



范式革命: 玄武岩记录有喷发时岩石圈厚度的信息, 没有地幔潜在温度的记忆

牛耀龄^{1,2}

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. Department of Earth Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK

E-mail: yaoling.niu@durham.ac.uk

A paradigm change: Basalts have no memory of mantle potential temperature, but record the lithosphere thickness at the time of eruption

Yaoling Niu^{1,2}

¹ School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

² Department of Earth Sciences, Durham University, Durham DH1 3LE, UK

E-mail: yaoling.niu@durham.ac.uk

doi: [10.1360/TB-2021-0920](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0920)

玄武岩是地球上最丰富的岩浆岩, 人们通过对玄武岩的岩石学和地球化学研究来推演地幔的热结构和地幔元素及同位素组成, 并探讨局部和整个地球的化学分异过程。在20世纪60年代以前人们还不清楚地幔是由橄榄岩组成的, 其部分熔融产生玄武岩岩浆。我们今天对地幔及地幔熔融的认识要归功于实验岩石学研究^[1-5]。然而, 有关地幔部分熔融的机制一直有争议, 直到20世纪70年代“减压熔融”才逐渐被接受^[6,7]。关于减压熔融的概念早在20世纪50年代就有人提出^[8], 并通过对天然玄武岩与实验室地幔橄榄岩熔体的比较得到了肯定和发展^[2]。这些早期的实验岩石学研究为我们当今对玄武岩成因的研究奠定了坚实的基础(包括相平衡, 橄榄岩成分、压力和温度条件以及挥发组分对玄武岩成因和成分的影响), 但尚未发展成为与板块运行机制直接相关联的范式模型(paradigm), 因为实验岩石学家和岩石学界在近30年的时间里把重点放在了“原生岩浆”性质的激烈争论^[9]。

实验岩石学的继续和对全球大洋中脊玄武岩(mid-ocean ridge basalts, MORB)的广泛采样与研究为MORB成因研究带来了新的认识, 最终在20世纪80年代形成了一个理论模型, 即地幔潜在温度(T_{MP})的变化控制了洋中脊地幔熔融的深度(压力)、部分熔融的程度和玄武岩的成分^[10,11]。该模型认为, 高温上涌地幔开始熔融深度大, 减压部分熔融程度高, 产生较厚的洋壳和较浅的洋脊水深, MORB成分具有高压熔融和

高部分熔融程度的信息。而低温上涌地幔的情形相反, 开始熔融深度浅, 减压部分熔融程度低, 产生较薄的洋壳和较深的洋脊水深, MORB成分有低压熔融和低部分熔融程度的特点。这些观点被广泛采纳, 并用来解释大洋和大陆环境中的板内玄武岩岩浆作用。另一方面, 自20世纪80年代初, 与俯冲带有关玄武岩岩浆的产生被普遍认为是俯冲板块脱水引起地幔楔熔融的结果。但近年来的研究也强烈主张地幔楔温度是控制岛、陆弧岩浆作用和地幔楔熔融程度的主要控制因素^[12]。所有这些观点, 由于被广泛接受, 构成了地幔熔融和玄武岩岩浆作用的范式模型(paradigm)。

在自己30年的MORB研究中, 出于好奇, 我力图去理解这一范式模型(paradigm)的方方面面, 发现该模型存在几个关键问题^[9-17]。结合实验岩石学资料和相平衡原理, 我对全球MORB数据和深海橄榄岩(MORB熔融残余)数据进行了全面、严谨的分析, 发现洋脊下热传导边界层(conductive thermal boundary layer, CTBL)的厚度控制着洋脊地幔熔融程度和MORB成分, 亦即岩石圈厚度的盖层效应(lithospheric lid effect), 而不是范式模型“地幔潜在温度的控制”。我与合作者对全球玄武岩的研究发现, 在全球各种构造环境中, 地幔熔融程度(F)、熔体提取深度(P_F)和玄武岩成分均展示强烈的盖层效应。亦即, 岩石圈厚度不仅控制MORB地幔熔融, 也决定板内洋岛玄武岩(OIB)、与俯冲有关的火山弧玄武岩

(VAB)和大陆内部玄武岩(CIB)的地幔熔融.

1 MORB地幔熔融范式模型的三大关键问题

(1) 问题一. 地幔减压熔融一直持续到莫霍面, 这忽视了地幔顶部热传导边界层的存在和重要影响. 从理论上讲, 高温上涌地幔与固相线相交(在 P_0 处)并开始熔融较深(图1(a)), 而低温上涌地幔与固相线相交并开始熔融较浅(图1(b)), 但范式模型中上涌地幔减压熔融持续到地表或莫霍面深度在概念上不正确, 而且实际上也不可能(图1(a), (b)). 因为地幔传热损失到海底, 形成热传导边界层(CTBL)是不可避免的(图1(c), (d)和2). CTBL的厚度, 特别是其底部的深度, 决定了减压熔融停止的深度(在 P_F 处), 是热的软流圈绝热上升与海底热损失之间热平衡的结果, 最终取决于软流圈地幔绝热上升的速度和幅度. 板块分离导致洋脊下软流圈地幔绝热上升并发生减压熔融(图2). 快速扩张洋脊下软流圈地幔上涌快, 致使绝热梯度(Adiabat)延伸到浅处, 导致较薄的CTBL(较浅的 P_F)、较大的减压熔融区间(P_0-P_F)和较高程度的部分熔融($H \propto P_0-P_F$, 图1(c)). 相比之下, 慢速扩张洋脊下软流圈地幔上涌慢, 由于海底热损失的缘故, 限制了绝热梯度(Adiabat)延伸到更浅部位, 导致较厚的CTBL(较深的 P_F)、较小的减压熔融区间(P_0-P_F)和较低程度的部分熔融($H \propto P_0-P_F$, 图1(d)). 全球MORB(以及MORB熔融残余“深海橄榄岩”)成分与洋脊扩张速度的相关关系证明了这一理论认识, 即地幔熔融程度随着扩张速度的增加而增加^[13]. 同样地, 主量元素相对富集的地幔因构成高密度的地幔矿物组合, 导致深水洋脊, 而主量元素相对亏损的地幔构成低密度和高浮力的地幔矿物组合, 导致浅水洋脊. 深脊下高密度的软流圈地幔被动上涌迟

缓, 且上涌的幅度有限, 允许传热损失延伸到更深处(深的 P_F), 较小的熔融区间和较低的部分熔融程度($H \propto P_0-P_F$, 图1(d)). 而浅脊下低密度、高浮力的软流圈地幔绝热上升幅度较大, 绝热地幔梯度延伸到更浅处(浅的 P_F), 较大的熔融区间和较高的部分熔融程度($H \propto P_0-P_F$, 图1(c)). MORB(及深海橄榄岩)与洋脊水深的系统变化有效证明了这一认识^[15-17]. 亦即, CTBL的底部深度(P_F)决定了洋脊地幔部分熔融程度和玄武岩组成, 这就是岩石圈厚度“盖层效应”的概念^[18].

(2) 问题二. 用于计算地幔初始熔融深度(P_0)的岩石学参数 Fe_8 没有岩石学意义. 实验岩石学^[19]表明, 地幔熔体中的FeO和MgO均随着熔融压力的增加而增加, 但地幔Mg#($=100 \times Mg/(Mg+Fe) \geq 72$)的变化有限, 受橄榄石 $Fe_0(=100 \times Mg/(Mg+Fe) \geq 90$ 或 Fe_{90})的相平衡制约. Klein和Langmuir^[10]选定了一个MORB参数 Fe_8 (修正到MgO=8%时的 $FeO\%$ 值), 用公式 $P_0=6.11Fe_8-34.5$ (kbar)和 $T_0=1150+13P_0(^{\circ}C)$ 来计算 P_0 与 T_0 ^[20], 从而算出 $T_{MP}=T_0-1.8 \times P_0(^{\circ}C)$. 这些可计算的 P_0 、 T_0 和 T_{MP} 值意味着全球洋脊地幔有250 K的温度变化, 是“地幔潜在温度控制”范式模型的基础. 但所有这些计算值均基于岩石学上无效的单一参数 Fe_8 . 全球MORB Fe_8 的变化范围为6.5~11.5, 对应于不同程度高度演化的MORB熔体Mg#=68~56, 这无法与地幔橄榄石($Fe \geq 90$, Fe_{90})平衡的MORB熔体(Mg# ≥ 72)比较, 所以用MORB Fe_8 讨论地幔熔融条件相当于用高度演化的MORB熔体(Mg#=68~56)讨论地幔熔融条件, 违反基本的岩石学原理^[15]. 因此, 用 Fe_8 计算的 P_0 、 T_0 和 T_{MP} 没有任何意义. 为了维护参数 Fe_8 , Gale等人^[21]重新校正了MORB数据以显示 $Fe_8=Fe_{90}$ (MORB熔体与地幔橄榄石 Fe_{90} 平衡). 但 $Fe_8=Fe_{90}$ 是不正确的, 逻辑上讲不通, 岩石学中不可能, 自然界也不可能有任何熔体(样品)同时有两个和更多的Mg#.

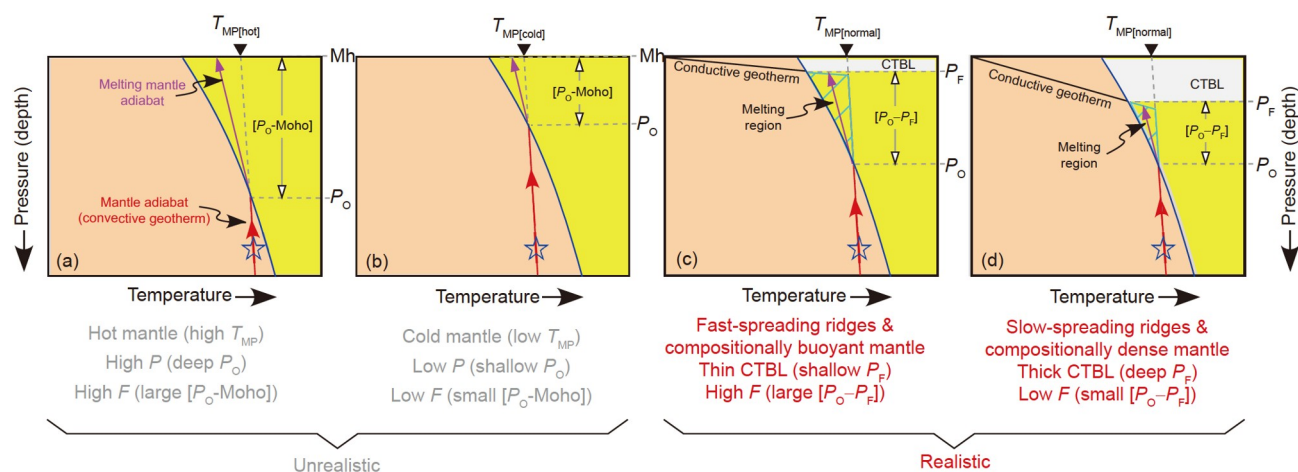


图1 在压力-温度(P - T)坐标中示意地幔绝热上升和减压熔融. (a), (b) 范式模型认为减压熔融一直持续到莫霍面(Moho或Mh); (c), (d) 减压熔融受CTBL的限制在不同深度终止

Figure 1 Decompression melting of adiabatically rising mantle in P - T space. (a), (b) Decompression melting continuing all the way to the Moho (Mh) is assumed in the paradigm; (c), (d) decompression melting is capped by the conductive thermal boundary layer (CTBL) atop the mantle beneath ocean ridges

亦即,自然界没有 $Mg\#=72$ 的任何熔体(如果用 Fe_{90} 表达),同时也会有其他 $Mg\#$ 值(亦即 $Mg\#=68\sim 56$ 之间的任何 $Mg\#$ 值;如果用 Fe_8 表达;见文献[16]中图3的论证)。因此,基于MORB Fe_8 (或 Fe_{90} 等任何其他形式)得出的全球洋脊 T_{MP} 变化(高达 $\Delta T_{MP}=250\text{ K}$)控制地幔熔融程度和压力的结论没有岩石学基础,只是基于错误概念演绎出来而没有实际意义的一些数字。

当MORB校正到 $Mg\#=72$ 时(与地幔橄榄石 Fe_{90} 平衡),太平洋MORB的 Fe_{72} 值与其他主量元素含量、不相容微量元素和放射性同位素有很好的相关关系^[22],也与Fe同位素有较好的相关关系^[23],表明地幔成分的不均一性。

(3) 问题三。玄武岩记录了地幔初始熔融深度(P_0),这完全忽视了熔融地幔中高效的熔体-固相平衡的事实,尤其对构成橄榄石的元素Si、Mg和Fe。图2展示目前对洋脊地幔熔融过程的理解。板块分离诱导软流圈地幔被动上涌,当与固相线在 P_0 (对应于 T_0)处相交时减压熔融开始,直到熔融地幔上涌到 P_F (对应于 T_F),后者是CTBL(区域②)的底界,是减压熔融的最终深度,也是熔体-固体再平衡的深度。由于浮力差,熔体(红色箭头细虚线)比固体残余(蓝色箭头实线)上升得更快。熔体被提取形成洋壳,熔融残余加入了岩石圈地幔的增生。后者暴露在海面时,被采样为深海橄榄岩。在从 P_0 到 P_F 的减压熔融区①近分馏减压熔融过程中,1%~2%(或更少)的熔体与98%~99%(或更多)固体基质直接接触,确保有效和高效的熔体-固相保持相平衡,尤其对构成橄榄石的元素Si、Mg和Fe。上千年的熔融时间可确保完全的熔体-固体重新平衡直到熔体在 P_F 处离开①,因为这种平衡在橄榄岩熔融实验中很容易在数十小时内实现。

通俗地讲, (1) 喷发的MORB对在 P_0 条件下初始熔体的 SiO_2 、 FeO 和 MgO 没有任何记忆,但可以保留 P_F 的特征; (2) 在讨论 P_0 、 T_0 和 T_{MP} 时, Fe_8 或 Fe_{90} 等参数没有任何意义; (3)

这些概念和结论适用于地球上各种构造环境中的地幔熔融和玄武岩岩浆作用; (4) MORB熔体甚至可能没有记录 P_F , 因为MORB熔体在上升过程中结晶出橄榄石并添加在区域②的早期残余中, 记录在深海橄榄岩里过量的橄榄石和熔体的叠加进一步证明MORB没有 P_0 、 T_0 和 T_{MP} 的任何信息^[9,14,24,25]。

2 岩石圈厚度对板内洋岛OIB地幔熔融的影响

我们熟知,洋脊处岩石圈厚度是全球最薄的,且变化不大。如此小的盖层效应如果能有效记录在MORB组成中,那么玄武岩成分对盖层效应很敏感。为了验证这个设想,我们分析了全球洋岛OIB数据,因为大洋岩石圈厚度(CTBL)变化极大,从近洋脊新生岩石圈的薄盖层到70 Ma或更老岩石圈的~90 km^[26]。在全球规模上,OIB成分与喷发时大洋岩石圈厚度的显著相关变化关系是岩石圈厚度盖层效应的直接展现,喷发在厚岩石圈之上的OIB具有熔融程度低(低 $F\propto P_0-P_F$)和熔体提取压力高(深 P_F)的特点,而喷发在薄岩石圈之上的OIB则相反(图3)^[18]。这项研究成果与实验岩石学的推测一致,即大洋盆地岩石圈-软流圈界面(LAB= P_F)是角闪石脱水固相线,其特征在 $P(P_F)\leq 3\text{ GPa}$ ($<90\text{ km}$)压力下为等温线($dT/dP=0$, $T\sim 1100^\circ\text{C}$);在 T 约1050~1150°C条件下为等压线($dP/dT=0$, $P(P_F)\sim 3\text{ GPa}$ (~90 km))^[27]。这一全新认识为自板块构造理论诞生以来有关LAB性质的争论找到了大统一的解决方案,不仅解释了为什么全球LAB(P_F)深度随着海底年龄从洋脊下方的~10 km增长到海底年龄~70 Ma($\propto \sqrt{\text{Age}}$)时的~90 km($dT/dP=0$, $T\sim 1100^\circ\text{C}$),而且还解释了为什么海底年龄大于70 Ma的LAB深度为恒定的~90 km($dP/dT=0$; $P(P_F)\sim 3\text{ GPa}$)。

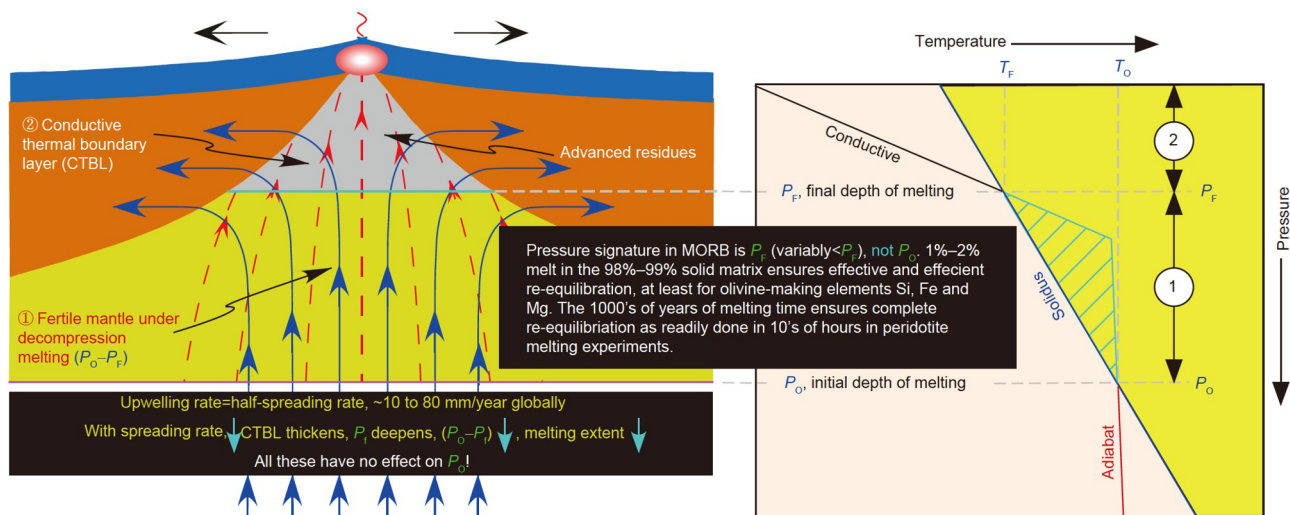


图2 目前对洋脊地幔减压熔融的认识以及在压力-温度(P - T)坐标的热结构示意图^[17]

Figure 2 Schematic diagram showing current understanding of ocean ridge mantle melting regime and its thermal structure in P - T space^[17]

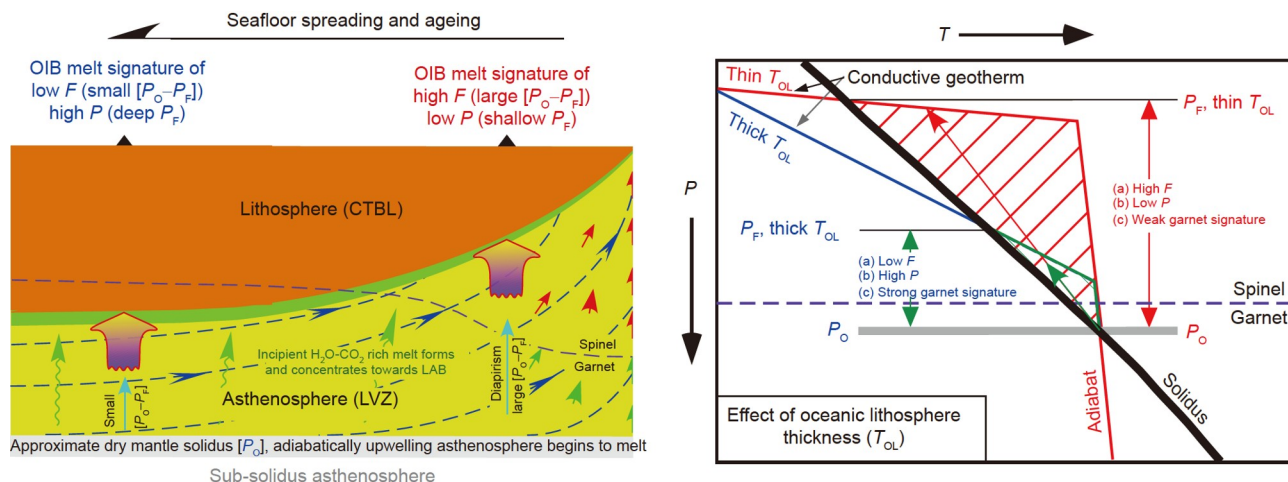


图3 板内洋岛玄武岩组成与地幔熔融岩石圈厚度盖层效应及在压力-温度(P - T)坐标的热结构示意图^[17]

Figure 3 Illustration of the lid effect on mantle melting beneath intra-plate ocean islands and OIB petrogenesis in P - T space^[17]

值得注意的是, OIB被广泛认为是源于深部地幔柱的产物, 不同的地幔柱有不同的 T_{MP} , 所以有不同的起始熔融深度 P_O , 但OIB只记录 P_F , 没有 P_O 的记忆。如果说, 构成橄榄石的元素Si、Mg和Fe是由于熔体在熔融地幔与橄榄石的有效平衡而只记录 P_F , 那么不相容元素记录的部分熔融程度($F \propto P_O - P_F$)应该有对 P_O 的记录, 但OIB仍然均无 P_O 的记录而只有 P_F 的记录。难道说所有地幔柱均具有类似的 T_{MP} 和 P_O ? 或者在全球规模上OIB反映的热点或地幔柱 T_{MP} 变化很小, 小到可以忽略不计, 远远小于盖层效应^[18]。对于这一问题一定会有争议, 但这里基于观察事实的严谨分析值得思考。

3 岩石圈厚度对大陆CIB地幔熔融的影响

MORB和OIB记录的盖层效应表明, 盖层效应一定对大陆内部玄武岩(CIB)的地幔熔融有重要的控制作用。目前全球最好的检验场所在中国大陆东部, 由于中生代时古太平洋板块的俯冲和底部加水弱化减薄了该区的岩石圈地幔^[28], 发育了大洋型地震波低速带(LVZ)和不同深度的LAB。事实上, 我们的研究已经证实, 中国东部的新生代CIB具有不同的成分, 与LAB深度密切相关, 与图3中所示的盖层效应完全一致^[29-31]。

4 岩石圈厚度对俯冲带VAB地幔熔融的影响

与俯冲带有关的陆、弧玄武岩(VAB)已被很好地理解为俯冲板片脱水引起地幔楔熔融所致。重要的是, 我对近期文献^[12]中汇编的全球VAB数据的分析表明, 盖层效应对地幔楔熔融和VAB成因有重要的控制作用。准确地讲, VAB的成因是俯冲板片脱水导致地幔楔熔融与盖层效应的共同结果。前者形成了地幔熔融底辟, 其上涌和持续减压熔融导致了VAB的成因, 但部分熔融程度受控于俯冲带上方岩石圈厚度

的控制, 即盖层效应^[17]。

5 总结

除了岩浆演化的因素外, 全球各种构造环境中玄武岩成分的变化都有可能继承源区组成的差异, 也有可能是地幔潜在温度(T_{MP})和初始熔融深度(P_O)的变化所致。我们没有也不能忽视这些因素, 但所有这些都是次要的或无关紧要的, 因为它们完全被盖层效应(P_F)掩盖了。因此, 在地球上各种构造环境中, 是岩石圈盖层厚度(P_F), 而不是地幔潜在温度(T_{MP} , P_O), 控制着地幔熔融程度、熔体提取深度和玄武岩成分。值得强调的是, 现代玄武岩的研究会采用各种同位素(放射性同位素或稳定同位素), 这很有意义。但同位素不决定岩石和熔体的物理性质, 所以不记录与地幔熔融有关的物理条件(如熔融程度、深度区间、盖层效应等)。如果玄武岩中这些同位素和主、微量元素有较好的相关关系, 表明地幔源区的不均一性, 其中富集与亏损端员组分甚为古老^[22]。

也许有人会说, 用范式革命(paradigm shift)比喻这一全球性的全新认识言辞甚大, 但对地幔熔融和玄武岩成因而言, 需要抛弃与所有观察事实、实验岩石学结果和相平衡原理相悖的“地幔潜在温度(T_{MP})控制”这一范式模型, 以推动科学进步。由于从“温度控制”到“盖层效应”的概念转变是根本性的, 很多人可能不习惯, 因此需要岩石学领域和固体地球科学领域的科学家继续学习与讨论。我强调两点: (1) 全球MORB、OIB、VAB和CIB成分均展现清楚的岩石圈厚度的盖层效应(即 P_F 控制), 但不显示任何“温度控制”(即 P_O 或 T_{MP})的痕迹。这是因为熔融地幔中高效的熔体-固体相平衡, 喷出的玄武岩没有 P_O 或 T_{MP} 的记忆。(2) 保持客观、实事求是、开放的思维和不受主流权威观点的束缚有助于原创性地认识, 也防止我们失去新发现的机会。

本文是对近期发表在*Earth-Science Reviews*一篇综述的中文简写。该综述的科学意义在于回顾了过去半个多世纪国际上对全球玄武岩成因研究的简史和理论模型，用地质学、地球物理学和实验岩石学原理对全球各种地质构造环境的玄武岩数据进行了系统、客观、严谨的分析，得出具有普遍意义的结论，即玄武岩喷发时岩石圈的厚度，不是

“地幔潜在温度”，决定了地幔熔融程度、熔体提取深度和玄武岩成分。各种地质构造环境中喷发的玄武岩均记录有岩石圈厚度的信息，没有“地幔潜在温度”的信息。因此，为了促进科学进步，我们必须抛弃与实际资料相悖的有关玄武岩成因的“地幔潜在温度”范式模型。建议感兴趣的读者下载阅读文献[17]。

致谢 感谢两位评审人的宝贵修改意见。

推荐阅读文献

- 1 Ringwood A E. A model for the upper mantle. *J Geophys Res*, 1962, 67: 857–867
- 2 Green D H, Ringwood A E. The genesis of basaltic magmas. *Contr Mineral Petrol*, 1967, 15: 103–190
- 3 O'Hara M J. Melting of garnet peridotite and eclogite at 30 kilobars, Carnegie Inst Wash Year Bk, 1963, 62: 71–77
- 4 O'Hara M J. The bearing of phase equilibria studies in synthetic and natural systems on the origin and evolution of basic and ultrabasic rocks. *Earth-Sci Rev*, 1968, 4: 69–133
- 5 Kushiro I. Compositions of magmas formed by partial zone melting of the Earth's upper mantle. *J Geophys Res*, 1968, 73: 619–634
- 6 Carmichael I S E, Turner F J, Verhoogen J. *Igneous Petrology*. New York: McGraw-Hill, 1974
- 7 Yoder H S. *Generation of Basaltic Magmas*. Washington DC: National Academy of Science Press, 1976
- 8 Verhoogen J. Petrological evidence on temperature distribution in the mantle of the Earth. *Trans AGU*, 1954, 35: 85–92
- 9 Niu Y. Mantle melting and melt extraction processes beneath ocean ridges: Evidence from abyssal peridotites. *J Petrol*, 1997, 38: 1047–1074
- 10 Klein E M, Langmuir C H. Global correlations of ocean ridge basalt chemistry with axial depth and crustal thickness. *J Geophys Res*, 1987, 92: 8089–8115
- 11 McKenzie D, Bickle M J. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. *J Petrol*, 1988, 29: 625–679
- 12 Turner S J, Langmuir C H. What processes control the chemical compositions of arc front stratovolcanoes? *Geochem Geophys Geosys*, 2015, 16: 1865–1893
- 13 Niu Y, Hékinian R. Spreading-rate dependence of the extent of mantle melting beneath ocean ridges. *Nature*, 1997, 385: 326–329
- 14 Niu Y. Bulk-rock major and trace element compositions of abyssal peridotites: Implications for mantle melting, melt extraction and post-melting processes beneath mid-ocean ridges. *J Petrol*, 2004, 45: 2423–2458
- 15 Niu Y, O'Hara M J. Global correlations of ocean ridge basalt chemistry with axial depth: A new perspective. *J Petrol*, 2008, 49: 633–664
- 16 Niu Y. The meaning of global ocean ridge basalt major element compositions. *J Petrol*, 2016, 57: 2081–2103
- 17 Niu Y. Lithosphere thickness controls the extent of mantle melting, depth of melt extraction and basalt compositions in all tectonic settings on Earth—A review and new perspectives. *Earth-Sci Rev*, 2021, 217: 103614
- 18 Niu Y, Wilson M, Humphreys E R, et al. The origin of intra-plate ocean island basalts (OIB): The lid effect and its geodynamic implications. *J Petrol*, 2011, 52: 1443–1468
- 19 Jaques A L, Green D H. Anhydrous melting of peridotite at 0–15 Kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts. *Contr Mineral Petrol*, 1980, 73: 287–310
- 20 Langmuir C H, Klein E M, Plank T. Petrological systematics of mid-ocean ridge basalts: Constraints on melt generation beneath ocean ridges. In: Morgan J P, Blackman D K, Sinton J M, eds. *Mantle Flow and Melt Generation at Mid-ocean Ridges*. Am Geophys Union Monogr, 1992, 71: 183–280
- 21 Gale A, Langmuir C H, Dalton C A. The global systematics of ocean ridge basalts and their origin. *J Petrol*, 2014, 55: 1051–1082
- 22 Niu Y, Regelous M, Wendt I J, et al. Geochemistry of near-EPR seamounts: Importance of source vs. process and the origin of enriched mantle component. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 199: 327–345
- 23 Sun P, Niu Y, Guo P, et al. Large iron isotope variation in the eastern Pacific mantle as a consequence of ancient low-degree melt metasomatism. *Geochim Cosmochim Acta*, 2020, 286: 269–288
- 24 Niu Y, Hékinian R. Basaltic liquids and harzburgitic residues in the Garrett Transform: A case study at fast-spreading ridges. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 146: 243–258
- 25 Niu Y, Langmuir C H, Kinzler R J. The origin of abyssal peridotites: A new perspective. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 152: 251–265
- 26 Humphreys E R, Niu Y. On the composition of ocean island basalts (OIB): The effects of lithospheric thickness variation and mantle metasomatism. *Lithos*, 2009, 112: 118–136

- 27 Niu Y, Green D H. The petrological control on the lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) beneath ocean basins. [Earth-Sci Rev](#), 2018, 185: 301–307
- 28 Niu Y L. Geological understanding of plate tectonics: Basic concepts, illustrations, examples and new perspectives. *Glob Tecton Metal*, 2014, 10: 23–46
- 29 Guo P, Niu Y, Sun P, et al. Lithosphere thickness controls continental basalt compositions: An illustration using Cenozoic basalts from eastern China. [Geology](#), 2020, 48: 128–133
- 30 Sun P, Niu Y L, Guo P Y, et al. The lithospheric thickness control on the compositional variation of continental intraplate basalts: A demonstration using the Cenozoic basalts and clinopyroxene megacrysts from eastern China. *J Geophys Res*, 2020, 125: e2019JB019315
- 31 Sun P, Guo P, Niu Y. Eastern China continental lithosphere thinning is a consequence of paleo-Pacific plate subduction: A review and new perspectives. [Earth-Sci Rev](#), 2021, 218: 103680