

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.828>



# 如何理解地球上水的存储和起源?

夏群科<sup>1</sup>, 杨晓志<sup>2,3</sup>, 刘佳<sup>1</sup>

1. 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, 浙江杭州 310027

2. 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023

3. 南京大学关键地球物质循环前沿科学中心, 江苏南京 210023

水是板块构造发生的重要前提, 是生命演化和人类生存的基础, 也是维系地球生态系统功能和支撑社会经济系统发展的重要资源. 地表附近的水(包括大气圈、海洋、江河湖泊等储库中的水以及浅部地壳中的地下水等), 主要来自地球内部的去气作用, 但地球内部的水并未全部失去(Allègre *et al.*, 1987; Holland and Turekian, 2014). 地球内部主要由矿物和岩石等固态物质组成, 水的存储形式与地表水不同, 主要是以与氢有关的缺陷形式(如羟基、分子氢等)存储在“名义上无水矿物”(即理想化学式中不含氢的矿物)晶体结构中, 也就是通常所说的结构水, 其储量可能远超地表水的总量(Bell and Rossman, 1992; Peslier *et al.*, 2017). 地球内部水即使微量存在, 也强烈影响矿物和岩石的熔融、相变、变形、导电性、元素扩散等各种物理化学性质乃至地球内部的对流、地球整体的演化和宜居性等(Mei and Kohlstedt, 2000; Bercovici and Karato, 2003; Mierdel *et al.*, 2007; Yang *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017; Peslier *et al.*, 2017; Xia *et al.*, 2019). 此外, 探索地球内部水的起源是制约地球早期形成历史的重要途径. 因此, 如何理解地球上水的存储和起源, 是固体地球科学乃至行星科学研究的前沿领域和重要问题之一, 而其关键核心是对地球内部水的认识.

## 1 核心思想

30年前, 学术界对地球上水的认识多局限于地表附近的水. 加州理工学院的矿物学家 George Rossman 于 1992 年明确提出了名义上无水矿物可能是地球内部(尤其地幔)水的重要载体(Bell and Rossman, 1992), 由此掀起了一场关于地球内部水的科学革命, 并吸引了矿物学、岩石学、地球化学、地球物理学和行星科学等领域学者的持续关注. 近 30 年来大量研究表明, 地球内部水显著影响包括从小到原子微观尺度大到行星宏观尺度的诸多性质和过程, 并对地表附近水长期以来的储量变化(如海平面)和相关方面有直接作用. 要理解地球上水的存储和起源及其效应, 地球内部水的角色需要被充分肯定和认识.

目前对 200 km 深度内深部地壳和上地幔中水的存储有了较好认识. 这些储库中的长石、辉石、橄榄石、石榴石等矿物普遍含有羟基形式的水, 其含量( $H_2O$  的重量含量形式)从低于 1 到超过  $1000 \times 10^{-6}$  (Bell and Rossman, 1992; Demouchy and Bolfan-Casanova, 2016; Peslier *et al.*, 2017; Xia *et al.*, 2019). 更深部地幔可能含有数量可观的水, 但由于天然样品取样难度大, 目前只在少数超深金刚石中发现了含水林伍德石、铁方镁石、冰-VII 等矿物包裹体(Pearson *et al.*, 2014; Palot *et al.*, 2016; Tschauner *et al.*, 2018). 基于地球化学模型

作者简介: 夏群科(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地幔地球化学、岩石学和火山学等研究. E-mail: qkxia@zju.edu.cn

引用格式: 夏群科, 杨晓志, 刘佳, 2022. 如何理解地球上水的存储和起源? 地球科学, 47(10): 3830–3832.

Citation: Xia Qunke, Yang Xiaozhi, Liu Jia, 2022. How to Understand the Storage and Origin of Water on Earth? *Earth Science*, 47(10): 3830–3832.

(Marty, 2012) 和高温高压实验 (Keppler and Smyth, 2006) 的研究表明, 深部地幔中可能存储了超过地表海洋水总量 10 倍的羟基形式水, 但估计的水含量误差较大. 地核也可能是地球内部一个重要水储库, 水可能主要以氢原子形式与构成地核主体的铁镍等形成合金 (Okuchi, 1997). 然而, 由于地核无法取样, 对其水含量的认识是一个难题, 虽然基于波速、密度等的矿物物理研究对地核中的水开展了探索, 但由于地核中氢、碳、硅、硫、氧等轻元素组成的复杂性和不确定性, 基本无法准确约束其水含量.

近年来研究表明: 除了羟基, 分子氢也可以存储在矿物晶体结构中并构成了深部地幔中一种重要的形式的水 (Yang *et al.*, 2016; Moine *et al.*, 2020); 地幔柱活动的典型产物——大火成岩省苦橄岩起源自富水地幔的熔融 (Liu *et al.*, 2017). 这改变了过去人们认为下地幔羟基水含量很低和近乎“无水”的观点 (Bolfan-Casanova *et al.*, 2003; Hirschmann, 2006), 意味着下地幔可能是一个富水储库. 这对理解深源地幔柱的富水特征具有重要意义, 也为深部地幔中可能保存有地球诞生初期原始太阳星云组成原生水的发现 (Hallis *et al.*, 2015) 提供了一种解释. 早期研究认为地球上水的起源与陨石、彗星等地外天体有关, 但最近工作表明, 地外天体对地球上水的贡献较小 (<1%~2%) (Marty, 2012, 2020), 地球上的水可能在地球早期形成阶段开始就自始至终参与了地球的核幔和壳幔分异以及后期的演化 (Morbidelli *et al.*, 2000; Yang *et al.*, 2016). 早期地球诞生过程中乃至更早的小天体吸积与陨石阶段, 水在矿物和岩石中的存储可能是理解地球上水的起源的关键.

## 2 科学价值

地球内部水直接或间接参与了地球内部长期以来诸多的地质作用, 并对地球内外水循环乃至地表环境变化和宜居性产生了显著影响. 地球内部水是全面认识地球上水的存储和起源的核心, 也是从行星科学角度对比研究不同类地天体演化模式和过程的重要切入点. 地幔对流、克拉通破坏、壳幔熔融作用、大陆生长机制、板块构造运动、大火成岩省成因等重大地质作用和过程, 都可能与地球内部水密切相关. 定性角度上, 水对地球内部这些物理、化学、动力学等性质和过程的效应已为学术界较为熟

悉. 但这些宏观和微观效应, 都依赖于对地球内部不同空间和时间尺度上水存储的定量认识; 特别是水的存储形式和含量, 也是开展火星、月球和小行星带等类地天体探索与资源开发利用的重要组成部分.

## 3 发展前景

对地球上水的存储和起源的认识, 很大程度上取决于地球内部水的研究. 由于水的显著效应, 地球内部水是理解地球内部如何运行的关键. 深部地球和早期地球中水的存储, 是地球内部水研究的重中之重, 也是认识地球上水的存储和起源的先决条件. 同时, 这也是对比研究其他类地天体上水的存储和效应的重要组成部分. 未来的工作中, 通过强化天然地质样品测试、高温高压实验模拟、人工智能与大数据分析以及比较行星学研究, 有望为全面了解地球深部水循环、壳幔作用与演化、类地天体演化和行星宜居性等方面提供重要科学依据.

### 参考文献

- Allègre, C.J., Staudacher, T., Sarda, P., 1987. Rare Gas Systematics: Formation of the Atmosphere, Evolution and Structure of the Earth's Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 81(2/3): 127–150.
- Bell, D.R., Rossman, G.R., 1992. Water in Earth's Mantle: The Role of Nominally Anhydrous Minerals. *Science*, 255(5050): 1391–1397. <https://doi.org/10.1126/science.255.5050.1391>
- Bercovici, D., Karato, S.I., 2003. Whole-Mantle Convection and the Transition-Zone Water Filter. *Nature*, 425(6953): 39–44. <https://doi.org/10.1038/nature01918>
- Bolfan-Casanova, N., Keppler, H., Rubie, D.C., 2003. Water Partitioning at 660 km Depth and Evidence for very Low Water Solubility in Magnesium Silicate Perovskite. *Geophysical Research Letters*, 30(17): 1905. <https://doi.org/10.1029/2003GL017182>
- Demouchy, S., Bolfan-Casanova, N., 2016. Distribution and Transport of Hydrogen in the Lithospheric Mantle: A Review. *Lithos*, 240/241/242/243: 402–425. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.11.012>
- Hallis, L.J., Huss, G.R., Nagashima, K., et al., 2015. Evidence for Primordial Water in Earth's Deep Mantle. *Science*, 350(6262): 795–797. <https://doi.org/10.1126/science.aac4834>
- Hirschmann, M.M., 2006. Water, Melting, and the Deep

- Earth H<sub>2</sub>O Cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34: 629–653. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125211>
- Holland, H.D., Turekian, K.K., 2014. *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Oxford, UK.
- Keppler, H., Smyth, J.R., 2006. *Water in Nominally Anhydrous Minerals*. Mineralogical Society of America, Washington D.C..
- Liu, J., Xia, Q.K., Kuritani, T., et al., 2017. Mantle Hydration and the Role of Water in the Generation of Large Igneous Provinces. *Nature Communications*, 8: 1824. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01940-3>
- Marty, B., 2020. Origins and Early Evolution of the Atmosphere and the Oceans. *Geochemical Perspectives*, 9(2): 135–313. <https://doi.org/10.7185/geochempersp.9.2>
- Marty, B., 2012. The Origins and Concentrations of Water, Carbon, Nitrogen and Noble Gases on Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 313–314: 56–66.
- Mei, S., Kohlstedt, D.L., 2000. Influence of Water on Plastic Deformation of Olivine Aggregates: 1. Diffusion Creep Regime. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B9): 21457–21469. <https://doi.org/10.1029/2000jb900179>
- Mierdel, K., Keppler, H., Smyth, J.R., et al., 2007. Water Solubility in Aluminous Orthopyroxene and the Origin of Earth's Asthenosphere. *Science*, 315(5810): 364–368. <https://doi.org/10.1126/science.1135422>
- Moine, B.N., Bolfan-Casanova, N., Radu, I.B., et al., 2020. Molecular Hydrogen in Minerals as a Clue to Interpret  $\delta$  D Variations in the Mantle. *Nature Communications*, 11: 3604. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17442-8>
- Morbidelli, A., Chambers, J., Lunine, J.I., et al., 2000. Source Regions and Timescales for the Delivery of Water to the Earth. *Meteoritics & Planetary Science*, 35(6): 1309–1320.
- Okuchi, T., 1997. Hydrogen Partitioning into Molten Iron at High Pressure: Implications for Earth's Core. *Science*, 278(5344): 1781–1784. <https://doi.org/10.1126/science.278.5344.1781>
- Palot, M., Jacobsen, S.D., Townsend, J.P., et al., 2016. Evidence for H<sub>2</sub>O-Bearing Fluids in the Lower Mantle from Diamond Inclusion. *Lithos*, 265: 237–243. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.06.023>
- Pearson, D.G., Brenker, F.E., Nestola, F., et al., 2014. Hydrous Mantle Transition Zone Indicated by Ringwoodite Included within Diamond. *Nature*, 507(7491): 221–224. <https://doi.org/10.1038/nature13080>
- Peslier, A.H., Schönbacher, M., Busemann, H., et al., 2017. Water in the Earth's interior: distribution and origin. *Space Science Reviews*, 212: 743–810. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0387-z>
- Tschauner, O., Huang, S., Greenberg, E., et al., 2018. Ice-VII Inclusions in Diamonds: Evidence for Aqueous Fluid in Earth's Deep Mantle. *Science*, 359(6380): 1136–1139. <https://doi.org/10.1126/science.aao3030>
- Xia, Q.K., Liu, J., Kovács, I., et al., 2019. Water in the Upper Mantle and Deep Crust of Eastern China: Concentration, Distribution and Implications. *National Science Review*, 6(1): 125–144. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx016>
- Yang, X., Keppler, H., Li, Y., 2016. Molecular Hydrogen in Mantle Minerals. *Geochemical Perspectives Letters*, 2: 160–168. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1616>