Geophysical Laboratory, Carnegie Institution for Science, Washington, DC 20015, USA

碳、氢、氧、氮、硫及其化合物均是挥发性物质，它们主导着地球宜居表面之上薄而脆弱的大气圈、水圈和生物圈。然而，绝大多数这些挥发物隐藏在地球深部，其中的高温高压条件极大而彻底地改变了挥发物的物理和化学性质。犹如动物的血液一样，地球深部挥发物的循环和相互作用调节着气候、矿产、能源、自然灾害，以及其他使地球成为蕴含生命并仍在演进的独特行星的各种因素。在过去的46亿年中，深部挥发物一直在改变和调节着大气和海洋的化学成分与温度，从而控制和调节着生命的出现、进化和灭绝。同样，它们未来的行为和演化将影响我们人类的命运。更深入地了解深部挥发物将提高我们预测其影响、规划经济发展和保护环境的能力。

2018国际工程科技高端论坛——地球深部挥发物与能源环境（DVEES 2018）从四个科学领域——极端条件下的物理和化学、储层和流动、深部能源与深部生命等角度探讨了地球深部挥发物的议题，并包括计算研究、极端压力下的碳和氢，以及下地幔矿物物理等相关议题。本期深地物质与能源专题包含了所有这些领域的贡献。

Schiffries等讨论了国际深碳观测组织（DCO）的科学家近十年来在研究地球上碳的物理、化学和生物作用方面的重要发现。以往对全球碳循环的绝大多数研究都集中在地球表面或附近的一小部分碳。与之相比，DCO的使命是了解地球的整个碳循环，包括地球深部的绝大多数碳。DCO提供了解决大规模、跨学科和国际科学问

题的新模式。

对天然样品的现场考察和分析研究揭示了对深部挥发物的基本限定。在本专题中，刘盛邀和李曙光论证了钙、镁、锌等稳定同位素在解释板块俯冲过程中海相碳酸盐的命运方面具有巨大潜力，这对研究深部碳循环有着深远的意义。以往，玄武岩中的钙、镁和锌同位素异常被认为是由于地壳碳酸盐循环进入地幔源区所致；然而，刘盛邀和李曙光评估了其他潜在同一方向的同位素分馏过程就像碳酸盐循环所预示的那样。郭旭升等描述了大型、超深油气资源，讨论了油气来源和成藏方法。新的地震采集与处理技术在对超深油气藏的高精度和高分辨率地震成像探测方面取得了突破，使超深油气资源得以发现。冯晓远等描述了深古菌的代谢特征，它是地球上最丰富的微生物之一，广泛分布在包括地球深部生物圈在内的各种热液环境中。通过祖系和比较基因组分析，冯晓远等揭示了深古菌门的热环境起源。

天然金刚石是在高温高压条件下形成的，是一种独特的深部信使。金刚石具有无与伦比的强度，就像一个坚硬的胶囊，它能截留流体和固体包裹体，并保留了它们形成条件的很有价值的信息。连东洋和杨经绥描述了蛇绿岩中的微金刚石和其他高压相，为探测深部地幔中的碳循环提供了新的窗口。含蛇绿岩的金刚石以轻碳同位素组成为特征，这被解释为地表衍生有机物循环进入地幔的证据。Sobolev等报道，来自俄罗斯Yakutia的乌达奇纳亚（Udachnaya）石油管道中的金刚石、石榴石

和橄榄石中的某些流体包裹体，主要含有较高级的碳氢化合物（戊烷到十六烷）及其衍生物，这表明这些碳氢化合物是一些地幔流体的主要成分。

随着深度的增加，天然样品变得越来越罕见，超过700 km的深度完全无法获得。实验研究和中心设施的仪器研发对于我们早日理解深部物质和能源至关重要。张莉等描述了在地球深部的压力-温度条件下，利用同步辐射原位高压多晶X射线衍射技术探测多相体系的独特能力。这种强大的技术能够在金刚石对顶砧中对多个物相组合中的单个晶粒进行强有力的晶相识别和结构测定。张莉等将该技术应用于一系列重要问题研究，如在百万巴（1 bar = 0.1 MPa）压力下探测含铁布里奇曼石（Bridgmanite）的分解、识别(Fe, Al)OOH中的六方含水相（HH），以及(Mg, Fe)SiO<sub>3</sub>后钙钛矿（pPv）和赛石英（SiO<sub>2</sub>）的晶体结构测定等。毛立文等证明在极端条件下，将纳米X射线透射显微技术（nanoTXM）与金刚石对顶砧技术结合，为极端条件下的材料高空间分辨率、非破坏三维成像创造了令人兴奋的机会。例如，毛立文等的研究表明，原位高压nanoTXM技术可用于确定材料的状态方程，而这用同步辐射X射线衍射或微米级的X射线断层扫描技术是难以表征的。Ishii等报道了使用碳化钨压砧的Kawai型多面顶压机在产生高压方面的突破，它可以提供比金刚石对顶砧压机大三个数量级的样品。这些学者已经将该设备产生的压力提高至65 GPa，比之前的纪录高出2.5倍多。Navrotsky的研究表明，地球和材料科学中许多突出的问题将受益于三种方法的进步和整合：实验热力学、结构研究和计算方法。这些方法的整合开始提供对复杂固体中稳定性和反应活性的新理解，并应用于极端条件下的矿物和行星内部结构研究。Kong和Lee介绍了在俯冲带条件下纤维蛇纹石碳化的实验结果，这提高了我们对蛇纹石矿物在深部碳循环中的作用的理。Binns等描述了高压下铜-氢（Cu-H）体系的结构研究，该体系在储氢方面有重要应用。

计算研究和数据科学补充了其他研究深部物质和能源的方法。Tse描述了研究极端条件下材料化学和输运特性的第一原则方法。他提供了广泛的地质应用，包括：地核富铁卤化物的稳定性，为缺失卤素的悖论提供

了一个潜在的解决方案；在地幔条件下，二氧化碳和二氧化硅的化学行为；上地幔中水的形成；碳酸钙熔体的黏度；以及方镁石的热导率等。Hazen等建立的大型和不断增长的数据资源正迎来一个数据驱动矿物学发现的新时代。新数据驱动方法包括矿物演化、矿物生态学和矿物学系统的网络分析在内的各种方法解决了矿物在空间和时间上的分布和多样性问题。这些策略有助于加深对矿物共生的理解，并有助于预测地球上尚未发现的矿物种类。

最近的高压-高温实验和理论研究表明，下地幔底部（深度超过1800 km）到内地核（深度为5280 km），受到完全不同于外壳层的化学和物理作用的控制：铁能裂解水，使地核-地幔边界成为巨大的氢发生器和氧库[1]。这种持久的氢源，加上氢与其他挥发物反应形成氨、水和碳氢化合物，为生命和有机能源提供了必要的成分。这种氧库作为核-幔边界D''层的地震异常可被探测到[2]。这种氧库积累到临界饱和点，最终会导致氧爆发，为零星或周期性的全球灾难提供内部机制。并对地质历史上的重大事件提出了统一的假设[1]。在地球动力学上，氧的爆发为热对流增加了化学超羽流的对流驱动力，并可能导致超大陆的分裂和合并。从岩石学上讲，在上地幔岩石中加入挥发性组分会降低上地幔岩石的熔化温度，并产生大型火成岩区（LIP）。在环境方面，过量氧气的上升将导致巨大的氧化事件和雪球地球，这将导致生物大灭绝。因此，对深部挥发物问题的多学科研究是理解四维地球系统的关键。

## 致谢

我们感谢中国工程院（CAE）和国际深碳观测组织（DCO）对DVEES 2018的资助。组织者非常感谢Alfred P. Sloan基金会（G-2016-7065）对DCO秘书处的支持，以及国家自然科学基金（U1530402）对HPSTAR的支持。

## References

- [1] Mao HK, Hu QY, Yang LX, Liu J, Kim DY, Meng Y, et al. When water meets iron at Earth's core-mantle boundary. *Nat Sci Rev* 2017;4:870-8.
- [2] Liu J, Hu QY, Kim DY, Wu Z, Wang W, Xiao Y, et al. Hydrogen-bearing iron peroxide and the origin of ultralow-velocity zones. *Nature* 2017;551:494-7.