



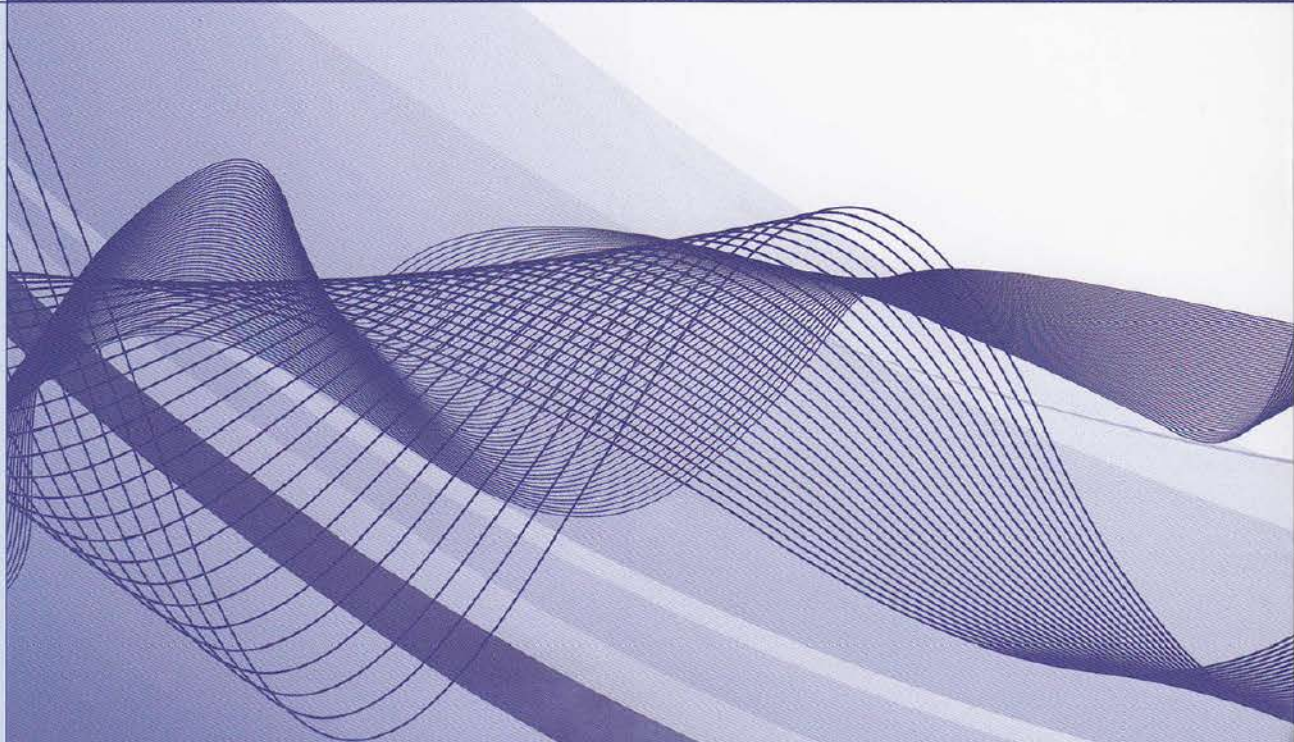
中国科学院年度报告系列

2015

# 科学发展报告

Science Development Report

中国科学院



科学出版社

- [4] Wang X H, Piao S L, Ciais P, et al. A two-fold increase of carbon cycle sensitivity to tropical temperature variations. *Nature*, 2014, 506: 212-215.
- [5] Cox P M, Pearson D, Booth B B. Sensitivity of tropical carbon to climate change constrained by carbon dioxide variability. *Nature*, 2013, 494: 341-344.
- [6] Wang W, Ciais P, Nemani R R. Variations in atmospheric CO<sub>2</sub> growth rates coupled with tropical temperature. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 13061-13066.
- [7] Balch J K. Drought and fire change sink to source. *Nature*, 2014, 506: 41-42.

### The Response of Tropical Terrestrial Carbon Cycle to Climate Change

*Piao Shilong, Wang Xuhui*

Earth system models project that there is a positive feedback between tropical carbon cycle and future climate change. But available data are too limited at present to test the predicted changes of the tropical carbon balance in response to climate change. Here we use the long term atmospheric CO<sub>2</sub> record from Mauna Loa and South Pole stations to show that due to the increase in drought, the negative sensitivity of tropical carbon sink to temperature interannual variability has increased by a factor of  $1.9 \pm 0.3$  during the past five decades. We find that the sensitivity of tropical carbon cycle to interannual temperature variations is regulated by moisture conditions, even if the direct correlation between tropical carbon balance and tropical precipitation is weak. Our result provides a new perspective on a possible shift in the tropical terrestrial carbon cycle over the last 50 years.

## 3.23 地球深部与高压晶体学研究进展

张莉

(北京高压科学研究中心)

一个世纪以前,布拉格父子首次用 X 射线衍射测定了一系列简单矿物的晶体结构,拉开人类运用 X 射线衍射来认识地球组成的序幕。1952 年,地球物理学家波切

(Francis Birch) 提出, 地震波在地球内部传播, 地球内部介质的变化会导致波速变化, 因此地震波数据可用于表征地球内部结构<sup>[1]</sup>。地球内部是一个高温高压系统, 其温度和压力随深度的增加而逐渐增加。从地表往下 660~2900 公里之间的部分为下地幔, 对应的压力为 24~135 GPa<sup>①</sup>, 然后过渡到熔融的外地核和固态的内地核。在过去的 30 年间, 科学家们一直致力于发展模拟地球深部极限条件的高温高压实验技术。结合金刚石压砧高压技术和同步辐射 X 射线衍射, 几个重要的矿物相变陆续被发现, 揭示了地球深部重要不连续界面的物理机制。其中, 刘玲根于 1976 年在激光加温的金刚石压砧中合成了钙钛矿结构的镁铁硅酸盐  $[(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{SiO}_3]$ , 通常简称为钙钛矿, 为下地幔最主要的组成矿物<sup>[2]</sup>, 这一矿物在 2014 年被命名为布里奇曼石 (bridgmanite)<sup>[3]</sup>, 以纪念在高压研究中做出重要贡献并于 1946 年获得诺贝尔物理学奖的科学家布里奇曼 (Percy W. Bridgman)。

## 一、金刚石压砧高压技术

X 光在金刚石中具有优良的通过性, 因此金刚石压砧成为高压下研究晶体学的最主要设备。金刚石压砧由一对金刚石对顶压砧和密封垫片组成, 垫片中心钻孔形成样品腔。将样品和压标同时放入金刚石压砧样品腔中, 旋紧压砧可使金刚石压腔获得高压。徐济安、毛河光以及贝尔 (Peter M. Bell) 于 1986 年改进的金刚石压机, 可用于研究深达地心的物质反应与变化<sup>[4]</sup>。为了开展高压下的单晶结构研究, 要保证压砧在达到高压的同时增加 X 光的可通过角度, 用 X 光照射大角度范围内旋转的晶体可以获得更全面的晶体结构信息。

## 二、地球下地幔的矿物相变

随着高温高压实验技术的进步以及地震波数据日益提高的分辨率, 科学家们发现下地幔的结构和组成并不是均一不变的。2004 年, 日本科学家采用激光加温的金刚石压砧, 发现下地幔底部的温度和压力条件下  $\text{MgSiO}_3$  发生了从钙钛矿到后钙钛矿的结构相变<sup>[5]</sup>, 引起了矿物物理学、地震学、地球动力学等多学科领域广泛的交叉研究, 揭示了下地幔底部 D'' 层的物理机制和结构组成。我们在 2014 年发现了下地幔的另一重要相变: 含铁的硅酸盐钙钛矿  $[(\text{Mg}, \text{Fe}) \text{SiO}_3]$  在下地幔深部 1/3 所对应的温度和压力条件下分解为无铁的钙钛矿和六方结构新相 (简称为 H 相)<sup>[6]</sup>, 这一发现改变了人们对地球下地幔矿物组成的已有认知。正如在《科学》(Science) 杂志同期的评

① 100 GPa 相当于大气压的 100 万倍。

论文章中美国加利福尼亚大学威廉姆斯教授 (Quentin Williams) 写道, 这一研究发现了可能在地球下地幔底部 1/3 存在的重要富铁矿物, 而且密度差很大的矿物共存恰好为地球内部 2 000 公里以下的大规模低剪切波速区的存在提供了物理解释<sup>[7]</sup>。

### 三、同步辐射 X 射线衍射与高压晶体学

H 相的发现得益于高压晶体学的进步, 第三代同步辐射光源提供的高强度 X 射线为研究极端高压条件下微米级甚至是亚微米级的小晶粒提供了条件, 如图 1 所示。广泛使用的晶体学技术包括单晶衍射和粉晶衍射, 但是两种技术在高压下均存在不可克服的局限性。单晶衍射建立在单晶必须在极限压力条件下生存下来的前提下, 而实际情况中高压通常导致晶体质量变差, 并且在高温高压相变后单晶通常粉碎成多晶, 因此高压单晶衍射的适用范围有限。粉晶衍射在高压研究中得到了广泛的应用, 而从多晶样品得到的粉晶衍射仅能给有限的结构信息。另一种选择是在多晶中分离出每个亚微米晶粒各自的晶面取向, 把每个晶粒作为一个单晶来处理。我们把多晶软件引入到高压研究中并加以改进, 2013 年在国际上首次得到百万大气压条件下后钙钛矿这一重要矿物的单晶衍射结果, 证明了超高压条件下就位测量多晶样品中亚微米晶粒的单晶结构的可行性<sup>[8]</sup>, 并在混合矿物相中确定了 H 相的存在和结构信息<sup>[6]</sup>, 表明了多晶方法在高压晶体研究中的独特优势。多晶在高压条件下呈现出随机不同的晶面取向, 来自多个晶粒的结构信息互补, 弥补了金刚石压砧有限的开口角度给晶体研究带来的缺陷。

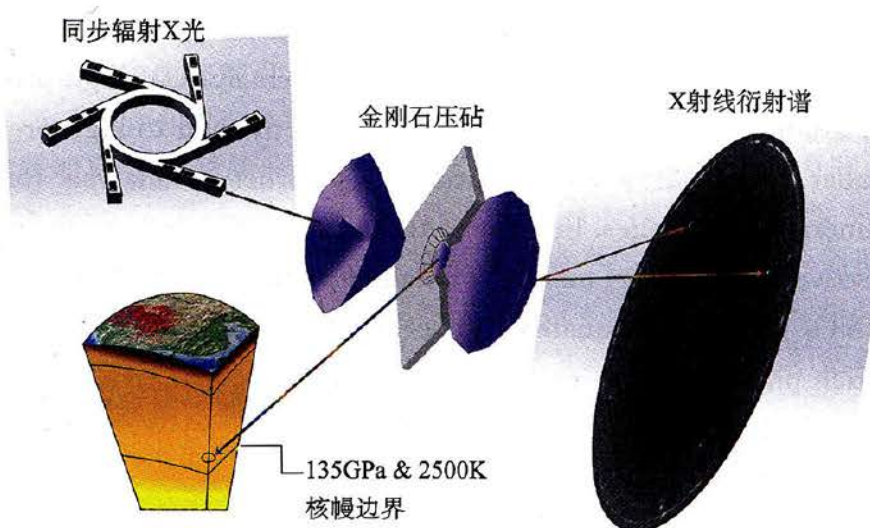


图 1 同步辐射 X 射线与激光加温金刚石压砧技术相结合, 探测地幔深部的矿物组成及其物理化学性质

## 参考文献

- [1] Birch F. Elasticity and constitution of the Earth's interior. *Journal of geophysical Research*, 1952, 57(2):227-286.
- [2] Liu L G. The post-spinel phase of forsterite. *Nature*, 1976, 262:770-772.
- [3] Tschauner O. Discovery of bridgmanite, the most abundant mineral in Earth, in a shocked meteorite. *Science*, 2014, 346(6213):1100-1102.
- [4] Xu J A, Mao H K, Bell P M. High-Pressure Ruby and Diamond Fluorescence: Observations at 0.22 to 0.55 Terapascal. *Science*, 1986, 232(4756):1404-1406.
- [5] Murakami M. Post-perovskite phase transition in  $\text{MgSiO}_3$ . *Science*, 2004, 304(5672):855-858.
- [6] Zhang L, Meng Y, Yang W, et al. Disproportionation of  $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$  perovskite in Earth's deep lower mantle. *Science*, 2014, 344(6186):877-882.
- [7] Williams Q. Geophysics. Deep mantle matters. *Science*, 2014, 344(6186):800-801.
- [8] Zhang L, Meng Y. Single-crystal structure determination of  $(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3$  postperovskite. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110(16):6292-6295.

## Deep Earth and Advances in High Pressure Crystallography

*Zhang Li*

Studies of crystalline minerals at high pressure and high temperature conditions corresponding to the Earth's deep interior are crucial for understanding the structure and constitution of our planet. Diamond anvil cell coupled with synchrotron X-ray techniques have brought revolutionary changes in high-pressure crystallography studies. We have introduced multigrain method to high pressure studies at megabar, which allow us to perform fine structure analysis for individual phase in mineral assemblages. In light of this advanced technique, we made an important discovery in lower mantle mineralogy, that is, Fe-bearing perovskite  $[(\text{Mg, Fe})\text{SiO}_3]$  disproportionates to a nearly Fe-free  $\text{MgSiO}_3$  perovskite phase and an Fe-rich phase with a previously unknown hexagonal structure (H-phase), thus fundamentally changing the geophysics and geochemistry of the bottom half of the lower mantle.