

专题 8: 地球深部物质物理化学属性和深部过程

地球内部结构水含量的分层估算

杨华, 张飞武*

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

水是地球区别于太阳系其他行星最为显著的特征之一, 也是生命之源, 但地球上的水是从哪里来的? 已经存在多久了? 是在地球形成初期就存在, 还是在地球形成以后, 或者是通过太阳系以外的彗星或“湿”的小行星把水带入原本完全干燥的早期地球? 人类不断寻找答案。另一方面, 液态水在地球上的质量分数(0.024wt.%)却比大陆地壳(角闪岩+麻粒岩)的平均含水量(~1.3wt.%)和海洋地壳(玄武岩+辉长岩)的平均含水量(~1.5 wt.%)要少数十倍(Bodnar et al., 2013), 或许我们不仅要询问地球上的水来自哪里, 还更应该追寻早期地球上的水去哪儿了。

相比于 SiO₂、MgO、CaO 等, 水的丰度要小很多, 然而只需微量的水就能极大地改变岩石和矿物的诸多物理化学性质以及地球深部的各种地质作用(Karato, 2011)。在地球内部, 水的存在不仅能降低岩石和矿物的熔融温度、地幔岩石的强度和粘度, 还制约着地幔的对流模式。水的流动会使板块活动更加活跃, 从而成为地震发生的导火索。此外, 水的存在可以直接决定含氢矿物的相变、变形、流变性质以及电导率等各种物理化学特性。因此, 查明地球内部水的分布、含量与赋存状态等情况是了解地球演化、地球动力学以及研究火山地震机理、地球板块构造运动等最基本的先决条件。

大多数先前关于地球内部水的研究, 重点放在水在地幔矿物中的溶解度或溶解机制上, 特别是对名义上无水矿物(Nominal Anhydrous Minerals, NAMs)的研究(Nishi et al., 2014; Smyth et al., 2016; Ni et al., 2017)。研究发现 NAMs 中的微量 H 主要以 OH 的形式赋存于矿物的结构中, 构成了所谓的结构水, 水的含量可以从数 ppm 至数千 ppm(Bell, 2002; Rauch, 2004)。虽然 NAMs 中的结构水含量甚微, 但考虑到这些 NAMs 在地球圈层中所占的质量权重, 它们构成了地球中最为重要的水储库。我们根据近十几年来国内外高温高压实验与地球内部含水性研究的新进展, 重新对地幔的含水量(特别是结构水)进行估算。

经估算得出上地幔平均含水 0.03wt.%, 其储水能力约为海洋水的 0.12 倍; 水在地幔过渡带矿物中的溶解度较高(~1.53wt.%), 使得地幔过渡带储水能力约为海洋水的 4~5 倍; 下地幔矿物的含水性研究目前还存在很大的争议, 高温高压水溶性实验、理论计算以及地球物理方法等均不能对其进行很好的限制。现阶段已有的研究数据表明, 下地幔矿物的含水量相对较低(~0.13wt.%), 但由于下地幔庞大的体积和质量, 使得其储水能力约为海洋水的 2~3 倍; 整个地幔平均含水~0.26wt.%, 其储水能力约为海洋水的 6~8 倍。为了估算整个地球内部各圈层的储水能力, 本文基于 Murakami(Murakami, 2002)关于地球起源于碳质球粒陨石其含水量~2wt.%的结论, 我们估算得出地核的储水能力约为海洋水的 76 倍, 进而推断地核中可能含有 0.6wt.%左右的 H 元素。

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 41773057)

第一作者简介: 杨华, 男, 1995 年生, 硕士研究生, 研究方向: 理论地球化学. E-mail: yanghua@mail.gyig.ac.cn

*通讯作者简介: 张飞武, 男, 1980 年生, 研究员、博士生导师, 研究方向: 理论地球化学. E-mail: zhangfeiwu@vip.gyig.ac.cn

需要说明的是, 高温高压实验获得的水溶解度数据是热力学平衡条件下的最大含水量, 是真实含水量的上限, 本文根据高温高压实验的含水数据, 尝试估算了地幔的最大储水能力。此外, 本文还从碳质球粒陨石成分的角度, 估算地核中 H 元素的可能含量, 以讨论整个地球内部的储水能力, 以期形成对从“地表-上地幔-地幔过渡带-下地幔-地核”的整个地球水循环过程的初步认识。