

俯冲洋壳的命运与启示：以西藏榴辉岩为例

刘焰

地科院地质所, 北京, 100037

俯冲洋壳的研究至少已持续四十余年了, 取得了大量的研究成果, 极大地深化了人们对地球本身的认识程度。例如, 人们已认识到俯冲洋壳在俯冲通道内将发生含水矿物脱水, 脱水之后的残余洋壳将相变为含水较少的榴辉岩。在俯冲通道内新生成的流体将诱发上覆地幔楔的部分熔融, 形成岛弧岩浆 (例如, Ernst et al., 1997; Kelley and Cottrell, 2009)。尽管俯冲洋壳的研究历史非常悠久, 仍然还有许多事关人类生存与可持续发展的关键科学问题却长期模糊不清, 至今仍吸引人们为之不懈地努力。其中一个关键科学问题是: 碳、硫等相对较轻的元素能否从俯冲洋壳中释放出来? 如果这些元素能从俯冲洋壳中释放出来, 控制它们释放的机理是什么? 它们又是以何种方式进入上覆地幔楔? 它们对岛弧岩浆的形成与火山喷发到底有何影响?

实验岩石学研究 (例如, Dasgupta et al., 2004; Thomsen and Schmidt, 2008) 与热力学数值模拟研究 (Connolly, 2005) 表明, 随洋壳俯冲的沉积碳酸盐岩在 100 公里深度范围内很难发生脱碳作用, 主要原因是洋壳俯冲时的温度还太低, 不足以让碳酸盐矿物发生热分解、发生部分熔融等作用。那么岛弧火山中大量的 CO_2 (例如, Fischer, 2008; Butterfield et al., 2011; Resing et al., 2011) 又来自何方? 值得特别关注的是硫元素。1815 年人类历史上有记载的最大一次火山喷发: Tambora 火山喷发, 当时就造成了重大人员伤亡。在短短 24 小时之内, Tambora 火山还将巨量的含硫气溶胶释放到大气圈之中, 直接导致了 1816 年的“全球变冷”, 这就是历史上著名的“无夏之年”, 中国人用“六月飞雪”这个成语来描述它。大批农作物因超低温冻害而绝收, 随后数年内全球范围的饥荒蔓延。人们已饱尝了 Tambora 火山大喷发所带来的苦果。现在已经认识

到印度洋洋壳北向俯冲于亚洲板块之下诱发了 Tambora 火山的大喷发 (例如, Stothers, 1984)。然而, 至今也不清楚, 为何 Tambora 火山能将巨量的含硫气溶胶排放到大气圈中, 巨量的硫又是来自何方? 今后是否还有类似 Tambora 式的火山再次喷发? 这些问题是人类生存与可持续发展必须面对的关键科学问题, 但却是长期以来还没有得到深入认识的科学问题。这些科学问题, 就是“俯冲洋壳命运”研究瞄准的科学问题。

众所周知, 在大洋中脊, 由地幔发生部分熔融作用之后所形成的新生高温洋壳, 在海底扩张阶段, 不可避免地持续遭受水化与氧化等作用, 导致地球表面的水和氧气进入新生洋壳, 将其变成氧化、水化的冷洋壳, 在海沟等汇聚边缘地区, 氧化水化的冷洋壳再俯冲下去, 随后发生了脱水以及再次发生部分熔融等作用, 来源于地表附近的物质再循环进入地球深部, 即洋壳俯冲过程充分展现了地球内部与地表之间物质的交换。现在已认识到青藏高原是古、新特提斯洋相继闭合, 印度陆块持续北向与亚洲陆块汇聚之产物, 因此青藏高原内部保存有非常丰富的古洋壳俯冲与消亡的记录, 是开展俯冲洋壳命运研究的天然实验室。

目前在藏北羌塘和藏南松多一带发现了榴辉岩, 系古特提斯洋壳俯冲之产物 (例如, 杨经绥等, 2006; 李才等, 2006; Zhang, et al., 2006), 因此可用它们示踪俯冲洋壳的变质演化过程。在这些榴辉岩周边, 广泛发育大量以碳酸盐脉为主的各类脉体。精细的岩相学观察发现这些榴辉岩经历了三期变质事件。第一期变质组合以含三价铁矿物, 如霓辉石、绿帘石、磁铁矿等矿物、硫酸盐, 如石膏等矿物为主, 石榴石成分以富钙、贫镁和铁为特征。第二期变质矿物组合中石榴石成分转变为以富镁、贫钙为特征, 出现绿辉石, 绿帘石中三价铁含量下降。在第三变质阶段, 早期三价铁矿物, 如霓辉石、绿帘石、磁铁矿等矿物消失, 代之以新生的富铁贫

镁、贫钙的石榴石、阳起石、黄铁矿和方解石等矿物。岩相学观察充分反映西藏榴辉岩经历了非常强烈的氧化-还原反应,绿帘石等含三价铁和水矿物在脱水时被还原,形成新生富铁石榴石。热力学计算表明,第一阶段变质温、压及氧逸度分别为: $T = 590^{\circ}\text{C}$, $P = 2.48\text{GPa}$, $f_{\text{O}_2} = -13.0$; 第二阶段, $T = 625^{\circ}\text{C}$, $P = 2.25\text{GPa}$, $f_{\text{O}_2} = -14.5$; 第三阶段, $T = 620^{\circ}\text{C}$, $P = 2.15\text{GPa}$, $f_{\text{O}_2} = -20.5$ 。从第一阶段至第三阶段,岩石首先经历一个升温、降压过程,再经历近等温降压,

再降温的过程。在此过程中,氧逸度值快速下降,反映岩石经历了一个强还原过程。在此过程中,早期的三价铁、六价硫等物质分别还原为二价铁与负二价硫,并同时生成了以水、 CO_2 和 H_2S 为主的流体。该流体进入上覆地幔楔,可诱发岛弧火山喷发,水、碳与硫等元素再次进入地球表层。氧化还原反应控制了碳、硫等元素在地球内、外之间的交换过程。