



大陆岩石圈地幔中水的分布和大陆稳定性

夏群科*, 郝艳涛

中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: qkxia@ustc.edu.cn

2013-01-14 收稿, 2013-05-14 接受, 2013-09-27 网络版发表

国家自然科学基金重大研究计划(91014007, 90714009)和国家自然科学基金(40673028)资助

摘要 岩石圈地幔是影响大陆演化和稳定性的最重要层圈之一. 水对于矿物/岩石的许多物理化学性质有显著影响, 研究水在大陆岩石圈中的分布是大陆动力学的主要内容之一. 本文简要评述了近年来在大陆岩石圈地幔中水的赋存方式、大陆岩石圈地幔中水分布的时空不均一性、水与大陆稳定性之间的联系 3 个方面的研究进展, 并指出了该领域今后应着重加强的研究方向.

关键词

水
名义上无水矿物
大陆岩石圈地幔
大陆稳定性

岩石圈地幔是大陆板块最下部的层圈, 由于和下覆软流圈地幔之间的黏滞度差异而“漂浮”其上, 保证了大陆的稳定. 了解大陆岩石圈地幔的形成和演化是研究大陆形成、破坏和演化的重要组成部分, 也是深入认识地球内部动力学过程的前提之一.

水(指的是矿物中的含 H 相, 由于分析结果通常表示为 H_2O 的重量分数, 地学界习惯泛称为“水”)的存在, 即使只是百万分之一量级, 也能够显著改变矿物的许多物理和化学性质, 如波速、电导率、流变学强度、热传导效率、光学性质、熔融温度、离子的扩散行为等^[1-13]. 正因为如此, 水也就有效地影响着岩石系统的许多物理和化学过程, 如大陆板块的相对运动、板内岩浆的形成和演化等^[7,14-24]. 大陆岩石圈地幔中水含量的高低带来的黏滞度变化还直接影响着大陆板块的稳定性^[23,25-28]. 因此, 了解大陆岩石圈地幔中水的分布是研究其形成和演化的关键内容之一.

1 大陆岩石圈地幔中水的赋存方式

大陆岩石圈地幔中水的赋存对象主要是: (1) 流体包裹体; (2) 含水矿物; (3) 名义上的无水矿物(即理想化学式中不含 H 的矿物, 如橄榄石、辉石、石榴石、长石等).

尽管橄榄岩矿物中的流体包裹体在被捕获时可能含有一定量的水, 但是它们通常都会在后由于和寄主矿物的交换而发生脱水, 形成脱水后的(dehydrated)以 CO_2 为主的包裹体^[29]. 因此, 流体包裹体对岩石圈地幔中水的总量的贡献很小.

由于熔/流体交代作用的影响, 岩石圈地幔中有时会出现含水矿物, 如角闪石、金云母和磷灰石等^[30]. 但是这些矿物形成的前提是 K, Na, P, F, Cl 等元素的强烈富集, 因此, 它们只在某些特殊的情况下偶然出现.

大陆岩石圈地幔的主体岩石是橄榄岩(金刚石相、石榴石相、尖晶石相、斜长石相), 另外还有少量的辉石岩和榴辉岩. 这些岩石的主要组成矿物是橄榄石、辉石、石榴石、尖晶石和斜长石. 虽然它们都是“名义上的无水矿物”, 但是它们的晶格缺陷中通常都含有 H, 以 OH 或 H_2O 的形式存在, 这种形式存在的 H 被称为结构水, 其含量(表示为 $H_2O_{wt\%}$, wt% 为质量分数, 下同)范围为几至几千微克量级^[27,31,32]. 虽然这些矿物中结构水的绝对含量并不高, 但是如果考虑到它们的体积和重量分数, 它们就构成了岩石圈地幔中最大的水储库.

综上所述, 大陆岩石圈地幔中水的主要赋存方式是以 OH 或 H_2O 形式存在于名义上无水矿物晶格

引用格式: 夏群科, 郝艳涛. 大陆岩石圈地幔中水的分布和大陆稳定性. 科学通报, 2013, 58: 3489-3500

英文版见: Xia Q K, Hao Y T. The distribution of water in the continental lithospheric mantle and its implications for the stability of continents. Chin Sci Bull, 2013, 58: 3879-3889, doi: 10.1007/s11434-013-5949-1

缺陷里的结构水。

已发表的地幔矿物中 H_2O 含量的数据主要来自傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 分析和离子探针 (SIMS) 分析 2 种方法, 其中绝大多数来自 FTIR 分析. 不同文献中使用的计算矿物 H_2O 含量的红外吸收系数有所差异, 但是目前被普遍接受的橄榄石、单斜辉石、斜方辉石和石榴石的红外吸收系数来自 Bell 等人^[33,34]. 本文中涉及到的 FTIR 数据, 如果原始文献中使用的不是 Bell 等人^[33,34] 的吸收系数, 则据此做了重新计算. 我们的处理方法和 Peslier 等人^[27] 综述文章中的方法一样.

2 大陆岩石圈地幔中水的分布

H_2O 在地幔岩石的熔融系统中表现出不相容元素的特征, 其分配系数和 Ce 接近^[22,35]. 与其他不相容微量元素类似, H_2O 在大陆岩石圈地幔中的分布是极度不均一的, 无论在空间上, 还是在时间上. 由于 (1) 橄榄岩是大陆岩石圈地幔中最重要的代表性岩石, (2) 目前发表的绝大部分数据来自橄榄岩包体矿物, 因此本文有关岩石圈地幔所做的讨论都是基于橄榄岩矿物的数据.

橄榄岩包体的寄主岩石主要有 2 类: 金伯利岩和玄武岩. 已有的研究表明, 金伯利岩携带的橄榄岩包体矿物, 无论是橄榄石还是辉石, 虽然在上升过程中其颗粒的最边部可能经历了 H 的丢失, 但颗粒核部有效地保存了其在地幔源区的原始水含量^[27,31,36-38]. 对于玄武岩携带的橄榄岩包体来说, 虽然单斜辉石和斜方辉石的核部保存了原始水含量^[23,31,36,39-41], 但对于橄榄石来说, 无论是边部还是核部, 都可能经历了上升过程中的 H 丢失^[23,37,42,43], 导致实测水含量的普遍偏低. 橄榄石和辉石之间行为的差异可能与多种因素有关, 如橄榄石中的 H 可能部分存在于面缺陷中而易于扩散、橄榄石相对于辉石来说易于变形、橄榄石和辉石中氢键强度的差异等^[27]; 而玄武岩浆携带的橄榄岩中的橄榄石相对于金伯利岩浆来说更易于发生扩散, 可能与玄武岩浆更低的水含量、更高的温度以及更慢的上升速率有关^[27,42,43].

在根据矿物的水含量和重量分数来计算橄榄岩全岩水含量的时候, 要么直接使用实测橄榄石的水含量^[23,31,36]; 要么假设橄榄石和辉石之间达到了水的分配平衡, 根据实验研究的结果, 采用橄榄石与单斜辉石之间 H_2O 的分配系数 0.1 来反推橄榄

石的水含量^[40,44]. 实验和天然观察都表明, 在 $P < 3$ GPa 的条件下, 橄榄石与辉石之间 H_2O 的分配系数 < 0.1 ^[22,27,31,36-38,45,46], 因此, 对于玄武岩中的橄榄岩包体来说, 由于橄榄石相对辉石来说非常低的水含量, 两种处理方式带来的差异很小. 也就是说, 对于文献中已经发表的橄榄岩水含量来说, 将金伯利岩中橄榄岩包体的橄榄石水含量和玄武岩中橄榄岩包体的橄榄石水含量直接对比 (即使都是核部的数据) 可能是没有意义的, 但是两种辉石核部以及由此计算的全岩水含量的对比是可信的. 所以本文在比较不同地点金伯利岩携带的橄榄岩时 (图 1), 使用了橄榄石的水含量; 而在对比玄武岩和金伯利岩携带的橄榄岩包体以及对比不同地点玄武岩中橄榄岩包体时 (图 2), 则只使用了两种辉石和全岩的水含量.

2.1 不同类型岩石圈地幔中水含量的差异

(i) 稳定的克拉通地幔和典型的非克拉通地幔. 稳定克拉通的样品来自于南非 Kaapvaal 克拉通^[27,31,36-38,47-49] 和俄罗斯 Siberia 克拉通^[50,51], 都是金伯利岩携带的橄榄岩包体. 其中 Siberia 克拉通只有橄榄石和石榴石的数据, 无辉石数据. Kaapvaal 克拉通橄榄岩中橄榄石的 H_2O 含量为 0~152 ppm (平均为 47 ppm, $N=52$), Siberia 克拉通橄榄岩中橄榄石的 H_2O 含量为 6~194 ppm (平均为 87 ppm, $N=13$); 两地克拉通橄榄岩中石榴石的 H_2O 含量分别为 0~82 ppm (平均为 10 ppm, $N=56$) 和 1~163 ppm (平均为 28 ppm, $N=40$) ($1 \text{ ppm} = 1 \mu\text{g g}^{-1}$, 下同). 从图 1 可以看出, 两个地区无论是橄榄石还是石榴石, 其 H_2O 含量的范围以及分布特征大致是相同的, 平均值的差异来自于样品数的差异. 也就是说, 从石榴石和橄榄石这两种矿物来看, Kaapvaal 克拉通和 Siberia 克拉通岩石圈地幔具有相似的含水性.

Kaapvaal 克拉通橄榄岩中单斜辉石的 H_2O 含量为 149~399 ppm (平均为 283 ppm, $N=18$); 斜方辉石的 H_2O 含量为 41~460 ppm (平均为 188 ppm, $N=29$); 计算的全岩 H_2O 含量为 16~175 ppm (平均为 82 ppm, $N=29$).

非克拉通 (off-craton) 地区从形成时代上分为元古宙和显生宙, 前者已发表的数据来自于 Namibia 金伯利岩中的石榴石相橄榄岩包体^[47], 都是石榴石的 H_2O 含量数据, 为 1~22 ppm (平均为 10 ppm, $N=26$); 后者则是碱性玄武岩中橄榄岩包体的样品, 绝大多

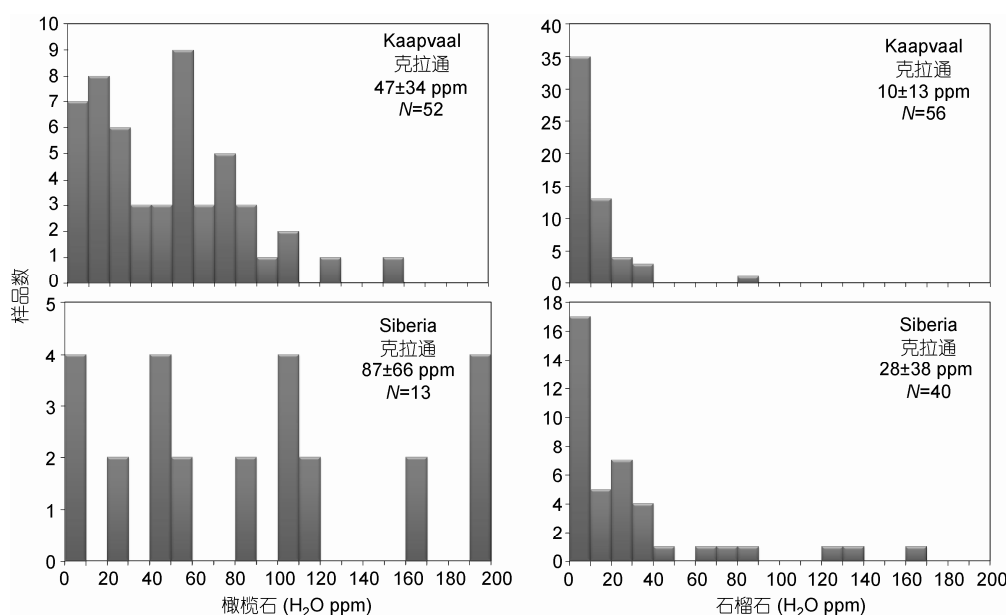


图1 Kaapvaal 和 Siberia 克拉通岩石圈地幔中橄榄石和石榴石 H₂O 含量的对比

图中的数字是平均值和标准偏差. Kaapvaal 克拉通的数据引自文献[27,31,36~38,47~49]; Siberia 克拉通的数据引自文献[50,51]

数都是尖晶石相橄榄岩,地点包括北美盆岭省地区^[23,31,36,39,43,48,52,53]、智利的 Pali-Aike 地区^[42]、德国的 Eifel 地区^[48]、法国的 Massif Central 地区^[36]、澳大利亚的 Victoria 地区^[48]、南极洲的 Greene Points 和 Baker Rocks 地区^[54]以及非洲的 Cape Verd 地区^[54],这些样品中橄榄石的 H₂O 含量为 0~56 ppm(平均为 12 ppm, N=36),单斜辉石的 H₂O 含量为 5~550 ppm(平均为 282 ppm, N=39),斜方辉石的 H₂O 含量为 9~246 ppm(平均为 110 ppm, N=41),计算的全岩 H₂O 含量为 28~155 ppm(平均为 99 ppm, N=20).从图 2 可以看出,虽然 Kaapvaal 克拉通橄榄岩全岩的 H₂O 含量范围与典型的非克拉通地区是一致的,但是其峰值以及平均值要低一些,这与克拉通地幔总体更“亏损”的化学组成是一致的^[55,56].

(ii) 正在减薄的克拉通地幔: Colorado 高原. Colorado 高原是科迪勒拉造山带里未经历明显构造变形的地区,但是研究表明至少自始新世以来,该区岩石圈地幔已经经历了数十千米的减薄并且还在持续之中^[58~61]. Li 等人^[23]分析了来自 Colorado 高原碱性玄武岩和云煌岩中橄榄岩包体矿物的水含量,9 个样品中单斜辉石的 H₂O 含量为 439~957 ppm(平均为 677 ppm); 10 个样品中斜方辉石的 H₂O 含量为 274~402 ppm(平均为 344 ppm).很明显,这些值远高

于 Kaapvaal 克拉通和世界上其他典型非克拉通地区的样品(图 2). 13 个样品中橄榄石的 H₂O 含量为 11~45 ppm(平均为 20 ppm),虽然这些橄榄石在上升过程中经历了 H 扩散丢失,只能作为源区水含量的最小估计,但是其高值仍然高于估计的大洋中脊玄武岩(MORB)源区里橄榄石的水含量(10~30 ppm)^[23]. 该区岩石圈地幔的明显水化被解释为 Farallon 板块俯冲所致^[23].

(iii) 已经减薄的克拉通地幔: 中国华北. 华北克拉通中生代以来经历了大规模的岩石圈减薄^[62,63],其新生代玄武岩(多<40 Ma)中携带的橄榄岩包体代表了减薄后的岩石圈地幔. 目前已发表 13 个产地~150 个橄榄岩的含水量数据^[40,41],涵盖了华北东部和西部. 其主要特点是低水含量(图 2): 橄榄石几乎都不含水;单斜辉石的 H₂O 含量多<200 ppm,平均为 134 ppm(N=137);斜方辉石的 H₂O 含量多<100 ppm,平均为 52 ppm(N=154);全岩 H₂O 含量多<50 ppm,平均为 31 ppm(N=146).这不仅低于典型的克拉通地区和典型的非克拉通地区,也显著低于 MORB 源区(总水含量为 50~200 ppm)^[64~67]和洋岛玄武岩(OIB)源区(总水含量为 300~1000 ppm)^[65,67~71]. 华北样品与美国西部 Simcoe 地区由于高氧化性流体交代造成低水含量的地幔楔橄榄岩不同(Peslier 等

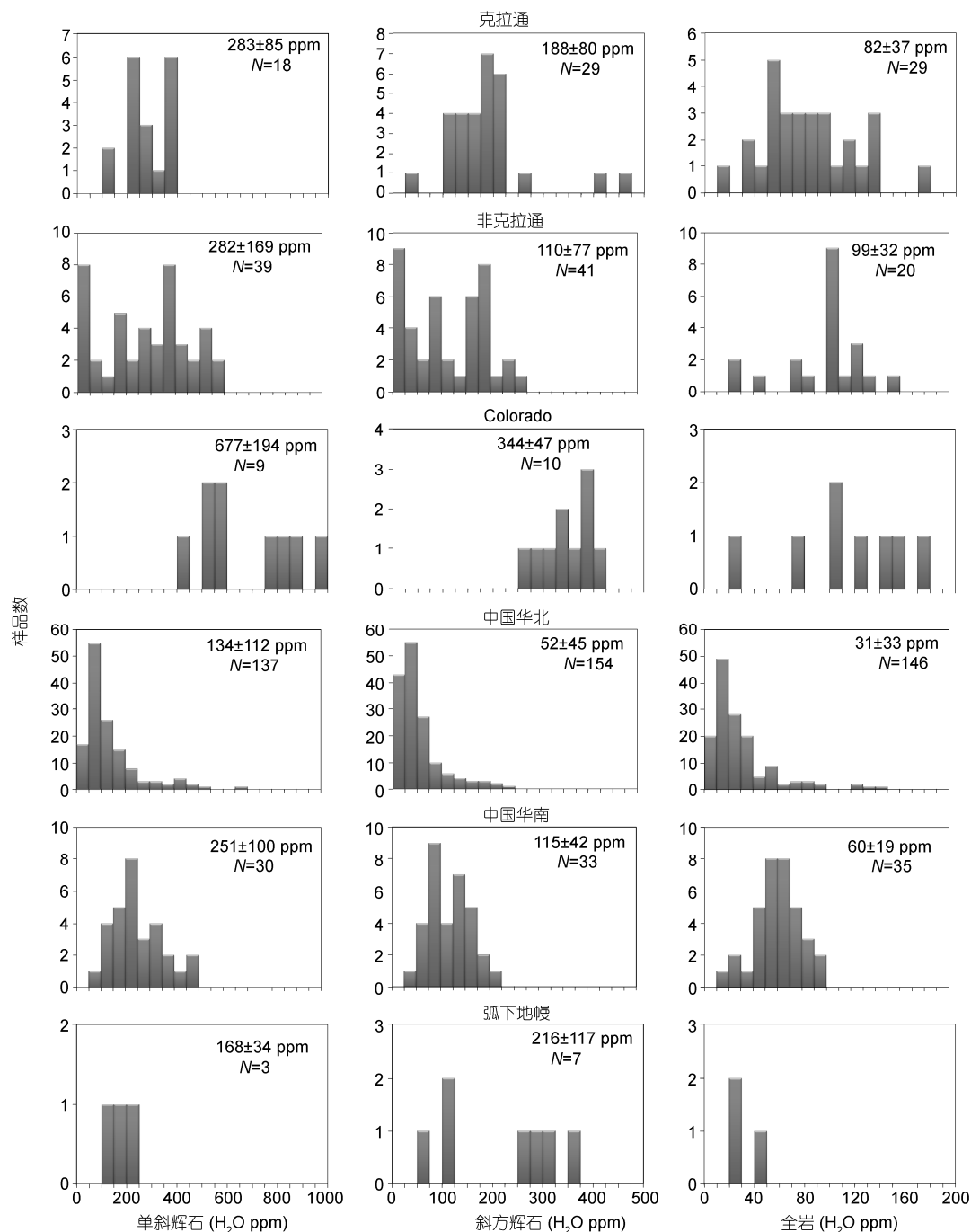


图 2 不同类型岩石圈地幔橄榄岩中 H_2O 含量的对比

图中的数字是平均值和标准偏差。由于 Colorado 地区和弧下地幔具有全岩 H_2O 含量的样品数少 ($N < 10$), 不具统计意义, 因此未计算平均值。典型克拉通地区的数据引自文献[27,31,36~38,47~49]; 典型非克拉通地区的数据引自文献[31,36,39,43,48,52~55]; Colorado 高原的数据引自文献[23]; 弧下地幔的数据引自文献[48]; 华北的数据引自文献[28,40,41]; 华南的数据引自文献[56]

人^[39]文中 2.1.4), 它们的低水含量不是由于高氧逸度引起的, 而可能与伴随着岩石圈减薄的热扰动(加热造成水的逸失或熔融造成水的抽取)有关, 因此目前的华北岩石圈地幔可能大部分都是减薄后的残余

老地幔^[40,44]。某些位于地幔薄弱带的地区(如安徽女山、山东北岩、河北阳原, 它们要么位于郯庐断裂带上, 要么位于华北中部地幔上涌带上)的样品表现出和 MORB/OIB 源区类似的 H_2O 含量和 Sr-Nd 同位素

组成, 它们代表着减薄后新增生的地幔^[40,44].

(iv) 弧下地幔. 弧下岩石圈地幔由来自于日本岛弧和美国 Simcoe 地区的地幔楔橄榄岩代表, 目前数据还很少^[39,48]. 来自日本岛弧的 14 个橄榄石 H_2O 含量为 13~26 ppm, 4 个斜方辉石的 H_2O 含量为 270~350 ppm^[48]. 而来自美国 Simcoe 地区 3 个橄榄石都几乎不含水, 3 个斜方辉石的 H_2O 含量为 71~109 ppm, 3 个单斜辉石的 H_2O 含量为 140~205 ppm, 计算的全岩 H_2O 含量为 25~41 ppm^[39](图 2). 很显然, 日本岛弧样品的水含量与岛弧地区的富水特征吻合^[72~75], 但是 Simcoe 地区的样品却表现出“异常”的低水含量. 前者被解释为来自于水饱和的环境, 后者则由于水含量和氧逸度之间的反相关关系被解释为受到贫水的氧化性流体的交代所致^[27,39].

(v) 中国华南. Yu 等人^[75]报道了华南东南部 4 个地点新生代玄武岩中 35 个橄榄岩样品的水含量. 橄榄石的 H_2O 含量为 0~41 ppm(平均为 24 ppm, $N=35$), 由于上升过程中可能经历了扩散, 这些值代表了源区的最小值. 保存了源区信息的单斜辉石的 H_2O 含量为 58~488 ppm(平均为 251 ppm, $N=30$); 斜方辉石的 H_2O 含量为 38~213 ppm(平均为 115 ppm, $N=33$). 计算的全岩 H_2O 含量为 12~94 ppm(平均为 60 ppm, $N=35$). 很明显, 和华北明显不同的是: 华南大部分样品的全岩水含量落在 MORB 源区的范围之内, 只有少数样品表现出华北多数样品所具有的低水含量的特点(图 2). 对于华北和华南新生代玄武岩中的橄榄岩包体来说, 无论是岩石类型和矿物组合还是主微量元素和放射成因同位素组成, 都不存在明显的整体差异^[76~90]. 因此, 两地区橄榄岩水含量的显著差异不是由于样品经历的部分熔融过程和地幔交代作用所引起的, 而应该归结为来源的差异, 即华南现今的岩石圈地幔可能多为软流圈来源的新增生地幔, 只有少数是残留的老地幔, 而华北则反之: 现今的岩石圈地幔可能多为残留的老地幔, 只有少数是软流圈来源的新增生地幔.

目前尚不清楚华南是否经历过和华北相似的岩石圈减薄过程, 如果是的话, 明显的水含量差异暗示两个地区的减薄机制可能是不一样的.

2.2 岩石圈地幔中水分布的垂向不均一性: 南非 Kaapvaal 克拉通

通过对南非 Kaapvaal 克拉通橄榄岩包体的水含

量和形成压力的综合分析发现, 南非岩石圈地幔的水含量具有明显的垂向不均一性^[38,91]. 图 3 是橄榄岩形成压力和橄榄石水含量的关系图, 样品是目前已经发表的同时具有压力估计和橄榄石水含量的南非金伯利岩中的橄榄岩包体^[27,36~38,48], 这些橄榄石都保存着源区的原始水含量, 在上升过程中没有受到影响. 如图 3 所示, 在 $P<3$ 和 >6.5 GPa 时, 橄榄石的 H_2O 含量都很低, <10 ppm; 而 $P=3.5\sim5.5$ GPa 是富水区域, 橄榄石的 H_2O 含量甚至 >100 ppm, 远高于 MORB 源区. 虽然这些橄榄岩的寄主岩浆的喷发时代是中生代甚至元古代的(1202~86 Ma), 但是这种垂向不均一的分布特征被认为一直保存至今, 反映了现今南非 Kaapvaal 克拉通岩石圈地幔的含水状态^[38,91]. 结合元素和放射成因同位素特征来看, 岩石圈中部的“富水层”是太古代-元古代的地幔交代事件所致^[91], 和地球化学上所指示的“交代层”(metasome)对应, 这个层熔融出的物质是富碱的小规模岩浆^[30].

2.3 不同时代岩石圈地幔中水含量的差异: 中国华北

早白垩世是华北克拉通减薄的峰期时代^[63], 这个时期产出有岩石圈地幔来源的玄武岩, 为研究晚中生代华北岩石圈地幔的含水性提供了途径, 也为进行中-新生代的对比提供了条件.

Xia 等人^[28]研究了~120 Ma 喷发的岩石圈地幔来源的山东费县玄武岩^[92], 对其中的单斜辉石斑晶进行详细的 H_2O 含量和化学成分的分析, 发现最早结晶的单斜辉石(Mg#在 90 左右)的 H_2O 含量为 210~370 ppm.

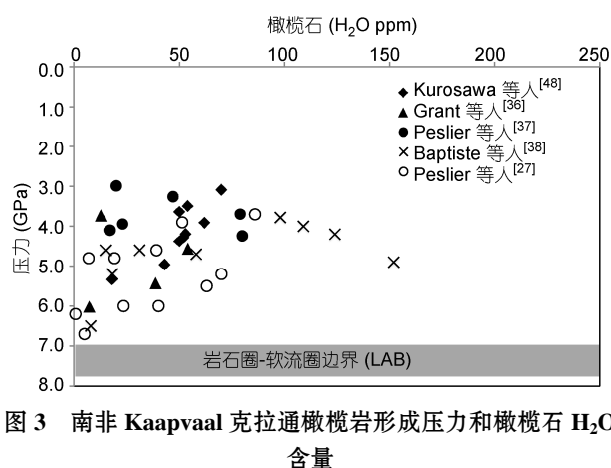


图 3 南非 Kaapvaal 克拉通橄榄岩形成压力和橄榄石 H_2O 含量

根据单斜辉石-玄武质熔体之间 H_2O 的分配系数^[93] 计算出玄武岩浆的 H_2O 含量为 $3.4\text{wt}\% \pm 0.7\text{wt}\%$, 远高于 MORB($0.1\text{wt}\% \sim 0.3\text{wt}\%$)^[64-67]、OIB($0.3\text{wt}\% \sim 1.0\text{wt}\%$)^[65,67-71] 和弧后盆地玄武岩(BABB, $0.2\text{wt}\% \sim 2.0\text{wt}\%$)^[94-96], 落在岛弧岩浆的范围($2.0\text{wt}\% \sim 8.0\text{wt}\%$)之内^[72-75]. 反演出的岩石圈地幔源区的 H_2O 含量为 $>1000 \text{ ppm}$, 远高于华北新生代岩石圈地幔的水含量(图 4). 华北晚中生代岩石圈地幔的强烈富水特征应与古生代以来周边多个海洋板块的多期俯冲脱水有关^[97]. 有趣的是, 晚中生代华北的高水含量对应着克拉通岩石圈的减薄和克拉通破坏, 而新生代的低水含量对应着华北岩石圈再次进入稳定状态.

应该指出的是, 大陆岩石圈地幔中水分布的时空不均一性是多种因素有关的, 包括岩石所经历的部分熔融程度以及交代作用的影响、矿物的晶体化学特征、温度-压力-氧逸度-水逸度的差异等等^[27,91]. 因此, 在考察这种不均一性时, 要配合其他的岩石学(包括岩石成因、岩相学特征和岩石形成的温压条件)和地球化学(包括元素和同位素的组成)数据, 对不同地区进行逐一的具体分析. 在进行大尺度对比时, 还要结合大地构造环境以及地球物理资料, 从宏观上了解区域差异的原因.

3 大陆岩石圈地幔与下地壳中水含量的差异

通过对华北地区安徽女山、河北汉诺坝和山东莒

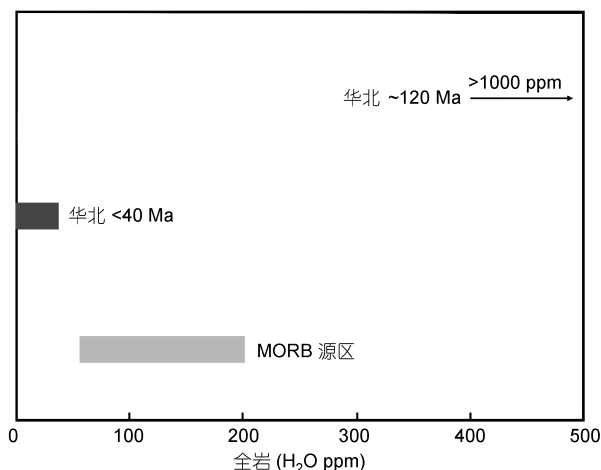


图 4 中国华北中-新生代岩石圈地幔 H_2O 含量的对比图
华北中生代岩石圈地幔数据引自文献[28]; 新生代数据引自文献[28,40,41]; MORB 源区数据引自文献[64-67]

南新生代玄武岩中橄榄岩包体(代表着岩石圈地幔)和基性麻粒岩包体(代表着最下部地壳)的对比研究^[98-100], 发现下地壳与下覆岩石圈地幔的含水性存在明显差异: 下地壳具有高得多的水含量(图 5). 两者之间的差异可能与岩石成因有关: 基性麻粒岩的原岩辉长岩是熔体结晶的, 而橄榄岩则是熔融后的残余, 由于 H_2O 在地幔熔融过程中表现出不相容的特征^[22,35], 因此熔融残余强烈亏损 H_2O ^[98]. 由于水对于矿物/岩石的黏滞度有着显著影响^[1,8,13], 因此, 莫霍面之上和之下岩石圈的强度有着明显的差异^[98]. 当然, 目前的数据还局限在这 3 个地点, 岩石圈地幔和上覆下地壳之间水含量的差异是否是全球大陆地区的普遍现象, 还需要更多的观测.

4 水与大陆稳定性之间的关系

大陆岩石圈稳定与否的关键是岩石圈底部与软流圈之间黏滞度的差异^[57]. 由于水对于矿物流变强度的显著影响^[1,8,13], 大陆稳定性应与水含量密切相关^[25,26]. 岩石圈地幔中的主要矿物是橄榄石, 其强度小于辉石, 因此岩石圈地幔的强度主要受橄榄石控制. 图 6 是根据华北克拉通古生代的地温梯度^[62], 模

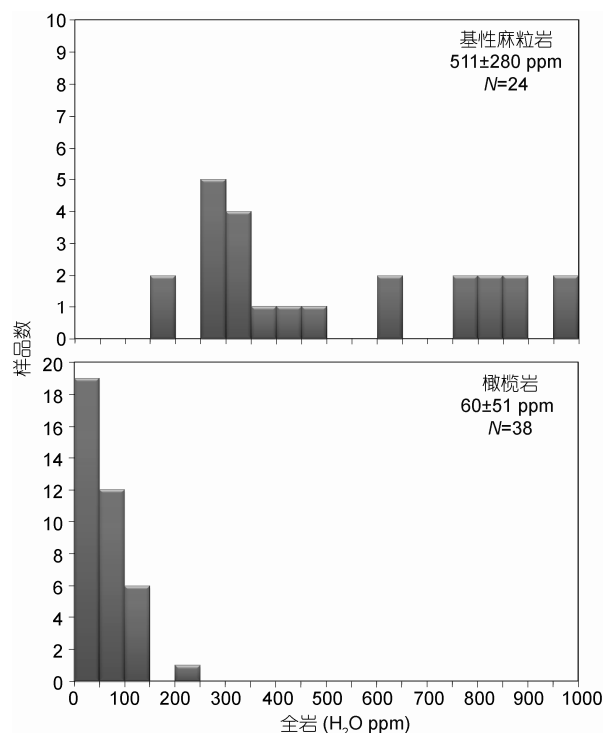


图 5 大陆岩石圈地幔和上覆下地壳之间水含量的对比图
图中的数字为平均值和标准偏差, 数据引自文献[98-100]

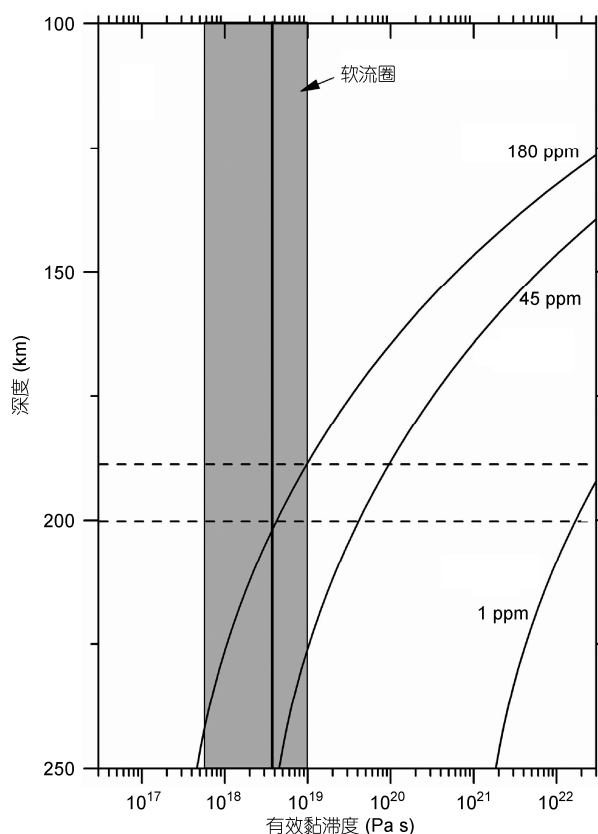


图6 不同橄榄石 H_2O 含量时岩石圈的有效黏滞度

本图修改自文献[28], 图中阴影部分为软流圈黏滞度的范围和平均值, 曲线上的数字是橄榄石的 H_2O 含量

拟计算的不同橄榄石 H_2O 含量时岩石圈黏滞度与深度之间的关系^[28], 可以看出橄榄石的 H_2O 含量明显影响着岩石圈和软流圈界面黏滞度的差异. 近年来根据不同地区岩石圈地幔中橄榄石 H_2O 的含量, 参照研究区地温线而计算的岩石圈黏滞度, 学者们的工作验证了早期关于水与大陆稳定性之间存在联系的猜测^[25,26].

Peslier 等人^[27]用红外光谱分析了来自南非 Kaapvaal 克拉通岩石圈地幔底部橄榄岩中的橄榄石, 发现其 H_2O 含量 < 10 ppm, 据此计算出岩石圈地幔的黏滞度为软流圈的 20~3000 倍(见文献[27]中图 2), 表明长期稳定的克拉通岩石圈底部的高强度的. 这是首次将低水含量与克拉通的长期稳定联系了起来.

Dixon 等人^[19]通过总结文献中地球化学和地球物理数据的信息, 结合构造环境, 指出美国西部由于经历 Farallon 板块长期的俯冲影响而带来的上地幔水化可能是造成该地区低黏滞度的重要原因之一. Li 等

人^[23]则用红外光谱直接分析了美国 Colorado 高原及其周边地区新生代玄武岩中橄榄岩包体矿物的 H_2O 含量, 结果显示这些矿物总体具有比软流圈矿物高得多的 H_2O 含量, 其中 Colorado 橄榄岩中橄榄石的 H_2O 含量高至 45 ppm. 这些橄榄石在上升过程中经历了 H 的扩散丢失, 因此只能作为源区 H_2O 含量的最小估计. 模拟计算结果表明, 即使是用这个最小估计的橄榄石 H_2O 含量, 其水化也能把岩石圈底部的黏滞度降低 1 个数量级(文献[23]中图 9). 由此他们推测, 水化造成的岩石圈弱化可能是 Colorado 岩石圈减薄的重要机制.

将水化与岩石圈减薄(以至于克拉通破坏)直接联系起来的例子是 Xia 等人^[28]对华北早白垩世玄武岩的工作: 山东费县 ~120 Ma 高镁玄武岩的源区是岩石圈地幔, 其 H_2O 含量 > 1000 ppm, 推算其中橄榄石的 H_2O 含量 > 180 ppm. 按照这样的橄榄石 H_2O 含量, 黏滞度计算表明, 中生代时华北岩石圈地幔底部 (~200 km)^[62,63]的黏滞度已经接近于软流圈(图 6). 无论华北克拉通破坏的机制是什么, 岩石圈水化引起的强度显著降低显然是重要的力学前提. 由于 ~120 Ma 是华北克拉通破坏的峰期时段, 因此上述结果就直接将克拉通破坏与其强烈水化导致的强度显著降低联系起来了.

5 展望

经过近 20 年(主要是近 10 年以来)的努力, 在大陆岩石圈含水性领域, 我们已经获得了一些基本的、框架性的认识, 包括水的主要赋存方式、水含量的变化范围、矿物之间水的分配、水含量的时空不均一性、影响含水量因素的复杂性、含水性研究的地球动力学意义等等. 矿物含水性的研究已经从单纯的矿物学和矿物物理学领域渗透到了地质学、地球化学、地球物理和地球动力学的许多方面. Bell 和 Rossman^[31]发表在 *Science* 上论述名义上无水矿物含水性的开创性论文“Water in Earth’s mantle: The role of nominally anhydrous minerals”在过去 10 年(2002~2012 年)的 SCI 引用已达 300 余次; Hirth 和 Kohlstedt^[16]发表在 *Earth and Planetary Science Letters* 上论述矿物含水性对地幔熔融、流变学特征和岩石圈演化的影响的论文“Water in the oceanic upper mantle: Implications for rheology, melt extraction and the evolution of the lithosphere”在过去 10 年(2002~2012 年)的 SCI 引用已

达 560 余次。但是应该清醒地看到,我们在该领域的许多认识还远远不够深入和具体,今后的研究应该着重在以下几个方面。

5.1 积累更多的数据

由前面叙述可以看出,克拉通地幔橄榄岩的数据主要来自南非 Kaapvaal 克拉通, Siberia 克拉通只有些石榴石的数据和零星的橄榄石数据,缺乏辉石数据,其他克拉通目前还没有数据;弧下地幔的数据寥寥无几;非克拉通地区的样品覆盖区域虽然较广泛,但是除了北美西部外,其余地区的样品数目都很少。就单个块体来说,目前只有中国华北的含水性数据在地理上几乎覆盖了全区、在样品数上具有较好的统计意义。岩石圈地幔水含量的垂向不均一分布只有南非 Kaapvaal 克拉通一个例子,时代上的不均一分布只有中国华北晚中生代和新生代的对比。今后要加快积累原始数据,以期在统计学上对大陆岩石圈地幔含水性的时空特征有更具意义的认识。

5.2 探寻影响 H_2O 含量变化的原因

目前我们已经认识到影响岩石圈地幔水含量的因素是复杂的,不仅包括矿物本身的晶体化学特征、不同物理化学条件下矿物中 H_2O 的溶解度、矿物之间 H_2O 的分配系数,还包括岩石形成过程中以及之后的各种地质作用,甚至包括地球的演化。但是不同环境(包括物理化学状态、地质过程、构造环境等)下各种因素的影响程度以及因素与环境之间可能的“亲和性”还没有得到进一步的研究。今后不仅要加强更接近于实际地幔条件的复杂系统的实验观察,研究

天然样品时还要注意 H_2O 与其他数据(包括岩石学、地球化学和地球物理)之间的配套分析,以期对影响 H_2O 含量变化的因素有更明晰的了解。

5.3 深入挖掘 H_2O 作为地质过程示踪剂的潜力

在地幔熔融体系里, H_2O 的分配系数和 Ce 接近^[22,35],可以看作一个不相容元素来处理,因此和其他微量元素(如稀土元素、大离子亲石元素、高场强元素)一样,其含量、与其他元素之间的含量比值以及同位素(H-O)组成也可以用来作为地质过程(如部分熔融、分离结晶、交代作用)的有效示踪剂。但是目前这方面的探索还很少^[101]。

虽然我们目前已经认识到水和大陆稳定性之间是有联系的,但是具体的机制、影响的过程以及时空尺度还不清楚。今后要加强不同构造环境、具有不同物理化学状态的各种类型岩石圈地幔含水性和稳定性及其过程的对比分析,深化水与大陆动力学过程之间相互联系的研究。

5.4 不断完善矿物结构水含量的测定方法

矿物中结构水含量的分析方法除了常用的红外光谱和离子探针外,还有金属还原真空抽取、核反应分析(NRA)、弹性反射检测分析(ERDA)、质子-质子衍射分析(PPSA)等。不同方法给出的结构水含量有时会有差异,这不仅反映了不同方法各自的局限性,也反映了矿物中 H 赋存位置的复杂性(点缺陷、线缺陷、面缺陷、纳米级包裹体等)。完善各种测定方法、根据不同赋存方式的 H 选择合适的方法仍是今后应加强的内容。

致谢 感谢郑永飞院士和郭正堂研究员的约稿以及评审人细致的审阅。

参考文献

- 1 Mackwell S J, Kohlstedt D L, Paterson M S. The role of water in the deformation of olivine single-crystals. *J Geophys Res*, 1985, 90: 1319–1333
- 2 Karato S, Paterson M S, FitzGerald J D. Rheology of synthetic olivine aggregates: influence of grain size and water. *J Geophys Res*, 1986, 91: 8151–8176
- 3 Karato S. The role of hydrogen in the electrical conductivity of the upper mantle. *Nature*, 1990, 347: 272–273
- 4 Graham C M, Elphick S C. Some experimental constraints on the role of hydrogen in oxygen and hydrogen diffusion and Al-Si interdiffusion in silicates. In: Ganguly J, ed. *Diffusion, Atomic Ordering, and Mass Transport*. New York: Springer, 1991. 248–285
- 5 Meade C, Jeanloz R. Deep-focus earthquakes and recycling of water into the Earth's mantle. *Science*, 1991, 252: 68–72

- 6 Inoue T. Effect of water on melting phase relations and melt composition in the system $\text{Mg}_2\text{SiO}_4\text{-MgSiO}_3\text{-H}_2\text{O}$ up to 15 GPa. *Phys Earth Planet Inter*, 1994, 85: 237–263
- 7 Hirose K. Melting experiments on lherzolite KLB-1 under hydrous conditions and generation of high-magnesian andesitic melts. *Geology*, 1997, 25: 42–44
- 8 Mei S, Kohlstedt D L. Influence of water on plastic deformation of olivine aggregates 2. Dislocation creep regime. *J Geophys Res*, 2000, 105: 21471–21481
- 9 Jung H, Karato S. Water-induced fabric transitions in olivine. *Science*, 2001, 293: 1460–1463
- 10 Hofmeister A M. Enhancement of radiative transfer in the upper mantle by OH^- in minerals. *Phys Earth Planet Inter*, 2004, 146: 483–495
- 11 Wang Z, Hiraga T, Kohlstedt D L. Effect of H^+ on Fe-Mg interdiffusion in olivine, $(\text{Fe, Mg})_2\text{SiO}_4$. *Appl Phys Lett*, 2004, 85: 209–211
- 12 Hier-Majumder S, Anderson I M, Kohlstedt D L. Influence of protons on Fe-Mg interdiffusion in olivine. *J Geophys Res*, 2005, 110: B02202
- 13 Karato S. Rheology of the deep upper mantle and its implications for the preservation of the continental roots: A review. *Tectonophysics*, 2010, 481: 82–98
- 14 Gaetani G A, Grove T L, Bryan W B. The influence of water on the petrogenesis of subduction related igneous rocks. *Nature*, 1993, 365: 332–334
- 15 Hirose K, Kawamoto T. Hydrous partial melting of lherzolite at 1 GPa: the effect of H_2O on the genesis of basaltic magmas. *Earth Planet Sci Lett*, 1995, 133: 463–473
- 16 Hirth G, Kohlstedt D L. Water in the oceanic upper mantle: implications for rheology, melt extraction and the evolution of the lithosphere. *Earth Planet Sci Lett*, 1996, 144: 93–108
- 17 Gaetani G A, Grove T L. The influence of water on melting of mantle peridotite. *Contrib Mineral Petrol*, 1998, 131: 323–346
- 18 Asimow P D, Langmuir C H. The important of water to oceanic mantle melting regimes. *Nature*, 2003, 421: 815–820
- 19 Dixon J E, Dixon T H, Bell D R, et al. Lateral variation in upper mantle viscosity: role of water. *Earth Planet Sci Lett*, 2004, 222: 451–467
- 20 Hirschmann M M, Aubaud C, Withers A C. Storage capacity of H_2O in nominally anhydrous minerals in the upper mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 236: 167–181
- 21 Hirschmann M M, Tenner T, Aubaud C, et al. Dehydration melting of nominally anhydrous mantle: The primacy of partitioning. *Phys Earth Planet Inter*, 2009, 176: 54–68
- 22 Hauri E H, Gaetani G A, Green T H. Partitioning of water during melting of the Earth's upper mantle at H_2O -undersaturated conditions. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 248: 715–734
- 23 Li Z X A, Lee C T, Peslier A H, et al. Water contents in mantle xenoliths from the Colorado Plateau and vicinity: Implications for the mantle rheology and hydration-induced thinning of continental lithosphere. *J Geophys Res*, 2008, 113: B9, doi: B0921010.1029/2007jb005540
- 24 Grove T L, Till C B, Krawczynski M J. The role of H_2O in subduction zone magmatism. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2012, 40: 413–439
- 25 Jordan T H. Composition and development of continental tectosphere. *Nature*, 1978, 274: 544–548
- 26 Pollack H N. Cratonization and thermal evolution of the mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 1986, 80: 175–182
- 27 Peslier A H, Woodland A B, Bell D R, et al. Olivine water contents in the continental lithosphere and the longevity of cratons. *Nature*, 2010, 467: 78–81
- 28 Xia Q K, Liu J, Liu S C, et al. High water content in Mesozoic primitive basalts of the North China Craton and implications for the destruction of cratonic mantle lithosphere. *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 361: 85–97
- 29 Frezzotti M L, Ferrando S, Tecce F, et al. Water content and nature of solutes in shallow-mantle fluids from fluid inclusions. *Earth Planet Sci Lett*, 2012, 351–352: 70–83
- 30 Hawkesworth C, Rogers N, van Calsteren P, et al. Mantle enrichment processes and the origin of basalts. In: Menzies M A, ed. *Mantle Metasomatism*. London: Academic Press, 1987. 365–388
- 31 Bell D R, Rossman G R. Water in Earth's mantle: The role of nominally anhydrous minerals. *Science*, 1992, 255: 1391–1397
- 32 Ingrin J, Skogby H. Hydrogen in nominally anhydrous upper-mantle minerals: Concentration levels and implications. *Eur J Mineral*, 2000, 12: 543–570
- 33 Bell D R, Ihinger P D, Rossman G R. Quantitative analysis of trace OH in garnet and pyroxenes. *Am Mineral*, 1995, 80: 465–474
- 34 Bell D R, Rossman G R, Maldener J, et al. Hydroxide in olivine: A quantitative determination of the absolute amount and calibration of the IR spectrum. *J Geophys Res*, 2003, 108: 2105
- 35 Green D H, Hibberson W O, Kovács I, et al. Water and its influence on the lithosphere-asthenosphere boundary. *Nature*, 2010, 467: 448–451

- 36 Grant K, Ingrin J, Lorand J P, et al. Water partitioning between mantle minerals from peridotite xenoliths. *Contrib Mineral Petrol*, 2007, 154: 15–34
- 37 Peslier A H, Woodland A B, Wolff J A. Fast kimberlite ascent rates estimated from hydrogen diffusion profiles in xenolithic olivines from Southern Africa. *Geochim Cosmochim Acta*, 2008, 72: 2711–2722
- 38 Baptiste V, Tommasi A, Demouchy S. Deformation and hydration of the lithospheric mantle beneath the Kaapvaal Craton, South Africa. *Lithos*, 2012, 149: 31–50
- 39 Peslier A H, Luhr J F, Post J. Low water contents in pyroxenes from spinel-peridotites of the oxidized, sub-arc mantle wedge. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 201: 69–86
- 40 Xia Q K, Hao Y T, Li P, et al. Low water content of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the eastern part of the North China Craton. *J Geophys Res*, 2010, 115: B07207, doi: 10.1029/2009JB006694
- 41 Hao Y T, Xia Q K, Zhang Y P, et al. Recognizing juvenile and relict lithospheric mantle beneath the North China Craton: Combined analysis of H₂O, major and trace elements and Sr-Nd isotope compositions of clinopyroxenes. *Lithos*, 2012, 149: 136–145
- 42 Demouchy S, Jacobsen S D, Gaillard F, et al. Rapid magma ascent recorded by water diffusion profiles in mantle olivine. *Geology*, 2006, 34: 429–432
- 43 Peslier A H, Luhr J F. Hydrogen loss from olivines in mantle xenoliths from Simcoe (USA) and Mexico: Mafic alkalic magma ascent rates and water budget of the sub-continental lithosphere. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 242: 302–319
- 44 Xia Q K, Hao Y T, Liu S C, et al. Water contents of the Cenozoic lithospheric mantle beneath the western part of the North China Craton: Peridotite xenolith constraints. *Gondwana Res*, 2013, 23: 108–118
- 45 Aubaud C, Withers A C, Hirschmann M M, et al. Intercalibration of FTIR and SIMS for hydrogen measurements in glasses and nominally anhydrous minerals. *Am Mineral*, 2007, 92: 811–828
- 46 Tenner T J, Hirschmann M M, Withers A C, et al. Hydrogen partitioning between nominally anhydrous upper mantle minerals and melt between 3 and 5 GPa and applications to hydrous peridotite partial melting. *Chem Geol*, 2009, 262: 42–56
- 47 Bell D R, Rossman G R. The distribution of hydroxyl in garnets from the subcontinental mantle in southern Africa. *Contrib Mineral Petrol*, 1992, 111: 161–178
- 48 Kurosawa M, Yurimoto H, Sueno S. Patterns in the hydrogen and trace element compositions of mantle olivines. *Phys Chem Miner*, 1997, 24: 385–395
- 49 Kent A J R, Rossman G R. Hydrogen, lithium, and boron in mantle-derived olivine: The role of coupled substitutions. *Am Mineral*, 2002, 87: 1432–1436
- 50 Matsyuk S S, Langer K, Hosch A. Hydroxyl defects in garnets from mantle xenoliths in kimberlites of the Siberian platform. *Contrib Mineral Petrol*, 1998, 132: 163–179
- 51 Matsyuk S S, Langer K. Hydroxyl in olivines from mantle xenoliths in kimberlites of the Siberian platform. *Contrib Mineral Petrol*, 2004, 147: 413–437
- 52 Skogby H, Bell D R, Rossman G R. Hydroxide in pyroxene: Variations in the natural-environment. *Am Mineral*, 1990, 75: 764–774
- 53 Mosenfelder J L, Sharp T G, Asimow P D, et al. Hydrogen incorporation in natural mantle olivines. In: Jacobsen S, Lee S, eds. *Earth's Deep Water Cycle*. Washington DC: AGU Monograph, 2006, 71: 1527–1541
- 54 Bonadiman C, Hao Y, Coltorti M, et al. Water contents of pyroxenes in intraplate lithospheric mantle. *Eur J Mineral*, 2009, 21: 637–647
- 55 Carlson R W, Pearson D G, James D E. Physical, chemical, and chronological characteristics of continental mantle. *Rev Geophys*, 2005, 43: 24
- 56 Fan Q C, Hooper P R. The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of Eastern China—Implications for upper mantle composition and paleogeotherms. *J Petrol*, 1989, 30: 1117–1158
- 57 Lee C T, Luggi P, Chin E J. Building and destroying continental mantle. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2011, 39: 59–90
- 58 Smith D. Insights into the evolution of the uppermost continental mantle from xenolith localities on and near the Colorado Plateau and regional comparisons. *J Geophys Res*, 2000, 105: 16769–16781
- 59 Lee C T, Yin Q, Rudnick R L, et al. Preservation of ancient and fertile lithospheric mantle beneath the southwestern United States. *Nature*, 2001, 411: 69–73
- 60 Humphreys E D, Hessler E, Dueker K G, et al. How Laramide-age hydration of North American lithosphere by the Farallon slab controlled subsequent activity in the western United States. *Int Geol Rev*, 2003, 45: 575–595
- 61 West M, Ni J, Baldrige W S, et al. Crust and upper mantle shear wave structure of the southwest United States: Implications for rifting and support for high elevation. *J Geophys Res*, 2004, 109: B03309, doi: 10.1026/2003JB002575
- 62 Griffin W L, Zhang A, O'Reilly S Y, et al. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton. In: Flower M F J, Chung S L, Lo C H, et al, eds. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. Washington DC: AGU, 1998, 27: 107–126

- 63 Menzies M A, Xu Y G, Zhang H F, et al. Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China Craton. *Lithos*, 2007, 96: 1–21
- 64 Michael P J. The concentration, behavior and storage of H₂O in the suboceanic upper mantle: Implications for mantle metasomatism. *Geochim Cosmochim Acta*, 1988, 52: 555–566
- 65 Sobolev A V, Chaussidon M. H₂O concentrations in primary melts from supra-subduction zones and mid-ocean ridges: Implications for H₂O storage and recycling in the mantle. *Earth Planet Sci Lett*, 1996, 137: 45–55
- 66 Saal A E, Hauri E H, Langmuir C H, et al. Vapor undersaturation in primitive mid-ocean-ridge basalt and the volatile content of Earth's upper mantle. *Nature*, 2002, 419: 451–455
- 67 Simons K, Dixon J, Schilling J G, et al. Volatiles in basaltic glasses from the Easter-Salas y Gomez Seamount Chain and Easter Microplate: Implications for geochemical cycling of volatile elements. *Geochem Geophys Geosyst*, 2002, 3: 1039, doi: 10.1029/2001GC000173
- 68 Dixon J E, Clague D A, Wallace P, et al. Volatiles in alkalic basalts from the North Arch Volcanic Field, Hawaii: Extensive degassing of deep submarine-erupted alkalic series lavas. *J Petrol*, 1997, 38: 911–939
- 69 Wallace P J. Water and partial melting in mantle plumes: Inferences from the dissolved H₂O concentrations of Hawaiian basaltic magmas. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 3639–3642
- 70 Nichols A R L, Carroll M R, Höskuldsson Á. Is the Iceland hot spot also wet? Evidence from the water contents of undegassed submarine and subglacial pillow basalts. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 202: 77–87
- 71 Dixon J E, Clague D A. Volatiles in basaltic glasses from Loihi Seamount, Hawaii: Evidence for a relatively dry plume component. *J Petrol*, 2001, 42: 627–634
- 72 Sisson T W, Grove T L. Temperature and H₂O contents of low-MgO high-alumina basalts. *Contrib Mineral Petrol*, 1993, 113: 167–184
- 73 Sisson T W, Layne G D. H₂O in basalt and basaltic andesite glass inclusions from four subduction-related volcanoes. *Earth Planet Sci Lett*, 1993, 117: 619–635
- 74 Dobson P F, Skogby H, Rossman G R. Water in boninite glass and coexisting orthopyroxene: Concentration and partitioning. *Contrib Mineral Petrol*, 1995, 118: 414–419
- 75 Wallace P J. Volatiles in subduction zone magmas: concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic gas data. *J Volcanol Geotherm Res*, 2005, 140: 217–240
- 76 Yu Y, Xu X, Griffin W L, et al. H₂O contents and their modification in the Cenozoic subcontinental lithospheric mantle beneath the Cathaysia block, SE China. *Lithos*, 2011, 126: 182–197
- 77 Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. A xenolith-derived geotherm and the crust/mantle boundary at Qilin, southeastern China. *Lithos*, 1996, 38: 41–62
- 78 Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Genesis of young lithospheric mantle in SE China. *J Petrol*, 2000, 41: 111–148
- 79 Xu X S, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Enrichment of upper mantle peridotite: Petrological, trace element and isotopic evidence in xenoliths from SE China. *Chem Geol*, 2003, 198: 163–188
- 80 Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong Peninsula, Sino-Korea craton, eastern China. *Inter Geol Rev*, 1998, 40: 471–499
- 81 Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Relict refractory mantle beneath the eastern North China Block: Significance for lithospheric evolution. *Lithos*, 2001, 57: 43–66
- 82 Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Mineral chemistry of peridotites from Paleozoic, Mesozoic and Cenozoic lithosphere: Constraints on mantle evolution beneath Eastern China. *J Petrol*, 2006, 47: 2233–2256
- 83 Fan W M, Zhang H F, Baker J, et al. On and off the North China Craton: Where is the Archean keel? *J Petrol*, 2000, 41: 933–950
- 84 Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re-Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198: 307–322
- 85 Rudnick R L, Gao S, Ling W L, et al. Petrology and geochemistry of spinel peridotite xenoliths from Hannuoba and Qixia, North China Craton. *Lithos*, 2004, 77: 609–637
- 86 Reisberg L, Zhi X C, Lorange J P, et al. Re-Os and S systematics of spinel peridotite xenoliths from east central China: Evidence for contrasting effects of melt percolation. *Earth Planet Sci Lett*, 2005, 239: 286–308
- 87 Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, et al. The chemical-temporal evolution of lithospheric mantle underlying the North China Craton. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70: 5013–5034
- 88 Ying J F, Zhang H F, Kita N, et al. Nature and evolution of Late Cretaceous lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton: Constraints from petrology and geochemistry of peridotitic xenoliths from Junan, Shandong Province, China. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 244: 622–638
- 89 Xu Y G, Blusztajn J, Ma J L, et al. Late Archean to Early Proterozoic lithospheric mantle beneath the western North China Craton: Sr-Nd-Os isotopes of peridotite xenoliths from Yangyan and Fansi. *Lithos*, 2008, 102: 25–42

- 90 Zhang H F, Goldstein S L, Zhou X H, et al. Comprehensive refertilization of lithospheric mantle beneath the North China Craton: Further Os-Sr-Nd isotopic constraints. *J Geol Soc*, 2009, 166: 249–259
- 91 Peslier A H, Woodland A B, Bell D R, et al. Metasomatic control of water contents in the Kaapvaal cratonic mantle. *Geochim Cosmochim Acta*, 2012, 97: 213–246
- 92 Gao S, Rudnick R L, Xu W L, et al. Recycling deep cratonic lithosphere and generation of intraplate magmatism in the North China Craton. *Earth Planet Sci Lett*, 2008, 270: 41–53
- 93 O’Leary J A, Gaetani G A, Hauri E H. The effect of tetrahedral Al^{3+} on the partitioning of water between clinopyroxene and silicate melt. *Earth Planet Sci Lett*, 2010, 297: 111–120
- 94 Hochstaedter A G, Gill J B, Kusakabe M, et al. Volcanism in the Sumisu Rift, I. Major element, volatile, and stable isotope geochemistry, the Mariana Trough. *Earth Planet Sci Lett*, 1990, 100: 179–194
- 95 Danyushevsky L V, Falloon T J, Sobolev A V, et al. The H_2O content of basalt glasses from southwest Pacific backarc basins. *Earth Planet Sci Lett*, 1993, 117: 347–362
- 96 Stolper E, Newman S. The role of water in the petrogenesis of Mariana trough magmas. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 121: 293–325
- 97 Windley B F, Maruyama S, Xiao W J. Delamination/thinning of sub-continental lithospheric mantle under Eastern China: The role of water and multiple subduction. *Am J Sci*, 2010, 310: 1250–1293
- 98 Yang X Z, Xia Q K, Deloule E, et al. Water in minerals of the continental lithospheric mantle and overlying lower crust: A comparative study of peridotite and granulite xenoliths from the North China Craton. *Chem Geol*, 2008, 256: 33–45
- 99 Yang X Z, Deloule E, Xia Q K, et al. Water contrast between Precambrian and Phanerozoic continental lower crust in eastern China. *J Geophys Res*, 2008, 113: B08207, doi: 10.1029/2007JB005541
- 100 杨贵才, 杨晓志, 郝艳涛, 等. 大陆下地壳和岩石圈地幔含水性的差异——山东莒南玄武岩中深源包体的初步观察. *岩石矿物学杂志*, 2012, 5: 691–700
- 101 Dixon J E, Leist L, Langmuir C, et al. Recycled dehydrated lithosphere observed in plume-influenced mid-ocean-ridge basalt. *Nature*, 2002, 420: 385–389