

地幔中水的存在形式和含水量

谢鸿森, 侯渭, 周文戈

中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002

XIE Hong-sen, HOU Wei, ZHOU Wen-ge

Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

XIE Hong-sen, HOU Wei, ZHOU Wen-ge. Water content in the Earth's mantle. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(1): 055-060

Abstract: Water in the Earth's mantle exists in hydrated metamorphic minerals, in anhydrous silicate minerals (olivine, pyroxene etc.) and their high-pressure structure phases [β -olivine(wadsleyite), γ -olivine(ringwoodite), majorite, ilmenite phase(akimotoite), perovskite phase, magnesio-wuestite, etc.], in dense hydrous magnesium silicate (DHMS). The water content of the upper mantle as inferred from the water content of basalt is 0.02%. This is consistent with the value estimated from olivine in mantle's xenoliths. According to the water contents in high-pressure phases of olivine and pyroxene, the water contents of transition zone and lower mantle are estimated. The water content of the transition zone and the upper part of lower mantle (410~1 000 km) is 1.48%, and the water content of other part of lower mantle (1 000~2 900 km) is 0.21%. From this, the quantity of water in each layer of mantle can be estimated. Results show that more than 74% of water in mantle, exists in the transition zone and the upper part of the lower mantle. If the quantity of water in the Earth is equal to the summation of water in the mantle and water in the sea, then the amount of water in sea is 6.6% of the total water in the Earth. This result is consistent with that inferred from the chondrite's compositions.

Key words: mantle; water; hydrous phases of mantle

摘要:水以含水变质矿物、无水硅酸盐矿物(橄榄石、辉石等)及其高压结构相(β 橄榄石、 γ 橄榄石、钙钛矿相、方镁铁矿等)、高密度含水镁硅酸盐和熔体的形式存在于地幔各层圈中。根据各类玄武岩含水量推断出的上地幔源区的水含量,和由地幔岩主要矿物——橄榄石的水含量估算出的上地幔水含量(质量分数)很接近,在0.02%左右。以橄榄石和辉石高压相的水含量为依据,进行了过渡带和下地幔水含量的估算,其结果是:过渡带和下地幔上部的水含量(质量分数)为1.48%,下地幔下部水含量(质量分数)为0.21%。据此,计算出的地幔各层圈的总水量表明,地幔水的74%以上存在于过渡带和下地幔上部。将地幔总水量和现代海洋总水量之和作为地球总水量,计算出现代海洋总水量约占全球总水量(质量分数)的6.6%,这个结果与笔者根据地球的球粒陨石成分模型计算出的总水量(6%)十分接近。

关键词:地幔;水;地幔含水相

中图分类号:P588.12; P592 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2005)01-0055-06

最近的30多年来,以下方面的研究使我们对于地幔含水状况的了解大大向前迈进了一步:(1)对各类火山活动的观测与地震层析结果的综合研究表明,富含水和挥发份的玄武岩浆来源于地幔,其中与地幔热柱有关的岩浆活动来源较深,最深可达核幔界面。这说明了地幔含水的深度涉及全地幔范围。

收稿日期:2004-11-15; **修回日期:**2004-12-29

基金项目:国家自然科学基金重大项目(10299040);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KJ CX2-SW-No. 3)

作者简介:谢鸿森(1937—),男,研究员,从事地球深部物质科学研究。

(2) 对上地幔橄榄岩包体矿物谱学的研究发现, 地幔主要造岩矿物——橄榄石、辉石、石榴子石等矿物中都不同程度地含有水, 它们可能成为地幔水最重要的贮集物。(3) 含水体系的高温高压实验及其产物的谱学分析所获得的结果大大丰富了地幔含水相的种类, 提供了更多有关地幔水存在状态的实验证据。这些含水相包括了: ①传统矿物分类中的含水变质矿物, 如闪石和云母类矿物; ②橄榄石和辉石等矿物的高压相; ③传统矿物分类中不曾报道过的一些新的含水矿物相, 它们大多是含水富镁的硅酸盐, 且具有相当高的密度, 因而被称为高密度含水镁硅酸盐相^[1,2]。这些研究成果为探讨地幔中水的存在形式和水含量的估算提供了重要的理论和实验依据, 有关地幔水的问题也成为了当前地球深部领域中的热门话题。本文将在对有关方面的研究结果进行综合评述的基础上, 对地幔各层圈中水的总量作出估算。

1 上地幔中水的存在形式

(1) 无水硅酸盐矿物: 根据地幔矿物学模型, 上地幔的主要矿物成分为橄榄石, 其次为辉石和石榴子石^[1]。研究表明, 在这几种矿物中, 水主要以 $(OH)^-$ 的形式存在于矿物的结构缺陷中。在橄榄石中, 某些缺陷为平面层状, 这些层约几个 10^{-10} m 厚, 类似于叶片状斜硅镁石的结构。这些缺陷中, $(OH)^-$ 可能替代氧离子, 与阳离子进行电荷平衡^[1,3]。

(2) 含水变质矿物: 在上地幔上部, 水还以多种含水变质矿物的形式存在。实验表明, 在 100 km 深度以内, 可能稳定存在的含水变质矿物有绿泥石、韭闪石、蛇纹石和金云母等。100~200 km, 蛇纹石和金云母能够稳定存在。200~400 km 主要的含水变质矿物为富钾闪石、斜硅镁石和粒硅镁石类矿物。如果上地幔局部富 Si、Al 成分(接近于玄武岩), 那么在 100 km 深度内可能有绿泥石、角闪石、硬柱石+硬绿泥石、黝帘石+硬绿泥石存在。200 km 之上, 只有硬柱石能够稳定存在了^[3]。在这些矿物中水大多主要以 $(OH)^-$ 形式参加矿物晶格, 少数以结晶水的形式存在(表 1)。

(3) 高密度含水镁硅酸盐相(以下简称 DHMS): 对高温高压实验合成的多种 DHMS 的研究已经持续了 20 多年, 已发现了 10 种以上的此类矿物相—— 10×10^{-10} m 相、 3.65×10^{-10} m 相、A

相、B 相、C 相、D 相、D' 相、E 相、F 相、G 相和超 B 相等。由于此类矿物相常为多形、细粒, 给衍射图的解释带来很大困难, 使其命名还不完全统一。根据最近的工作, 已确定 G 相和 D 相的晶体结构相同, C 相、F 相和超 B 相的结构属于同一个类型^[3]。表 1 列出了比较确定的 6 种 DHMS (10×10^{-10} m 相, A 相, B 相, D 相, E 相和超 B 相) 的中、英文名称, 化学分子式, 及其稳定的压力温度和深度范围。可以看出, 在上地幔较深处(100 km 之下) 这六种 DHMS 都可能存在。从它们的化学分子式可以看出, 在 A 相、B 相和超 B 相中水以 $(OH)^-$ 形式存在, E 相和 D 相中水以 H^+ 的形式存在, 而在 10×10^{-10} m 相中水以 $(OH)^-$ 和结晶水两种方式存在。

(4) 硅酸盐熔体: 硅酸盐熔体也是地幔中水的贮集物。大多情况下, 熔体分散于地幔矿物和岩石的孔隙和裂缝中。在一定的条件下, 熔体会发生聚集并向上迁移, 形成岩浆上涌和火山的喷发。因此, 熔体也是地幔中水发生大规模迁移的载体。熔体中的水主要以 H_2O 和 $(OH)^-$ 的形式存在^[4]。

2 上地幔水含量

对于整个上地幔而言, 由于含水变质矿物、DHMS 以及熔体所占质量比很低, 目前仍无法对其数量作出估算, 因此, 上地幔水含量的估算主要采取以下 3 种途径:

(1) 根据玄武岩水含量, 以及上地幔岩石发生部分熔融期间水在地幔岩石与熔体间的分配系数, 推断其上地幔源区的水含量。常使用的分配系数为 0.01^[5]。玄武岩成分分析表明, 富水的玄武岩也相应富集不相容亲石元素(如, K、Nb、Ce、Nd 等)。因此推断, 大洋中脊玄武岩的上地幔源区——富集型地幔源区(E-MORB) 比亏损型地幔源区(N-MORB) 更富含水。Jamtveit 等综合一些学者根据玄武岩含水量推断出的上地幔源区的含水量结果是: 亏损型上地幔源区(N-MORB) 水含量(质量分数) 为 0.01%~0.02%; 富集型上地幔源区(E-MORB) 水含量为 0.02%~0.055%^[5]。Williams 等综合 2000 年以前多位学者的研究结果得出: 亏损型上地幔源区(N-MORB) 水含量范围为 0.008%~0.018%; 富集型上地幔源区(E-MORB) 水含量(质量分数) 范围为 0.02%~0.095%^[3]。综合上面的结果, 上地幔的含水量范围为 0.008%~0.095%。

表 1 地幔中可能存在的含水变质矿物和高密度含水镁硅酸盐*

Table 1 Hydrated metamorphic mineral and dense hydrous magnesium silicate (DHMS) in mantle

| 英文名 | 中文名 | 分子式 | 稳定压力温度范围 | 深度范围** km |
|--------------------------------|----------------------------|---|---------------------|------------|
| 含水矿物 | | | | |
| Brucite | 水镁石 | Mg(OH) ₂ | >78 GPa, 1 300 °C | >1 500 |
| Serpentine | 蛇纹石 | Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ | 5 GPa, 700 °C | <410 |
| Norbergite | 块硅镁石 | Mg ₃ Si ₄ (OH) ₂ | >5 GPa, 1 100 °C | <410 |
| Chondrodite | 粒硅镁石 | Mg ₅ Si ₂ O ₈ (OH) ₂ | 10 GPa, 1 100 °C | <410 |
| Humite | 硅镁石 | Mg ₇ Si ₃ O ₁₂ (OH) ₂ | >3 GPa, 900 °C | <410 |
| Clinohumite | 单斜硅镁石 | Mg ₆ Si ₄ O ₁₆ (OH) ₂ | >10 GPa, >1 000 °C | <410 |
| Lawsonite | 硬柱石 | CaAl ₂ (Si ₂ O ₇)(OH) ₂ H ₂ O | 2~11 GPa, ~800 °C | <410 |
| Phlogopite | 金云母 | K ₂ (Mg, Fe ²⁺) ₆ Si ₆ Al ₂ O ₂₀ (H, F) ₂ | >10 GPa, ~1 000 °C | <410 |
| K-Richterite | 钾碱镁闪石 | K ₂ Ca(Mg, Fe ²⁺) ₅ Si ₃ O ₂₂ (OH) ₂ | 5 GPa, 1 200 °C | <410 |
| Phase X | 含水 X 相 | K ₁ Mg ₈ Si ₈ O ₂₅ (OH) ₂ (?) | 17 GPa, 1 600 °C | <410 |
| Zoisite | 黝帘石 | Ca ₂ Al ₃ Si ₃ O ₁₂ (OH) | 4 GPa, 700 °C | <410 |
| Talc | 滑石 | Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ | 5 GPa, 700 °C | <410 |
| Topaz-OH | 黄玉 | Al ₂ Si ₂ O ₇ (OH) ₂ | 11 GPa, 1 000 °C | <410 |
| Diaspore | 硬水铝石 | AlOOH | 6 GPa, 400 °C | <410 |
| Phase“pi” | “pi”相 | Al ₃ Si ₂ O ₇ (OH) ₃ | 6 GPa, 700 °C | <410 |
| Phase“egg” | “egg”相 | AlSi ₃ O ₅ OH | >11 GPa, 1 300 °C | <410 |
| Mg-pumpellyite | Mg 绿纤石 | Mg ₅ Al ₃ Si ₆ O ₂₁ (OH) ₇ | ~6 GPa, 770 °C | <410 |
| 高密度含水镁硅酸盐 (DHMS) | | | | |
| Phase A | A 相 | Mg ₇ Si ₂ O ₈ (OH) ₆ | 6~10 GPa, 1 000 °C | <410 |
| Phase B | B 相 | Mg ₂₄ Si ₂ Si ₆ O ₃₈ (OH) ₄ | 12~24 GPa, 1 000 °C | >670 |
| Superhydrous B | 超 B 相 | Mg ₁₀ Si ₂ SiO ₁₄ (OH) ₄ | 12~24 GPa, 1 300 °C | >670 |
| Phase E | E 相 | Mg _{2.3} Si _{1.25} O _{2.4} H ₆ | 12~15 GPa, 1 100 °C | >410, <670 |
| Phase D | D 相 | MgSi _{2-x} H _{2-4r} O ₆ | 4~50 GPa, 2 400 °C | >1 000 |
| 10 × 10 ⁻¹⁰ m Phase | 10 × 10 ⁻¹⁰ m 相 | Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ H ₂ O | 3~9 GPa, 500 °C | <410 |

* 主要资料来源于[3]。 ** 这里所给出的深度范围是根据 PREM 地球模型^[1]中 410 km 深度、压力约为 14 GPa, 670 km 深度、压力约为 24 GPa, 2 900 km 深度、压力约为 135 GPa 的数值估出的大致范围。

(2) 在设定上地幔的成分与橄榄岩接近的前提下, 根据地幔橄榄岩包体中主要矿物含水量的测定, 并结合含水高温高压实验获得的橄榄岩主要矿物的水含量, 估算出整个上地幔的水含量。分析结果表明, 橄榄石的水含量(质量分数)一般低于 0.01%, 斜方辉石水含量为 0.02%~0.065%^[3]。可见, 在上地幔含辉石较高的地幔岩石, 其含水量可能较高。我们根据 Ringwood 给出地幔岩成分模型^[1], 在忽略其他含水相的条件下, 橄榄石和辉石的比例为 57.98 : 42.02。橄榄石水含量(质量分数)取 0.01%, 取辉石水含量(质量分数)的中间值为 0.042 5%, 计算出上地幔平均水含量(质量分数)约 0.024%。这个结果在上述由玄武岩水含量估算出的水含量(质量分数)范围(0.008%~0.095%)内。

(3) 根据高温高压实验可估算出上地幔含水量

的上限。实验表明^[3,6], 在相当于上地幔底部(约 400 km)的压力温度下, 橄榄石的水含量可增加至 0.12%。在相当于上地幔与过渡带边界(约 440 km)处的压力温度下, 橄榄石(α 相)将发生相转变形成 β-橄榄石。经测定, β-橄榄石含水量(质量分数)可达 2.4%, 甚至更高(3.1%)。可见在过渡带的含水量比上地幔的含水量高得多, 上地幔含水量的上限不可能大于 2.4%~3.1%。

3 过渡带和下地幔中水的存在形式

3.1 过渡带和下地幔中水的可能存在形式

本文采用目前被广泛使用的地球分层模型, 地幔过渡带的深度范围大致为 410~670 km, 下地幔的深度范围大致为 670~2 900 km^[7]。在过渡带和

下地幔中水应该主要存在于无水硅酸盐矿物(橄榄石、辉石等)的高压相(β -橄榄石、 γ -橄榄石、钙钛矿相、方镁铁矿、单斜顽火辉石、钛铁矿相、斯石英、贫铝榴石(majorite))中。研究表明,这些高压相中水均以(OH)⁻形式存在于晶体结构缺陷中。目前已有学者对 β -橄榄石中的水作了如下的结构解释:由于 β 相中可能含Si₂O₇单元组分,使其每个分子式中有0.5个氧不与SiO₄四面体连接,而与镁离子连接。氢离子取代0.5个氧的位置,成为(OH)⁻进入结构中。另一种解释认为,在 β 相中还可能存在着另一种含氢离子的端员组分: Mg_{1.75}SiH_{0.5}O₄ (Mg₇Si₄H₂O₄),这种端员组分和无水 β 相端员组分((Mg,Fe)₂SiO₄)之间形成固溶体^[3]。Murakami等使用红外光谱进行了MgSiO₃钙钛矿相和方镁铁矿单晶的测量,通过谱学分析,认为MgSiO₃钙钛矿相和方镁铁矿中的(OH)⁻属于结晶定向结构水^[8]。

此外,从表1看出,水镁石可能是唯一在过渡带和下地幔中能稳定的含水变质矿物,最大稳定深度在1500 km以上。E相、B相、超B相和D相是过渡带和下地幔中能够稳定存在的DHMS矿物,其中E相仅在过渡带范围内稳定,B相和超B相的稳定深度可达下地幔顶部,而D相DHMS的稳定范围可达下地幔1000 km深处。但是目前还无法确定过渡带和下地幔中水镁石、E相、B相、超B相和D相DHMS的含量,它们也不能作为主要含水相考虑。

3.2 过渡带和下地幔中主要高压含水相的确定

依据MgO-FeO-SiO₂体系中矿物(橄榄石、辉石等)的高温高压相变资料,我们绘制MgO-FeO-SiO₂体系在1000℃的高压相图及其对应的地球深度(图1)。由图1可以看出,橄榄石的高压相变与410 km和670 km地震波速不连续面有成因关系。根据Ringwood给出的地幔岩模型,可以认为过渡带和下地幔主要由橄榄石和辉石组成(总含量接近90%^[1])。根据地幔包体中橄榄石的成分,设定过渡带和下地幔中的橄榄石和辉石成分为 $x(\text{FeO})/x(\text{MgO} + \text{FeO}) = 0.09$ (摩尔分数比)^[9]。由图1可以近似判断出过渡带和下地幔中主要的含水相。

由富镁端员Mg₂SiO₄的相图可看出,在过渡带上界(~410 km)(~14 GPa, 1400℃), α -橄榄石相变为 β -橄榄石;在过渡带的下界(~670 km)(~24 GPa, 1400℃), γ -橄榄石分解为钙钛矿相+方镁石。而 β -橄榄石 \rightarrow γ -橄榄石的相变(~19 GPa,

1400℃)发生在过渡带的深度范围之内。由此可见, β -橄榄石和 γ -橄榄石是过渡带的主要含水相,而钙钛矿相+方镁石(如果含铁应称为方镁铁矿)是下地幔的主要含水相。然而,由于 γ -橄榄石和钙钛矿相+方镁石之间的 p - T 线为负斜率,因此可推断,

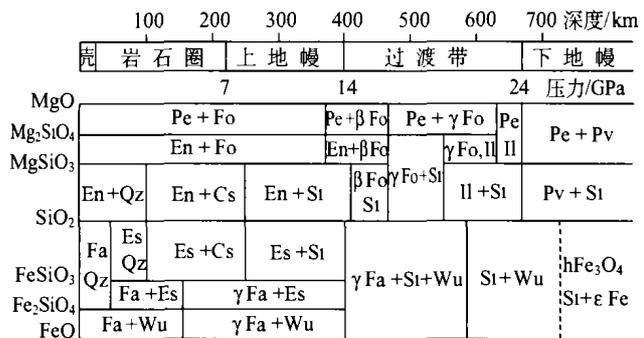


图1 MgO-FeO-SiO₂体系在1000℃的高压相图
Fig. 1 Phase diagram for MgO-FeO-SiO₂ system at 1000℃ and high pressure

图中的矿物缩写: Pe: MgO-方镁石; Fo: Mg₂SiO₄-镁橄榄石; β : Wadsleyite; γ : Ringwoodite; En: MgSiO₃-顽火辉石; Il: 钛铁矿相; Pv: 钙钛矿相; Qz: SiO₂-石英; Cs: 柯石英; St: 斯石英; Wu: FeO-方铁矿; Fa: Fe₂SiO₄-铁橄榄石; Es: FeSiO₃-正铁辉石

如果地幔温度较低,这个相变可能发生在比670 km更深的下地幔上部。那么,在下地幔上部 γ -橄榄石可能是主要的含水相。

辉石(MgSiO₃)的高压相图表明,在过渡带的深度范围内,由辉石相变形成的高压含水相包括单斜顽火辉石、斯石英和钛铁矿。虽然在16~23 GPa压力范围内,辉石还存在一个高压含水相——贫铝榴石(majorite),但其稳定的温度比上述几个高压含水相高得多。因此,我们认为贫铝榴石不能作为下地幔的含水相。由于钛铁矿和钙钛矿相之间的 p - T 线也为负斜率,同样可以认为,如果地幔温度较低,这个相变可能发生在比670 km更深的下地幔上部。因此,在下地幔上部,由辉石相变形成的主要含水相是钛铁矿相。

Bolfan-Casanova等完成了高温高压MgO-SiO₂-H₂O体系的相变实验,并计算出了在实验产物中共生的橄榄石高压相和辉石高压相之间的水的分配系数。其结果表明(表2),在相当于过渡带的压力下,橄榄石的高压相(β -橄榄石、 γ -橄榄石)中的水含量总是大大的高于顽火辉石(MgSiO₃)的高压相变产物——单斜顽火辉石、钛铁矿相和斯石英的水含量。其中, β -橄榄石/单斜顽火辉石、 γ -橄榄石/钛铁矿相和 γ -橄榄石/斯石英的分配系数分别为3.8、21和520。据此,我们认为,过渡带和下地幔上

部的主要含水相是 MgSiO₃ 的钙钛矿相, 辉石的其他多个高压相都可以忽略。

综上所述, 我们认为过渡带和下地幔的上部(~410~1 000 km)中的主要含水相为 β-橄榄石和 γ-橄榄石, 下地幔下部(~1 000~2 900 km)中的主要含水相是钙钛矿和方镁铁矿。

表 2 Bolfan-Casanova 等 MgO-SiO₂-H₂O 体系高压实验结果^[11]

Table 2 Run conditions and partition coefficients in resulting phases of MgO-SiO₂-H₂O system after Bolfan-Casanova et al

| 压力/GPa | 温度/℃ | 实验产物 | 水的分配系数 |
|--------|-------|--------------|---|
| 15 | 1 300 | β-橄榄石、单斜顽火辉石 | $D_{\text{水}}^{\beta\text{-橄}} \sim 3.8$ |
| 15 | 1 500 | 单斜顽火辉石、斯石英 | $D_{\text{水}}^{\text{单斜顽火辉石-斯石英}} \sim 8.2$ |
| 19 | 1 200 | γ-橄榄石、斯石英 | $D_{\text{水}}^{\gamma\text{-橄}} \sim 520$ |
| 19 | 1 300 | γ-橄榄石、钛铁矿相 | $D_{\text{水}}^{\gamma\text{-橄-钛铁矿相}} \sim 21$ |
| 21 | 1 500 | 钛铁矿相、斯石英 | $D_{\text{水}}^{\text{钛铁矿相-斯石英}} \sim 18$ |

橄榄石和 γ-橄榄石相对比例。因此我们取这两个相水含量(质量分数)的中间值(2.55%)作为过渡带和下地幔上部橄榄石部分的平均水含量。根据地幔模型中橄榄石和辉石比(57.98 : 42.02), 计算出过渡带和下地幔上部的平均水含量(质量分数)为 1.48%。

表 3 高温高压实验产物中橄榄石高压相的含水量*

Table 3 Water contents in olivine and its high-pressure phase under high-pressure and high-temperature

| 序号 | 压力 <i>p</i> /GPa | 温度 <i>t</i> /℃ | 相应深度** <i>z</i> /km | 高压相名称 | <i>w</i> (水)/% |
|----|---------------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------|----------------|
| 1 | 13 | 1 100 | <410 | α-橄榄石 | 0.12 |
| 2 | 14~15 | 1 100 | >410, <670 | β-橄榄石 | 2.4 |
| 3 | 19.5 | 1 100 | <670 | γ-橄榄石 | 2.7 |
| 4 | 25.5 | 1 660~1 650 | >670 | 钙钛矿相(MgSiO ₃) 方镁铁矿 | 0.22 0.19 |

* 1~3 行引自[6]; 第 4 行引自[8]; ** 深度的估计方法同表 1。

表 3 还列出了 Murakami 等在高温高压实验中获得的钙钛矿相和方镁铁矿的水含量测定结果的平均值^[8]。我们采用 Mg₂SiO₄ = MgSiO₃ + MgO 近似计算出由橄榄石分解形成钙钛矿相和方镁铁矿的质量比为 71.36 : 28.64, 可计算出下地幔下部由橄榄石部分分解形成的钙钛矿相和方镁铁矿的平均水含量(质量分数)为 0.211%。而下地幔下部中由辉石部分相变形成钙钛矿相的水含量(质量分数)为 0.22%。根据地幔模型中橄榄石和辉石比(57.98 : 42.02), 计算出整个下地幔下部平均水含量(质量分数)为 0.21%。

4 过渡带和下地幔的水含量

Williams 等综合了多位学者的实验结果后发现, 相同压力下, β-橄榄石的水含量受温度和成分的影响很大。温度高, Mg/Si 值低的情况下, β-橄榄石的水含量低; 反之温度低且 Mg/Si 高的情况下, β-橄榄石的水含量高^[3]。我们采用橄榄石的 $x(\text{FeO})/x(\text{MgO}+\text{FeO})$ 比值为 0.09 ($x(\text{Mg})/x(\text{Si})$ 为约 1.82) 时, 温度范围 1 100~1 300 ℃, 有 3 组实验的结果基本相同^[3]。上述 3 组实验之一, Kohlstedt 等在多砧压力装置中, 采用 San Carlos 橄榄石单晶为原始物料, 进行橄榄石 α, β 和 γ 相(OH)⁻ 溶解度实验研究^[6], 其结果列于表 3。目前很难确定过渡带的确切温度范围, 也就难以确定过渡带中 β-橄

5 地幔总水量估算

我们使用 2、4 节给出的有关数据, 对地幔各层圈的水含量作了粗略的估算, 其结果列于表 4 中。表中上地幔的主要含水相是 α-橄榄石; 过渡带和下地幔上部主要含水相 β-橄榄石、γ-橄榄石; 下地幔

表 4 地幔各层圈主要含水量和总水量

Table 4 Water contents and water quantum in upper mantle, transition zone and lower mantle

| 层圈 | 深度/km | 相对质量* | 平均水含量/% | 总水量占地球总质量的比例/% | 各层圈总水量占地幔总水量的比例/% | 各层圈总水量与海洋水的比** |
|-----------|-------------|-------|---------|----------------|-------------------|----------------|
| 上地幔 | 20~410 | 10 | 0.024 | 0.002 | 0.06 | 0.08 |
| 过渡带和下地幔上部 | 410~1 000 | 17 | 1.48 | 0.252 | 74.12 | 10.5 |
| 下地幔 | 1 000~2 900 | 41 | 0.21 | 0.086 | 25.29 | 3.58 |

* 此值引自[1], 为占地球总质量的比例(%); ** 海洋水占地球总质量分数为 0.024%, 引自[12]。

主要含水相是钙钛矿相、方镁铁矿。地幔总水量占地球总质量的比例为 0.34%。可以看出,在地幔各层圈中,过渡带和下地幔上部含水量最高,总水量也最大,大约占地幔总水量的 74% 以上。与海洋水比较,地幔总水量为海洋的 14 倍以上。如果假设地核

中不含水,海洋水则占地球总水量的 6.6%。这个结果与我们根据地球的球粒陨石成分模型计算出的现代海洋水占全球总水量的 6% 的结果^[9] 非常接近。

References:

- [1] XIE H S. *An Introduction to Material Science in the Earth's Interior* [M]. Beijing: Science Press, 1997; 143-155, 169 (in Chinese).
- [2] COURTILLOT V, DAVAILLE A, BESSE J, et al. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 205(3-4):295-308.
- [3] WILLIAMS Q, HEMLEY R J. Hydrogen in the deep Earth [J]. *Amu Rev Earth Planet Sci*, 2001, 29:365-418.
- [4] ZU Y F, ZHANG C Q. *The Structure of Silicate Melt* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996; 98(in Chinese).
- [5] JAMTVEIT B, BROOKER R, BROOKS K, et al. The water content of olivines from the north atlantic volcanic province [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 186: 401-415.
- [6] KOHLSTEDT D L, KEPPLER H, RUBIE D C. Solubility of water in the α , β and γ phases of $(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$ [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1996, 123(4):345-357.
- [7] TENG J W. *Generality of Solid Geophysics* [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 2003; 170-178(in Chinese).
- [8] MURAKAMI M, HIROSE K, YURIMOTO H, et al. Water in Earth's lower mantle[J]. *Science*, 2002, 295:1885-1887.
- [9] HOU Wei, XIE H S. *From the Origin of Meteorite to the Earth's Formation* [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 2003; 271 (in Chinese).
- [10] ZHANG Y X, YIN A. *Structure Evolution and Dynamics of the Earth* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002; 57-70 (in Chinese).
- [11] BOLFAN-CASANOVA N, KEPPLER H, RUBIE D C. Water partitioning between nominally anhydrous minerals in the MgO-SiO₂-H₂O system up to 24 GPa: Implications for the distribution of water in the Earth's mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 182:209-221.
- [12] ALLEN C W. *Astrophysical Quantities* [M]. Translated by YANG Jian, Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 1976; 140 (in Chinese).

参考文献:

- [1] 谢鸿森. 地球深部物质科学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1997; 143-155, 169.
- [4] 朱永峰, 张传清. 硅酸盐熔体结构学[M]. 北京: 地质出版社, 1996; 98.
- [7] 滕吉文. 固体地球物理学概论[M]. 北京: 地震出版社, 2003; 170-178.
- [9] 侯渭, 谢鸿森. 陨石成因与地球起源[M]. 北京: 地震出版社, 2003; 271.
- [10] 张有学, 尹安. 地球的结构演化和动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002; 57-70.
- [12] 艾伦 C W. 物理量和天体物理量[M]. 杨建译. 上海: 上海人民出版社, 1976; 140.