中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 5 期： 1973–1987
经典永流传
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

安山岩成因思想的百年演化

陈龙[1,2*]，蔡仁骏[3]

1. 深海圈层与地球系统教育部前沿科学中心，海底科学与探测技术教育部重点实验室，中国海洋大学海洋地球科学学院，青岛 266100
2. 青岛海洋科技中心海洋资源评价与探测技术功能实验室，青岛 266237
3. 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室，中国科学技术大学地球和空间科学学院，合肥 230026
* 通讯作者，E-mail：chenlong@ouc.edu.cn

2025-12-09收稿，2026-03-19修回，2026-03-26接受，2026-04-21网络版发表
国家科技重大专项项目(2025ZD1005002)和山东省自然科学基金优秀青年科学基金项目(ZR2022YQ32)资助

摘要 安山岩作为俯冲带火山弧的典型产物，其成因研究贯穿了20世纪以来的火成岩岩石学发展史。本文系统回顾了安山岩成因思想的百年演进，主要聚焦于20世纪中期提出的八大经典模型及其代表性文献。早期研究围绕单一主导机制展开，相继形成了以结晶分异、同化混染-结晶分异、岩浆混合为代表的演化过程模型，以及以地壳熔融、板片熔融、含水橄榄岩熔融和辉石岩熔融为代表的源区模型。自20世纪80年代起，研究范式发生根本转变，从争论“单一成因”转向构建“多过程耦合”框架，以俯冲带为共同背景，以兼顾源区性质与岩浆过程贡献的全球综合框架，以及整合多过程作用的“MASH”模型为标志，思想体系逐步完善。当前学界共识已从“非此即彼”的模型选择，转向对“源区性质”和“过程效率”的协同探究。未来的挑战在于精确厘清不同源区(如橄榄岩与辉石岩)的贡献比例，并定量约束岩浆演化过程(如分离结晶、混合与同化)的相对作用。深化对这一多过程耦合系统的理解，将是最终揭示安山岩成因、俯冲带物质循环与大陆地壳生长机制的关键。

关键词 安山岩，成因模型，岩浆过程，源区性质，俯冲带，思想史

1 引言

安山岩(Andesite)这一名称最早由德国地质学家Leopold von Buch于1836年提出，用以描述来自安第斯山脉和堪察加的含角闪石的火山岩。然而，相较于玄武岩与花岗岩的成因在早期便受到广泛关注，安山岩的成因机制在其后近百年间未能引起学者的系统性探讨(Young，2003)。直到20世纪中叶，随着地球化学方法的兴起与板块构造理论的建立(郑永飞，2023)，特别是Taylor和White(1965)提出大陆地壳的平均化学成分与安山岩高度相似的认识之后，作为俯冲带大陆弧中最具代表性的火山岩类型，安山岩的成因才真正成为岩浆岩石学与地球化学研究的核心议题之一(Gill，1981)。安山岩的化学成分介于玄武岩与流纹岩之间，但在全球分布上却几乎专属于板块俯冲带(Dickinson和Hatherton，1967；Gill，1981)。这种独特的“成分-构造”专属性，使安山岩成为探索地球深部物质循环与大陆地壳生长机制的关键研究对象。

然而，安山岩“承上启下”的过渡性化学成分，本身就是其核心科学难题的焦点，铸就了它作为地球上成因最复杂的火山岩的独特地位(图1)。近一个世纪以来，学者们相继提出多种成因模型(Gill，1981；Grove和Kinzler，1986；Gómez-Tuena等，2013；Kelemen等，2014；Chen等，2021)，涵盖分离结晶、同化混染、分离结晶-同化混染(AFC)、岩浆混合、地壳熔融、熔融-同化-存储-均一化(MASH)、含水地幔熔融以及俯冲板片熔融和交代成因辉石岩熔融等不同机制(图1)。尽管每种模型均能合理解释部分地质或岩石地球化学现象，却始终难以单独阐明安山岩的全部特征。这一现实推动了该领域研究范式的根本转变——从寻求“单一主导机制”逐渐发展

中文引用格式：陈龙, 蔡仁骏. 2026. 安山岩成因思想的百年演化. 中国科学: 地球科学, 56(5): 1973–1987, doi: 10.1360/SSTe-2025-0431
英文引用格式：Chen L, Cai R. 2026. Petrogenesis of andesite: A century of conceptual evolution. Science China Earth Sciences, 69(5): 1932–1945, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1914-3

© 2026《中国科学》杂志社

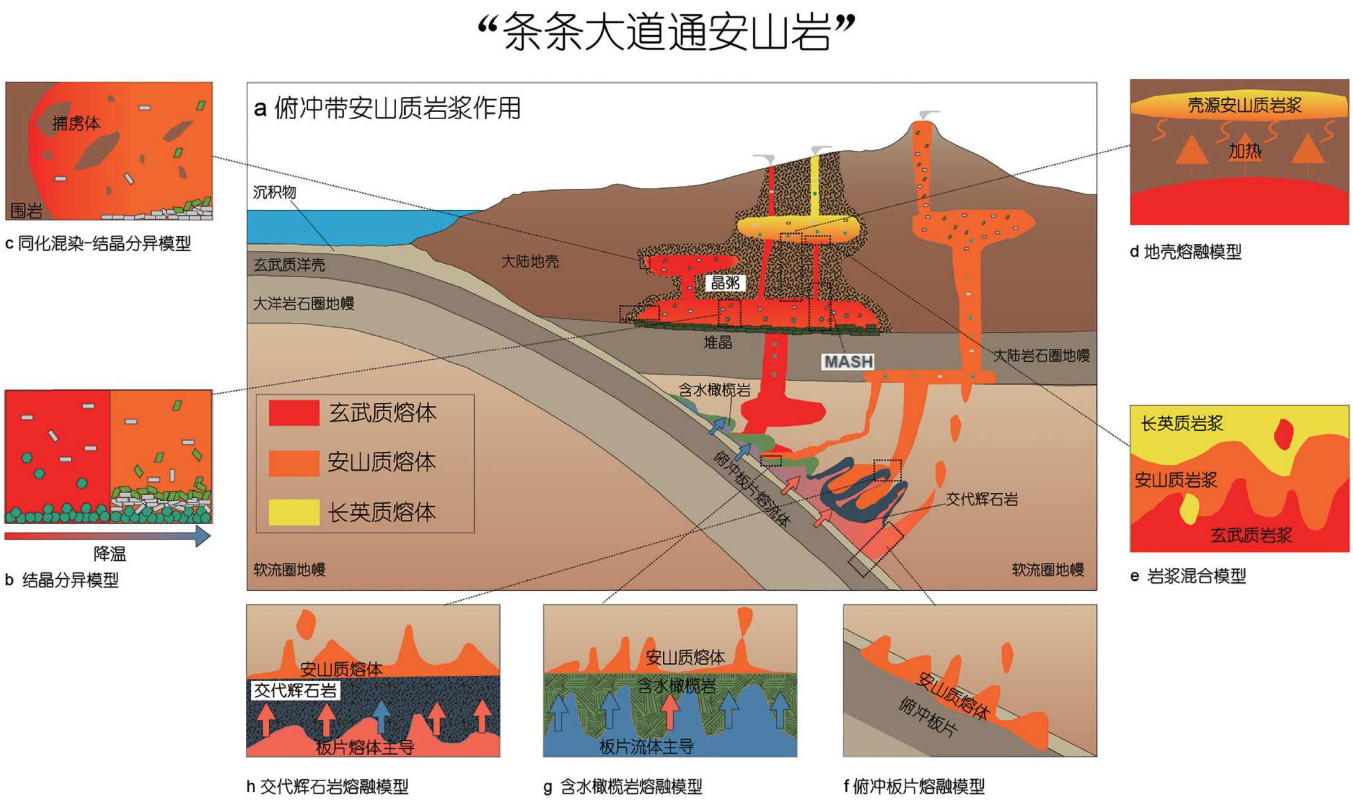


图 1　俯冲带安山岩成因多模型集成图。(a) 洋-陆俯冲带(大陆弧)岩浆系统的综合地质剖面示意图，全面展示了俯冲带从深部地幔到浅部地壳的弧岩浆源区形成、源区部分熔融以及分异演化的系列过程。(b–h) 以顺时针顺序详细展示了生成安山质岩浆的多种具体模型。(b) 结晶分异模型(Fractional Crystallization)：幔源玄武质岩浆经过结晶分离，成分演化至安山质；(c) 同化混染-结晶分异模型(AFC)：幔源玄武质岩浆经过分离结晶和同化地壳转变为安山质；(d) 地壳熔融模型(Crustal Melting)：玄武质岩浆侵位，加热地壳，使之部分熔融产生安山质岩浆；(e) 岩浆混合模型(Magma Mixing)：幔源玄武质岩浆与壳源长英质岩浆混合生成安山质岩浆；(f) 俯冲板片(榴辉岩)熔融模型(Slab Melting)：俯冲洋壳和沉积物在高压下转化为榴辉岩然后直接部分熔融产生安山质熔体；(g) 板片流体诱发的含水橄榄岩(地幔楔)熔融模型：俯冲板片释放的富水流体使上覆地幔楔橄榄岩部分熔融产生安山质熔体；(h) 交代辉石岩熔融模型：板片熔体与地幔橄榄岩反应生成含水富硅辉石岩，其部分熔融产生安山质岩浆。MASH模型强调幔源玄武质熔体在下地壳层位多过程(熔融、同化、存储、均一化)耦合作用下产生安山质岩浆。红色、橙色和黄色区域分别代表玄武质(基性)、安山质(中性)和长英质(酸性)熔体或岩浆

为构建“多过程耦合”的综合成因框架。因此，安山岩研究的历史，实为一部思想持续演进、假说相互检验与修正的思想史。许多核心思想虽然在20世纪中叶前已初现雏形，但只是在地球化学手段不断涌现和板块构造理论不断完善的背景下，才陆续确立，并在20世纪80年代前后形成较为系统的思想架构(Gill，1981)。此后数十年间，随着高温高压实验、岩石学、元素与同位素地球化学、矿物微区分析以及地球动力学模拟和热力学模拟等技术的深入应用，这些思想得以在板块构造的动力学背景中不断定量化、精细化与系统化(Young，2003；Gómez-Tuena等，2013；Kelemen等，2014；Chen和Zhao，2017；Grove和Brown，2018；Zheng等，2020)。

为系统梳理这一历程，本文将以思想史为主线，聚焦安山岩成因研究中具有里程碑意义的代表性工作(表1)。所选研究具备以下一项或多项特征：具有广泛影响力，即塑造数十年乃至上百年研究范式并被广泛引用(如Bowen(1928)的分离结晶模型)；具有原创性，即首次提出重要成因思想(如Nicholls和Ringwood(1973)的辉石岩熔融模型)；或具备关键理论价值，即代表该领域发展的思想转折点(如Hildreth和Moorbath(1988)提出的MASH模型所标志的、从单一分异机制争论转向多过程系统整合的范式转变)。基于上述标准，本文选取了8篇经典文献，系统梳理自Bowen(1928)至Hildreth和Moorbath(1988)期间提出的八大经典成因模型(表1)。对每一模型的评述将遵循统一框架，涵盖其历史起点、核心思想、学术影响、后续发展及局限性。通过这一梳理，本文旨在揭示安山岩成因思想如何从早期单一源区、封闭体系的简单分异模型，逐步演进为多源区、开放体系、多过程耦合的复杂动力学系统，进而展现实验岩石学、地球化学与板块构造理论深度融合所催生的现代安山岩成因思想的演进

表1　安山岩成因八大模型

模型名称	经典文献	核心思想	核心证据	入选理由	主要局限
结晶分异模型	Bowen，1928	系统提出玄武质岩浆可通过矿物依次结晶分离(“反应序列”)向中酸性演化的理论框架	“反应系列”矿物共生序列；实验证实玄武质熔体冷却可依次晶出橄榄石、辉石等，残余熔体富硅	奠定基于物理化学原理的现代岩浆分异理论框架，是所有安山岩成因模型的思想起点；确立安山岩为分异产物的经典范式	假设“封闭体系”、“干系统”与“单一分异趋势”，无法解释弧安山岩的微量元素富集、同位素富集及结构不平衡等特征
同化混染与结晶分异模型	DePaolo，1981	建立岩浆上升过程中围岩同化与结晶分异耦合的定量数学模型，阐释开放体系成分演化规律	岩浆$^{87}Sr/^{86}Sr$与1/Sr等微量元素比值间的特定协变趋势；该趋势无法用简单混合或分异解释	实现开放体系理论的定量化，成为解释弧安山岩同位素富集与成分演化的核心工具	成因识别具多解性，AFC信号与源区混合(如辉石岩熔融)信号高度相似；简单的单阶段AFC模型可能过于理想化
地壳熔融模型	Pichler和Zeil，1971	安山岩可直接由增厚的基性地壳部分熔融形成，并非必然依赖玄武质母岩浆分异	智利安第斯安山岩含石英与斜长石残留晶及部分熔融结构；具高$^{87}Sr/^{86}Sr$(>0.705)及与大陆地壳相似的主微量元素成分	首次系统提出“地壳熔融模型”，突破“地幔主导”成因观，将地壳源区视角引入安山岩成因研究	需要异常高的地温(>1000 °C)和极厚地壳(>40–50 km)，自然条件下难以满足；且难以形成高水含量的安山岩
岩浆混合模型	Eichelberger，1975	安山岩可由玄武质与流纹质岩浆在浅部岩浆房中直接混合形成，反映开放体系的动态演化	Glass Mountain安山岩-英安岩成分连续过渡；含流纹质与玄武质端元包体、条带及相应不平衡斑晶组合	奠定“岩浆混合模型”的天然证据基础，推动研究范式从封闭分异转向开放动态过程	岩浆混合的识别标志(如不平衡矿物、成分条带)与岩浆房内部其他动力学过程(如晶体沉降、再注入)的产物高度相似，导致其在地质记录中难以明确甄别和定量评估
俯冲板片熔融模型	Green和Ringwood，1968	俯冲洋壳(榴辉岩)在高压下可直接部分熔融，成为安山质岩浆的直接源区	高压实验证实：含水玄武岩在榴辉岩相条件下(~2–3 GPa)部分熔融，可直接产生钙碱性安山质熔体	首次从实验角度论证“俯冲板片熔融”可直接形成安山岩，提出“地壳物质再循环”进入源区的机制，强化了安山岩与板块构造的联系	需极高的板片温度(通常要求年轻或停滞板片)，难以解释大多数冷俯冲带上的安山岩；其典型产物为埃达克岩，与多数弧安山岩成分差异明显
含水橄榄岩熔融模型	Kushiro，1972	板片释放的富水流体引发上覆地幔楔橄榄岩部分熔融，可直接产生安山质熔体	高压实验证实：含水橄榄岩部分熔融可产生高硅(安山质)玻璃；斜方辉石不一致熔融是关键机制	确立“含水地幔熔融模型”，将板片流体与地幔熔融耦合，解释弧岩浆高水含量与元素富集特征	单纯的含水橄榄岩熔融难以解释弧安山岩中强烈的沉积物信号(如高Th/La、^{10}Be)；通常需与板片熔体贡献共同作用
辉石岩熔融模型	Nicholls和Ringwood，1973	安山岩源自板片熔体与橄榄岩反应生成的次生辉石岩源区熔融，源区为壳幔混合产物	理论推导与初步实验表明：板片熔体-橄榄岩反应可形成辉石岩，其部分熔融产生的熔体具安山质成分	开创“辉石岩熔融模型”，实现从单一源区向混合源区范式的转变，挑战了橄榄岩唯一地幔源区的传统认知	长期缺乏直接、不可替代的地球化学指纹；其地球化学信号易与AFC过程混淆；缺乏实验岩石学工作支持
MASH模型	Hildreth和Moorbath，1988	提出“熔融-同化-存储-均一化”框架，强调安山岩基本特征形成于下地壳多过程耦合系统	南安第斯火山岩的$^{143}Nd/^{144}Nd$初始比值与地壳厚度呈显著负相关(即地壳越厚，$^{143}Nd/^{144}Nd$初始比值越低/越富集)	提出MASH模型，强调下地壳是安山岩成分定型的主要场所，实现了多过程(分异、同化、混合)在深部地壳框架下的整合	模型侧重于岩浆演化过程，其整合的多个过程相互耦合，导致难以直接验证或定量拆解各过程的独立贡献；同时，模型对初始岩浆成分(源区贡献)缺乏有效约束，并默认幔源输入为均一玄武质岩浆，忽略了源区不均一性的影响

全貌(图1a)。

需要指出的是，安山岩的成分谱系本身是连续的，涵盖从低硅(52 wt%<SiO_2<57 wt%)到高硅(57 wt%<SiO_2<63 wt%)，从普通低镁安山岩到高镁安山岩(Mg#>60)等变种(Kelemen等，2014)。传统研究常基于一个基本假设——与地幔橄榄岩达到平衡的原始岩浆应具有高镁特

征，并以此为逻辑起点，将高镁安山岩与普通安山岩的成因分别进行讨论(Gill，1981)。然而，现代研究日益认识到，其成分多样性(包括镁含量的变化)更可能是源区性质(橄榄岩vs辉石岩)与演化过程共同作用的连续体现(Straub等，2011；Chen等，2021)。因此，本文将安山岩作为一个整体进行探讨，旨在系统梳理适用于其全成分谱系的成因思想演进。除特殊说明外，文中对高镁安山岩与普通安山岩不作严格区分。

2　结晶分异：经典范式的奠基、检验与发展

结晶分异模型是安山岩成因研究的理论起点，其思想雏形可追溯至19世纪甚至更早(Daly，1914)。然而，基于物理化学原理的结晶分异理论的系统化与奠基性构建，主要由Bowen(1928)在其著作*The Evolution of the Igneous Rocks*中完成。Bowen通过总结前人及自身实验成果，提出了经典的“反应序列”，为岩浆演化建立了系统的热力学框架。其核心论点为：在封闭体系中，随着橄榄石、辉石、斜长石等矿物依次结晶并分离，残余熔体会持续富集硅和铝，从而使原始玄武质母岩浆演化出安山质乃至流纹质成分(图1b)。这一模型迅速成为解释中酸性火山岩成因的主导理论，安山岩也自然而然地被定义为玄武质岩浆分异的中间产物。

然而，随着研究深入，Bowen模型所基于的封闭体系、干系统和单一分异趋势等假设逐渐暴露出局限性(表1；Gill，1981；Young，2003；Grove和Brown，2018)。Deer和Wager(1939)对东格陵兰Skaergaard层状侵入体的研究虽然系统证实了自然界分离结晶作用的存在，但同时指出，玄武质岩浆在分离结晶过程中残余熔体显著富铁，呈现拉斑玄武岩趋势，与Bowen基于俯冲带玻璃质岩石所提出的铁亏损、硅富集钙碱性趋势明显不同。Skaergaard侵入体的分异产物为铁辉长岩，而非Bowen理论预测的钙碱性中性岩，从而证实自然界至少存在两种不同的岩浆分异路径，动摇了Bowen“所有岩浆演化遵循单一趋势”的核心论点。

上述局限推动了后续学者对经典理论的修正与拓展。Osborn(1959)首次将氧逸度作为关键变量引入，提出Fe-Ti-O体系的氧化状态控制拉斑与钙碱性系列的分异，指出安山岩形成于高氧逸度环境。与此同时，Kuno(1950，1959)通过对岛弧火山岩的系统研究，识别出拉斑、高铝与碱性三种岩浆系列，从矿物组合与地球化学角度论证了岩浆演化路径的多样性，为安山岩来源提供了早期岩石地球化学依据，并丰富了其成因框架。近三十年来，结晶分异模型在实验岩石学定量约束和深部地壳实证两方面取得了重大进展，使其从定性框架演化为可精确定量验证的核心过程。

实验岩石学的精细化约束表明，在高压、高水含量和高氧逸度的俯冲带条件下，玄武质岩浆的分离结晶可以有效地模拟出钙碱性趋势(Sisson和Grove，1993；Grove和Brown，2018；Gao等，2025；Sisson，2025)。例如，一系列高温高压实验证实，富水的幔源熔体在中-低压力(~0.1–0.4 GPa)下结晶分异，通过早期结晶橄榄石、单斜辉石并伴随磁铁矿的饱和，能有效驱使残余熔体向安山质成分演化(图2；Blatter等，2013；Nandedkar等，2014；Waters等，2021)。这些实验为Bowen的“反应序列”在现代板块构造背景下找到了具体的物理化学实现路径。

同时，对出露的下地壳剖面(如科希斯坦弧、内华达山脉)的研究，提供了分离结晶过程的直接“岩石学档案”。这些剖面中从超镁铁质堆晶岩向上渐变为长英质岩石的连续序列，清晰地记录了母玄武质岩浆通过晶体沉降分异产生演化熔体的过程，其矿物组合与实验模拟结果高度吻合(DeBari和Greene，2011；Jagoutz和Schmidt，2012；Jagoutz和Kelemen，2015；Ducea等，2015)。

需要指出的是，Bowen在1928年构建模型时，受限于当时对火成岩成分多样性的认知——主要依赖主量元素数据，缺乏微量元素与同位素支持，也缺乏矿物原位成分分析技术(Young，2003；Grove和Brown，2018)。这就不难理解为什么他提出的纯粹的结晶分异模型难以解释弧安山岩中常见的相对共生玄武岩的不相容微量元素和放射成因同位素富集特征(Gill，1981)。另外，Bowen的封闭体系演化特质也不能解释安山岩中普遍发育的结构和成分不平衡特征，这些现象往往需借助开放体系或外部组分参与才能合理解释(Eichelberger，1975，1978；Gill，1981；Kent等，2010)。随着对岩浆系统认知的深化，纯粹的结晶分异已不再被视为安山岩形成的唯一机制，而被更合理地定位为岩浆演化过程中的一个重要组成部分(图1a；Grove和Brown，2018；Sisson，2025)。尽管存在上述困难，Bowen所确立的“结晶分异控制熔体演化，从而形成成分多样的岩浆岩”这一核心理念，至今仍是理解几乎所有安山岩成因模型的基础(图1a)。后续提出的AFC、岩浆混合及MASH和地壳热带等模型，均将其作为基本过程纳入其中(DePaolo，1981；Gill，1981；Hildreth和Moorbath，1988；Annen等，2006)。然而，随着岩浆房流体动力学研究的深入，高温高压实验长期假设的静态理想分离结晶(Young，2003)受到了根本性质疑——晶体-熔体分离本质上是一个动态的物理过程，与静态实验条件相去甚远(Sparks等，1993；Bachmann和Huber，2019；Cai等，2025)。

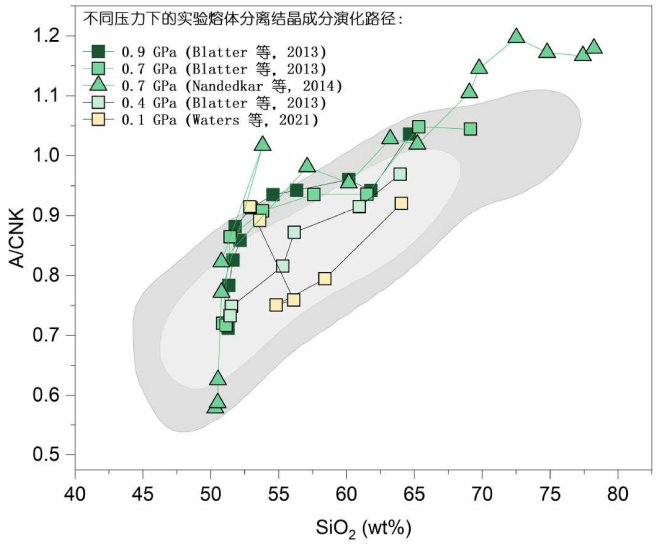


图2　分离结晶实验熔体与天然火山岩成分对比。图中综合展示了不同压力条件下玄武质初始熔体的分离结晶实验轨迹(彩色线条与符号)。灰色区域为喀斯喀特火山弧地区火山岩全岩成分的核密度估计(数据来源于GEOROC数据库)，深灰色区域对应95%置信区间，浅灰色区域对应80%置信区间。实验条件及数据来源详见图中标注及正文引述文献

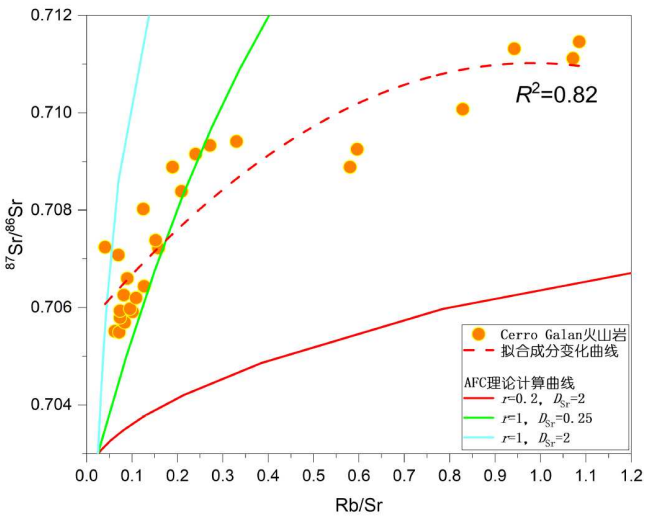


图3　AFC过程模拟与实例。图中展示了Cerro Galán火山岩(安山岩为主)的实测数据点及拟合曲线(红虚线)，并与不同参数的AFC模拟曲线(彩色实线)对比。模拟与实际趋势整体相似，局部差异可能源于端元值或结晶/混染比例的设定，总体上该区安山岩成分变化特征与AFC过程吻合。数据来自Thorpe等(1984)

3　同化混染-结晶分异：开放体系理论的量化与挑战

同化混染思想的起源可追溯至Daly(1914)，他首次明确提出地壳物质混染(Crustal Contamination)是导致安山岩富硅的关键机制。后续，Daly(1933)基于“熔融态地球”假说进一步阐述了地壳同化的思想。尽管这一假说本身缺乏证据，但其关于“岩浆-地壳相互作用”的定性思辨具有启发性。

该领域的根本性突破由DePaolo(1981)实现。他将Daly的定性思想发展为基于能量和质量守恒的精密的可验证的数学模型——同化混染与结晶分异模型(图3)。该模型的核心在于描述上升的基性岩浆在穿越地壳时，同时发生的两个耦合过程：与围岩发生同化作用，以及自身的结晶分异(图1c)。AFC模型基于同位素与微量元素守恒方程，定量揭示了两者如何协同控制最终岩浆成分(图3)。这一模型的建立具有里程碑意义：它不仅奠定了安山岩开放体系成因思想的定量基础，也是对Bowen分离结晶理论的重要拓展与现实主义修正。该模型为解释许多弧安山岩中观察到的、无法由简单幔源玄武质岩浆分异产生的地壳同位素印记(如高$^{87}Sr/^{86}Sr$、低$^{143}Nd/^{144}Nd$)提供了核心工具。例如，中安第斯Cerro Galán地区的高钾安山岩，其富集的Sr-Nd同位素组成就被广泛解释为玄武质岩浆经历显著AFC过程的产物(图3；Thorpe等，1984)。

AFC模型提出之后展现出强大的生命力，被持续应用于全球弧火山岩研究，并与后续理论深度融合(Young，2003)。随着分析技术的发展，AFC模型在同位素与微量元素研究中的应用日趋成熟。例如，Hildreth和Moorbath(1988)的MASH模型将AFC视为普遍存在的关键过程；Davidson等(2008)通过微区Sr同位素分析，在矿物尺度上揭示了分步同化过程；而Annen等(2006)提出的深部“热区”模型，则为AFC过程提供了理想的地球物理实现场景——即持续注入的玄武质岩浆加热并熔融下地壳，进而促成广泛的壳幔相互作用。

然而，AFC模型亦面临关键挑战，其核心局限在于成因识别的多解性(表1)。首先，在复杂的弧地壳系统中，分离结晶与同化混染未必像DePaolo预想的那样同时发生，也可能多次发生(Annen等，2006)。因此，基于简单二元协变关系的地球化学判别分析，或理想化的质量平衡模拟(图3)，有时难以识别和准确评估AFC的实际贡献。其次，也是更根本的挑战在于，AFC所产生的同位素与微量元素信号，与源区混合过程(如源自交代辉石岩的熔体)高度相似，导致二者在天然样品中难以有效区分(Thorpe等，1984；Davidson，1987；Hildreth和Moorbath，1988；Stern和Hanson，1991；Hickey-Vargas，1991；Zheng等，2020；Chen等，2021)。解决这一难题已成为当前研究的前沿，需结合微区矿物学、熔体包裹体分析及俯冲带岩浆过程正演模拟等多种技术手段进行综合约束。

4　地壳熔融：源区视角的引入及其热力学约束

地壳熔融作为安山岩的一种独立成因机制，其思想源头可追溯至Holmes(1932)提出的开创性假说。他推测，大陆或增厚基性地壳在高温高压条件下发生部分熔融可直接产生花岗质熔体，而安山岩与闪长岩则是此类熔体与玄武质岩浆或围岩发生混合或混染的产物。该模型的核心贡献在于实现了根本性的视角转换：玄武质岩浆不再是唯一的母体，花岗质熔体可直接源自地壳物质的重熔，从而突破了以Bowen为代表的、专注于单一玄武质母岩浆分异的传统框架。不过，真正系统提出并论证安山岩可由地壳熔融产生的研究来自Pichler和Zeil(1971)。他们基于岩石学(如安山岩中具部分熔融结构的石英与斜长石残留晶)、主微量元素地球化学(成分与大陆地壳平均值高度相似，具高Ba-Sr-V含量)以及Sr同位素($^{87}Sr/^{86}Sr$初始比值>0.7050，显著高于地幔来源)等多方面证据，首次明确提出智利安第斯山脉的安山岩是下地壳物质部分熔融的产物(图1d)。这一“地壳熔融”模型挑战了当时盛行的“地幔源区主导”成因观——即认为安山岩主要由玄武质岩浆结晶分异或俯冲板片/地幔楔熔融形成，将研究焦点转向“源区性质”，强调大陆地壳在安山岩形成中的主导作用，为后续理解大陆地壳生长与再造、安第斯型大陆弧地壳演化以及MASH等壳幔相互作用模型奠定了理论基础。

该机制的可行性在Manicouagan撞击熔融岩席中得到了明确印证：该岩体形成于21.4亿年前的加拿大地盾，由约60:40的镁铁质-长英质岩石混合物经撞击熔融形成了数百立方公里化学性质均一的高钾钙碱性安山岩(Floran等，1978；Gill，1981)。尽管其钴、钡及轻稀土元素含量更高，初始$^{87}Sr/^{86}Sr$比值达0.7100，但在化学成分(除结构构造外)上与典型高钾安山岩具有显著相似性(Floran等，1978；Gill，1981)。此外，一系列实验(如Green和Ringwood，1968；Rapp和Watson，1995；Rapp等，1999)也证实，在特定温压和水含量条件下，基性地壳岩石(如玄武岩、辉长岩)部分熔融的确可以产生成分与钙碱性安山岩相近的熔体。

然而，该模型存在明显的不足。关键问题在于，要形成安山质熔体，对于基性下地壳岩石(如变玄武岩、角闪岩)，在1 GPa、熔体含水量低于5 wt.%的正常地壳条件下，需达到超过1000 °C的高温(Wyllie，1977)。该温度既高于典型变质岩记录，也超出一般地壳内部热状态(陨石撞击等极端事件除外)，因此其自然可行性长期受到质疑。例如，Dufek和Bergantz(2005)的热模拟研究指出，下地壳熔融难以直接产生大量安山岩——玄武质岩浆底侵通常仅能诱发有限熔融，产物以英云闪长质至英安质的长英质熔体为主；要形成安山岩，需在极厚地壳(>~40–50 km)与高热背景下实现高熔融程度(>~40%)。因此，地壳熔融不太可能成为安山岩的主要成因机制。此外，由地壳岩石脱水熔融产生的长英质熔体，其水含量受限于源区含水矿物，难以形成高水含量的安山岩(如Grove等，2005，2012；Kelemen等，2014)。因此，目前普遍认为，地壳熔融更多的是提供壳源熔体，以AFC和岩浆混合的形式参与安山质岩浆作用(图1a)，地壳熔融直接形成的安山岩非常有限。

5　岩浆混合：证据确凿，成因多解

尽管岩浆混合的思想雏形可追溯至Daly(1914)甚至更早。但该模型真正成为一个系统化的岩石学理论，归功于Eichelberger(1975，1978)和Anderson(1976)的开创性工作。Eichelberger(1975)对Glass Mountain熔岩流的岩相学与地球化学研究发现，该地区的流纹质-英安质与玄武质岩之间存在成分连续过渡；英安岩中普遍存在玄武质包体及源自包体的斑晶团块；安山岩中存在流纹质包体、流纹质条带及相应的斑晶组合。这些现象共同表明，安山岩与英安岩是原始玄武质与流纹质岩浆在上升过程中相互混合或与火山碎屑物质发生混杂所形成的。作者指出部分熔融主要生成基性与酸性端元，而结晶分异作用相对有限。与此同时，Anderson(1976)基于弧火山岩中斜长石与橄榄石的反向环带、成分变化极大的玻璃质熔体包裹体，以及晶体-熔体间的成分非平衡等关键证据，提出了岩浆混合在安山岩形成中的主导作用。Eichelberger(1978)进一步基于安山岩中介于玄武岩与流纹岩之间的Sr-Nd同位素组成以及橄榄石与石英共存等矿物不平衡证据，提出安山岩是玄武质岩浆与长英质地壳物质混合的产物，并论证了安山岩火山活动是大陆地壳生长和分异的关键机制。岩浆混合模型直接挑战了结晶分异的主导地位，为解释安山质岩浆成因提供了新的机制。

Eichelberger和Anderson的核心思想是：安山岩并非单一母岩浆分异的产物，而是基性玄武质岩浆与酸性流纹质岩浆在浅部岩浆房中直接混合的结果(图1e)。在这一框架中，安山岩的化学特征被视为来自两种岩浆的混合过程。这些混合过程可以是岩浆在储库中的均质化，也可以是脉冲注入引发的非平衡反应，反映了岩浆房的动态演化。这一模型将安山岩定位为连接地幔与地壳的“混合产物”，直观地体现了地幔-地壳相互作用的物理现实。这一模型的提出具有重大的科学意义。它不仅是“岩浆混合学派”的理论基石，更代表了安山岩成因研究范式的一次重要转折：从Bowen学派强调的封闭体系“热力学

演化”，转向关注开放体系“动态过程”。它为后来更为复杂的MASH模型的建立提供了不可或缺的天然观测依据。

在Eichelberger-Anderson的开创性工作之后，得益于Langmuir等(1978)近乎同时提出的元素-同位素地球化学通用混合方程，岩浆混合模型迅速得到了广泛认可，并在之后的几十年里持续地精化与发展(Reubi和Blundy，2009；Kent等，2010)。例如，对喀斯喀特弧胡德火山安山岩的地球化学研究揭示，其全岩SiO_2与全碱(K_2O+Na_2O)含量呈现显著的线性混合趋势(图4)。这种系统的成分变化，正是Langmuir混合方程所预测的、两种端元岩浆(基性与酸性)以不同比例混合的直观体现(Kent等，2010)。该案例表明，地球化学的定量混合趋势与Eichelberger和Andersen等在野外及显微镜下发现的岩石学不平衡现象相互印证，共同构成了识别岩浆混合过程的完整证据链。现代岩浆动力学研究揭示，岩浆混合是由热传导、成分扩散、晶体迁移与重熔共同驱动的复杂动力学系统(Kent等，2010；Bergantz等，2015)。得益于高精度同位素定年、熔体包裹体分析与微量元素扩散环带成像等技术进步(Costa，2021)，研究不仅能够精确限定混合事件的时间与空间范围，识别脉冲式注入等非平衡机制(Zellmer，2008)，更能捕捉短至年际的瞬态混合过程(Druitt等，2012；Chadwick Jr等，2016)。完全均一的混合仅为理论端元，自然界中更多以宏观条带、不平衡矿物组合等形式留下“未完成”的结构记录(Perugini和Poli，2012；Perugini等，2012)，这些记录与多尺度“地质速率计”所揭示的时间信息共同构成反演岩浆系统动态演化的关键依据。

岩浆混合模型的优势在于能够解释弧岩浆中同时存在的幔源和地壳信号，尤其适用于解释安山岩中常见的不平衡矿物结构特征，以及它们的多样性与不均一性(Gill，1981；Kent等，2010)。然而，该模型也存在其固有的局限性(表1)。其最大的挑战在于，岩石学上的不平衡可能源自异源混合和自混合作用，而且后者更加普遍(Dufek和Bachmann，2010；Huber等，2012；Bergantz等，2015)，但两者从结构上很难区分(Couch等，2001；Chen等，2018)。另外，岩浆混合过程在自然界中常与结晶过程并行发生(Annen等，2006；Cashman等，2017)，二者的综合地球化学效应与AFC过程类似，虽然二者在物理机制(液-液混合、岩浆-固体反应)和规模上存在根本差异。因此，当代研究普遍将岩浆混合视为岩浆房演化的一个关键动态过程，它需要与分离结晶、同化混染等机制共同构成一个多阶段的岩浆分异框架，以全面解释弧安山岩成分和结构的复杂性与多样性(Bergantz等，2015；Reubi和Müntener，2022；Sisson，2025)。

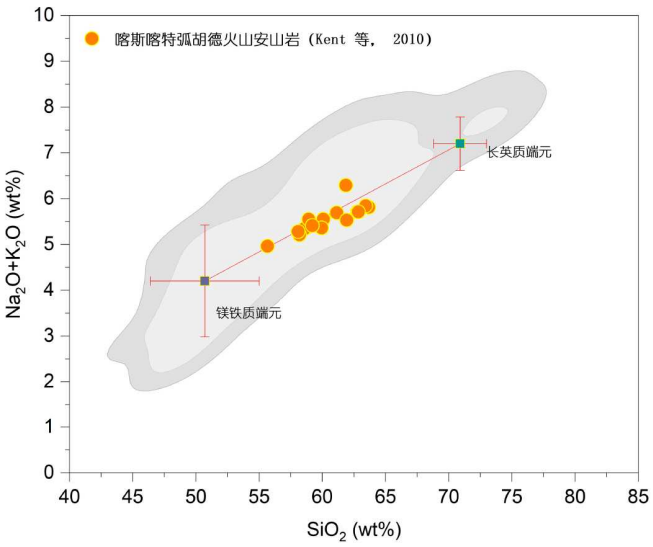


图4 岩浆混合经典案例：全岩地球化学趋势。图中展示了喀斯喀特弧胡德火山安山岩全岩SiO_2含量与全碱(K_2O+Na_2O)含量之间的成分变化。数据点呈线性分布，连接了基性端元(低SiO_2，低碱)与酸性端元(高SiO_2，高碱)，指示了这两个端元岩浆之间发生的混合过程。灰色区域为喀斯喀特火山弧地区火山岩全岩成分的核密度估计(数据来源于GEOROC数据库)，深灰色区域对应95%置信区间，浅灰色区域对应80%置信区间。原始数据及详细解释详见Kent等(2010)

6 俯冲板片熔融：实验证实、构造依赖性与产物特殊性

俯冲板片熔融作为安山岩成因的早期认识可追溯至Coats(1962)对阿留申岛弧安山岩的研究。此时，板块构造理论尚未建立(郑永飞，2023)，大洋岩石圈俯冲概念亦未普及(郑永飞和李振新，2025)。当时，学界普遍认为除了分离结晶以外，安山岩的形成还需同化大陆硅铝质地壳，但地球物理资料显示阿留申岛弧西部火山下方缺乏硅铝层，使该假说受到质疑。相反，Coats提出，优地槽沉积物与玄武质火山岩沿一条以震源带为标志、倾角约30°的逆冲带被下沉至至少100 km深度。在此过程中，水分与花岗质组分被释放，进入地幔橄榄岩中的玄武质熔体，形成含水混合岩浆。该岩浆随后上升、聚集并经历分异，最终形成包括安山岩在内的多种火山岩类型。随后，在板块构造理论确立前夕，Dickinson和Hatherton(1967)通过系统地质观察，首次揭示了安山岩活动带与深源地震带在空间上的密切对应关系，以及安山岩成分(如K_2O含量)与俯冲深度的系统性关联，从地球动力学视角开创性地建立了“安山岩-俯冲带”的成因联系，为后续“俯冲作用控制安山岩形成”的经典模式奠定了构造基础。

然而，使俯冲板片熔融模型具象化并广为接受的关

键工作来自Green和Ringwood(1968)的高温高压实验研究。他们发现，含水的玄武质岩石在俯冲带压力条件下(约2–3 GPa)转变为榴辉岩并发生部分熔融时，所产生的熔体成分与钙碱性安山岩高度相似，并得到了后续一系列实验工作的支持(图5；Rapp和Watson，1995；Rapp等，1999)。该模型核心思想是：俯冲洋壳(玄武岩±沉积物)在高压下转变为榴辉岩，其部分熔融可直接产生安山质熔体(图1f)，从实验角度论证了俯冲带“地壳物质再循环”可直接形成安山岩，为安山岩成因提供了来自俯冲板片本身的源区选项。与此同时，Isacks等(1968)明确论证了汇聚板块边界处发生的岩石圈俯冲作用，为火山弧下方持续的榴辉岩源区供给提供了直接依据。正因将安山岩起源归因于俯冲板片，构成了其与板块构造理论之间最为引人注目的连结，该假说很快在1968年于美国俄勒冈举行的安山岩会议(Andesite Conference)上被广泛接受为最可靠的安山岩成因模型(Gill，1981)。后续的岩石地球化学和实验研究进一步揭示，此类源自板片的熔体在上升过程中必然与上覆地幔楔橄榄岩发生反应，其成分可被显著改造(图5；Rapp等，1999；Kelemen等，2003)，这为理解板片熔融如何通过“熔体-岩石反应”这一桥梁，与“辉石岩熔融模型”相衔接提供了关键线索。

Kay(1978)对阿留申群岛镁质安山岩的研究进一步提出，其成因源于俯冲洋壳(榴辉岩相)部分熔融产生的熔体与上覆地幔橄榄岩反应，并通过高La/Yb、低$^{87}Sr/^{86}Sr$等地球化学证据系统论证，确立了“俯冲板片熔融+地幔反应”的混合成因框架。但是，他指出阿留申镁质安山岩(具埃达克岩特征)与大多数弧安山岩存在成分差异，该模型可能不具普适性。后续地球化学研究进一步明确，板片熔融的典型产物为埃达克岩，其具有高Sr/Y和La/Yb比值及极低Y、Yb含量等特征(Defant和Drummond，1990；Rapp等，1999；Martin等，2005)，而大多数大陆弧安山岩并不具备这些特征(表1；Kelemen等，2003；Straub等，2008)。Kelemen等(2003)通过质量平衡模拟指出，当熔体/橄榄岩比值远小于1时，板片熔体-橄榄岩反应可抵消板片熔体的类埃达克岩微量元素特征(如高Sr/Y、低Yb)。然而，实验岩石学模拟显示，当熔体/橄榄岩比值小于1时，熔体倾向于在与橄榄岩反应过程中被完全消耗，无法逃逸，从而形成不同于橄榄岩的辉石岩等交代地幔源区(Rapp等，1999)。因此，单纯的板片熔融很难解释安山岩的微量元素成分特征(表1)，而板片熔体-橄榄岩反应模型与辉石岩模型往往难以区分。未来需寻找并利用对源区岩石组成(橄榄岩vs辉石岩)敏感的元素同位素体系，以区分两种源区的贡献。另外，在大洋板片俯冲业已停止的区域(如大陆碰撞带)，或许能更有效区分这两种模型——此时板片熔融与熔体-橄榄岩反应虽已停止，但早期形成的交代成因辉石岩仍可能保存在冷却的新生岩石圈地幔中(Zheng等，2020；Chen等，2021；Shu等，2024；陈龙和郑永飞，2025)。

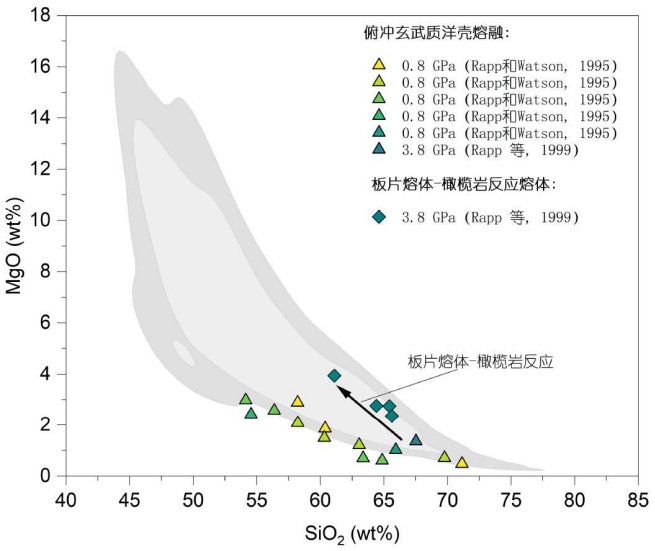


图 5　俯冲板片熔融及熔体-橄榄岩反应实验产物成分展示图。图中展示了变玄武岩/榴辉岩在高压下直接部分熔融(板片熔融端元)，以及此类熔体与橄榄岩反应后形成的熔体(反应熔体端元)的MgO和SiO_2成分。揭示了板片熔体成分经地幔楔过滤改造后的变化趋势。灰色区域为喀斯喀特火山弧地区火山岩全岩成分的核密度估计(数据来源于GEOROC数据库)，深灰色区域对应95%置信区间，浅灰色区域对应80%置信区间。实验条件及数据来源详见图中标注及正文引述文献

7　含水橄榄岩熔融：流体促熔机制的实验奠基与壳源组分的贡献争议

含水橄榄岩熔融的思想源头可追溯至Poldervaart(1955)。他在“Chemistry of the Earth’s Crust”一文中提出，富硅的安山质岩浆可能源自超基性岩石在含水条件下的低温部分熔融，尽管其熔体产量低于玄武岩。然而，该思想的实验验证与概念确立，主要归功于Kushiro(1972)完成的高温高压实验。他发现含水橄榄岩熔融时，斜方辉石的不一致熔融行为使二氧化硅饱和熔体能够与镁橄榄石及多种辉石共存，所产生的熔体因此更具硅质特征，成分接近天然安山岩。这标志着“流体促熔的幔源安山岩模型”从假说进入实验验证阶段。后续一系列实验研究进一步证实并细化了这一过程(图6)，系统揭示了压力、水含量等变量对熔体成分的控制(Mitchell和Grove，2015)。该模型的核心机制可概括为：俯冲板片释放的富水流体进入上覆地幔楔，显著降低其固相线温度，从而在相对低温条件下触发部分熔融，直接形成安山质熔体(图1g)。在板块构造框架下，该模型不仅合理解释了弧

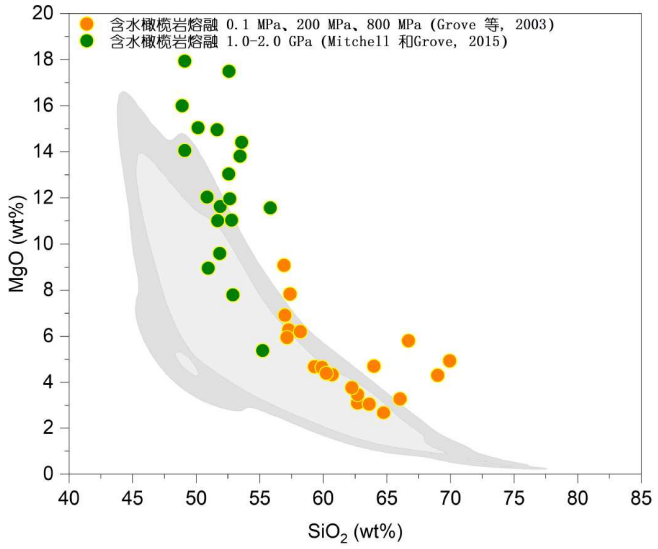


图6 含水橄榄岩部分熔融实验产物成分展示图。图中展示了橄榄岩在特定压力(P)、温度(T)和水含量(XH$_2$O)条件下部分熔融产生的玻璃(熔体)成分，投影在SiO$_2$-MgO图中。灰色区域为喀斯喀特火山弧地区火山岩全岩成分的核密度估计(数据来源于GEOROC数据库)，深灰色区域对应95%置信区间，浅灰色区域对应80%置信区间。实验条件及数据来源详见图中标注及正文引述文献

安山岩普遍高含水、富集大离子亲石元素(LILE)及亏损高场强元素(如Nb、Ta)等特征，也确立了俯冲带流体在岩浆生成中的关键作用。

然而，该模型自提出之初便饱受争议。Kushiro之后的其他学者在实验中也观察到类似的高硅玻璃质，但将其归因于淬火过程中角闪石等矿物的结晶，认为其并未与橄榄岩残留体达到平衡(如Green，1973)。直至Hirose(1997)通过改进实验方法，有效分离淬火前熔体，才明确证实安山质熔体的真实性，并进一步量化了压力与水含量对熔体成分的控制作用，使该模型逐渐获得广泛接受(Mitchell和Grove，2015)。另外，Tatsumi等(1986)系统测定了俯冲板片释放流体的化学组成，为“板片脱水-流体运移-地幔熔融”耦合机制提供了实验依据。目前，水在俯冲带地球化学循环、地幔熔融启动与熔体演化中的关键作用已得到充分确认(Stern，2002；Grove等，2012；郑永飞等，2022；陈伊翔和郑永飞，2025)。

尽管该模型构成现代弧岩浆成因思想的核心(Stern，2002；Zheng等，2020；郑永飞等，2022；陈伊翔和郑永飞，2025)，却并非安山岩的主要成因机制。其主要局限(表1)在于，单纯的含水橄榄岩熔融难以解释在许多岛弧安山岩中观察到的强熔体相容元素(如高Th/La比值)和同位素(如^{10}Be)的富集(Plank和Langmuir，1998；Plank，2005；Kelemen等，2014；Schmidt和Jagoutz，2017；Chen等，2021)，因此，该机制常需与板片熔体(如来自沉积物或蚀变洋壳)的贡献相结合(Tatsumi，1989；Hawkesworth等，1993；Elliott等，1997；Stern，2002；Kessel等，2005；Zheng，2019；Zheng等，2020)。此外，含水地幔橄榄岩部分熔融所生成的母岩浆通常具有高的镁含量，要形成最终喷发的相对低镁的安山岩，通常还需经历不同程度的分离结晶、同化混染或岩浆混合等后续演化过程(Mitchell和Grove，2015)。

8 辉石岩熔融：混合源区范式与地球化学指纹的探寻

在板块构造理论框架下，随着对俯冲板片和地幔楔在弧岩浆作用中的行为、角色及其相互作用认识的深化，研究者开始探讨一个更根本的问题：安山岩的潜在源区是否一定是橄榄岩？有没有可能是混合成因？毕竟板片析出的流体不仅含有水，还含有很多溶质组分，板片熔融产生的熔体也不可能直接喷出，必然会与地幔楔橄榄岩反应(图1a；Rapp和Watson，1995；Rapp等，1999)。Nicholls和Ringwood(1973)提出的辉石岩熔融模型，标志着安山岩成因思想的一个重要分水岭。该模型的核心论点是：安山岩并非直接来源于原始地幔橄榄岩的部分熔融，而是形成于俯冲带中由板片熔体与地幔橄榄岩反应生成的次生辉石岩源区(图1h)。具体而言，当板片来源的硅质熔体渗入地幔楔时，会与橄榄岩发生反应，消耗橄榄石并形成富含辉石和石榴石/尖晶石的反应带——辉石岩，这一混合源区比周围橄榄岩更易熔融，且其熔体天然具备中性(安山质)成分特征(图1h)。该模型具有里程碑意义：它首次将安山岩的潜在地幔源区从橄榄岩范畴拓展为壳-幔相互作用的产物——辉石岩，突破了橄榄岩作为唯一地幔源区的传统认知，为解释安山岩复杂的壳幔地球化学特征提供了全新的源区视角。

这一开创性思想为后续研究指明了方向。Wyllie和Sekine(1982)通过长英质熔体与橄榄岩的反应实验，证实了板片熔体-橄榄岩反应可形成辉石岩。近年实验岩石学进一步表明，辉石岩/榴辉岩在俯冲带条件下确实比橄榄岩更易发生熔融，且辉石岩部分熔融所产生的熔体通常具有高SiO$_2$、CaO和Al$_2$O$_3$含量，较低的Mg#值，与橄榄岩熔体存在显著差异(Lambart等，2012)。Straub等(2011，2025)对墨西哥弧安山岩中橄榄石Ni-Mn和O-He同位素的探索，以及Chen等(2014，2021)对长江中下游地区和安第斯弧安山岩的地球化学定性和定量模拟研究，为特定弧段中辉石岩源区的重要性提供了具体的地球化学证据。近期全球弧玄武岩和安山岩的Fe/Zn比值系统分析揭示，辉石岩是俯冲带火山岩的重要地幔源区，甚至

可能是安山岩的主导源区(Bowman和Ducea，2022；陈龙，2023)。

然而，该模型仍面临关键挑战(表1)。一方面，辉石岩熔融所产生的许多地球化学信号，与源自橄榄岩但经历强烈地壳同化混染的熔体特征高度相似，导致在天然样品中难以明确区分(Chen等，2021)。因此，寻找并确认其独特的、不可被其他过程复制的判别性地球化学“指纹”(陈龙，2023；Straub等，2025)，仍是该模型从“一个重要可能机制”发展为“被普遍证实的主导机制”过程中亟待解决的关键课题(表1)。目前，已提出的潜在指标(如对源区辉石/橄榄石比例敏感的Zn/Fe比值和Fe同位素等)仍面临严峻挑战：这些信号在岩浆上升和演化过程中易受改造，且其解译常具多解性，难以作为确凿的单一成因证据。另一方面，尽管对岩浆与变质成因辉石岩的熔融行为和产物成分已有充分研究(Kogiso等，2004；Lambart等，2012)，涉及交代辉石岩熔融行为的研究仍相对有限。目前少量研究主要针对以下几类交代辉石岩：无水富硅型(Sobolev等，2007)、含水贫硅型(Borghini等，2017；Foley等，2022；Foley和Ezad，2024)，以及金云母异常富集型(如Shu等，2024；金云母含量达33%)。然而，这些研究主要聚焦于探究俯冲板片衍生熔体成分、大洋玄武岩成因，或是克拉通及碰撞后背景下钾质-超钾质岩石的成因。这些辉石岩类型与俯冲带中由含水富硅熔体与橄榄岩反应形成的含水富硅辉石岩存在显著差异(陈龙，2023)。因此，针对此类俯冲带交代成因辉石岩的实验岩石学研究目前仍属空白(表1)，未来亟待开展针对后者的高温高压部分熔融实验研究(陈龙，2023)。

9　MASH：多过程集成与下地壳系统的最终建构

进入20世纪80年代，在地球化学全面发展和板块构造理论不断完善的情况下，安山岩研究步入思想综合阶段，其标志是从争论单一成因机制转向构建能够整合多过程的系统框架。这一转变以Gill(1981)的集大成专著与Hildreth和Moorbath(1988)提出的MASH模型为代表，共同推动了安山岩成因思想的系统化与动态化发展。

Gill(1981)在其经典著作*Orogenic Andesites and Plate Tectonics*中，将全球弧安山岩相关的地质、地球物理、岩石学和地球化学数据置于统一的板块构造框架下进行系统阐释(图1a)。其核心思想可概括为“多路径通向安山岩，但分离结晶是共同主线”。他一方面强调安山岩成因的多样性(“as many roads lead to andesite as to Rome”；图1)，充分论证了俯冲板片流体与地幔交代等地幔过程的重要性；另一方面，通过全面分析指出，Bowen、Osborn和Kuno等人建立的分离结晶机制，仍是连接深部过程与最终安山岩成分的最普遍、最核心的演化环节，尽管该理论早于板块构造的建立。Gill的工作成功弥合了板块构造理论与经典岩石成因思想之间的鸿沟，促进了受板块构造理论和地球化学分析强烈冲击的分离结晶思想的复兴，确立了安山岩成因与造山带过程的全球一致性关联，成为该领域影响深远的必引经典。若论及该书的不足之处，或许在于它完全忽略了当时尚处于萌芽阶段的辉石岩熔融模型。

之后，Hildreth和Moorbath(1988)提出了更具动力学视角的MASH模型，其核心论点为：安山岩等演化的岩石形成于地壳深部(主要是下地壳)的“复杂系统”。在该系统中，幔源玄武质岩浆的持续注入、地壳熔融、与围岩(下地壳物质)的同化、分离结晶以及不同批次或来源的熔体间的混合等多种过程同时或交替发生，并经历岩浆储存与均一化(图1a)。该模型将Bowen-Osborn-Kuno的幔源分异、Daly-DePaolo的同化作用、Eichelberger-Anderson的混合机制等经典思想整合为一个连续的、动态的物理化学框架，系统描述了幔源玄武质熔体上升并与地壳发生混合、同化、储存与分异，最终形成安山质岩浆的全过程(图1a)。MASH模型的提出，正是基于对安第斯弧的系统研究。Hildreth和Moorbath(1988)发现，安第斯火山岩的$^{143}Nd/^{144}Nd$初始比值等地球化学组成与火山锋位置的地壳厚度(或纬度)呈系统性协变关系(图7)。这一趋势被解释为：随着地壳增厚，幔源岩浆在上升过程中经历的下地壳MASH过程(尤其是与贫放射成因Nd的下地壳物质的同化作用)增强，从而在岩浆成分上留下了深刻的印记。这表明安山岩的基本成分特征(包括同位素组成)主要在下地壳层次定型，而中上地壳的改造作用相对微弱。

21世纪初，Annen等(2006)在此基础上提出“深部热区模型”，通过热力学数值模拟定量描述了玄武质岩浆注入导致下地壳形成大规模部分熔融区的过程，将幔源玄武质岩浆分异(Bowen思想的延续)和热输送与地壳熔融、AFC及混合等机制紧密耦合，构成了现代安山岩成因研究的综合思想框架。后续热力学模拟工作进一步强调了多过程协同的穿地壳岩浆系统在岩浆岩成分分异上的关键作用(Cashman等，2017；Jackson等，2018；Sparks等，2019；Blundy，2022)，基本推翻了基于高熔体比例的传统岩浆房分异模型(Daly，1911)，虽然穿地壳岩浆系统是否广泛存在仍有争议(Latypov等，2022；Zellmer等，2024)。

然而，综合模型亦存在其局限(表1)：它们精于描述岩浆演化的“过程”但忽视对演化过程起点的初始岩浆成

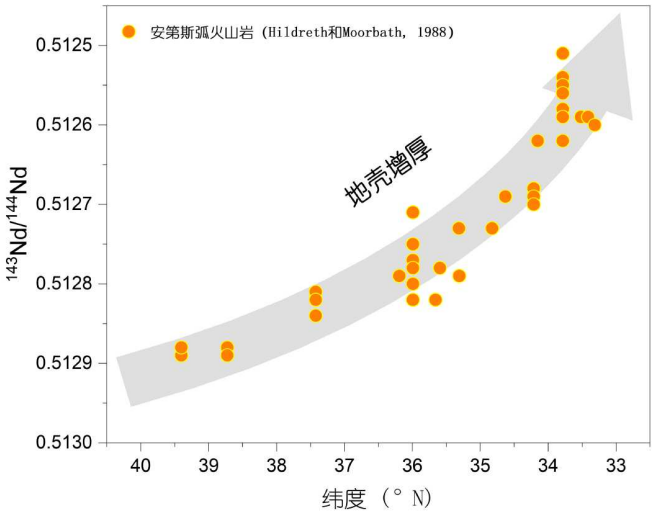


图7　MASH模型经典案例：安第斯弧安山岩Nd同位素与纬度和地壳厚度的关系。图中展示了南安第斯火山岩的$^{143}Nd/^{144}Nd$初始比值随火山锋位置纬度降低(对应地壳厚度增加)而系统性降低(富集)的趋势。该变化被解释为幔源岩浆在上升过程中，与不同厚度和成分的下地壳发生不同程度复杂相互作用(MASH过程)的结果。数据来源详见图中标注及正文引述文献

分的准确限制，基本假设幔源输入的岩浆为成分相对均一的玄武质岩浆(图1a)。因此对“源区贡献”缺乏有效约束。具体而言，初始熔体是玄武质还是安山质、是富集还是亏损、地幔源区中辉石岩与橄榄岩的相对作用等关键问题(Kelemen等，2014；Schmidt和Jagoutz，2017；Chen等，2021，2024；陈龙，2023)，仍有待综合运用地球化学示踪、实验岩石学、岩石学观察、地球物理约束和数值模拟等多学科手段加以厘定。

10　问题与展望

近期，人们对汇聚板块边缘镁铁质岩浆岩成因的研究取得了重要进展，特别是关于地幔源区形成过程和岩浆演化过程的认识不断深化(Turner和Langmuir，2022；Sisson，2025；郑永飞等，2022)，为认识安山岩成因提供了重要约束。当前，“多过程耦合”已成为学界共识，核心挑战在于如何厘清不同过程的相对贡献，以及源区过程对初始熔体成分的控制机制(图1，表1)。具体而言，当前关于安山岩成因的思想格局呈现出一个鲜明的二元困境：强调岩浆过程且占据主流地位的玄武质岩浆分异模型内部，实验岩石学支持的中-低压分离结晶路径(图2)与自然观测结合热力学模拟所要求的下地壳高压分异机制之间存在根本性争议(Annen等，2006；Gao等，2025；Sisson，2025)；同时，强调源区贡献的幔源安山质熔体模型，其地球化学信号又难以从浅部地壳过程中有效剥离(Chen等，2021)。

在这一背景下，Cai等(2025)基于全球弧火山岩熔体包裹体数据的系统校正，提出了“安山质熔体低效分离结晶与晶体-残留熔体再混合模型”。该模型建立在三项关键观察之上：(1) 校正后熔体包裹体SiO_2含量呈单峰分布(图8)；(2) 安山岩中熔体包裹体SiO_2含量系统性高于寄主岩石；(3) 斑晶平衡熔体成分与熔体包裹体高度一致但相对寄主岩石更演化。该模型指出，安山岩并非主要由基性与酸性端元混合或玄武质初始熔体分异形成(Reubi和Blundy，2009；Reubi和Müntener，2022)，而是源自地幔衍生的原始安山质熔体的低效分离结晶和再混合。安山质熔体直接产生于地幔源区中板片熔体与橄榄岩反应形成的富硅辉石岩的部分熔融(图1h)；这些熔体在上升过程中因高黏度和低晶体-熔体密度差导致结晶效率低下，晶体滞留并与演化后的残余熔体再混合，最终形成成分不均一且结构复杂的安山岩(图1a)。这一过程既可以解释安山岩中丰富的斑晶(低效分离结晶)与非平衡结构特征(斑晶-残留熔体再混合)，也揭示了安山岩相对演化的岩石化学特征的根本来源——富集富沃的辉石岩源区。该模型重申了两个研究维度的重要性：对原始安山质熔体起源的精确约束，以及对岩浆过程贡献的深入认识。

因此，未来安山岩成因研究应聚焦于以下两个方向：

(1) 深化源区探测，识别辉石岩贡献。辉石岩熔融等模型为解释安山岩所具有的“先天性”壳幔双重属性提供了机制基础(Nicholls和Ringwood，1973；Straub等，2011，2025；Zheng等，2020；Chen等，2021；陈龙，2023)。未来需综合利用对地幔源区岩性敏感的元素-同位素体系(Johnson等，2020；陈龙，2023；Straub等，2025)和地球物理探测手段(Qian等，2018)，直接识别并量化俯冲带地幔中辉石岩源区的存在与贡献。同时，亟待开展针对俯冲带交代成因含水富硅辉石岩的高温高压部分熔融实验，填补实验岩石学的关键空白(陈龙，2023)。

(2) 精确量化过程，构建动力学-热力学耦合模型。针对安山质岩浆演化的关键机制，需借助耦合动力学与热力学的数值模型(Bachmann和Huber，2019；Jackson等，2018)，系统约束其发生的物理条件(如熔体黏度、晶体含量、应变速率、岩浆房几何形态)及对最终岩浆成分的定量贡献。通过模拟晶体沉降、压实、再悬浮及对流混合等动力学过程，建立能够预测斑晶含量、成分分布及非平衡结构发育程度的定量框架。

通过对这两个维度的精细解析，我们不仅能最终揭示安山岩的形成机制，也将为理解整个俯冲带的物质循环和大陆地壳生长过程提供关键的深部约束。

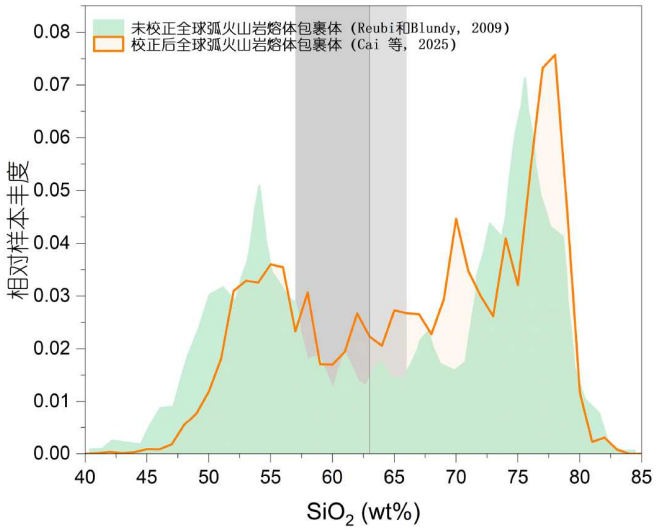


图 8　校正前后全球弧火山岩熔体包裹体SiO_2成分分布图。绿色区域为未经校正的全球弧火山岩熔体包裹体的SiO_2含量分布频率直方图。黄色曲线为经岩石和矿物比例校正后的全球弧火山岩SiO_2含量分布频率直方图。深灰色条带为安山岩的成分变化范围(SiO_2=57–63 wt.%)，浅灰色条带为平均大陆地壳成分变化范围(SiO_2=57–66 wt.%)。数据来源详见图中标注及正文引述文献

11　结语

安山岩成因研究经历了从追求“单一主导机制”到构建“多过程耦合”框架的百年范式转变。20世纪中期以来提出的八大经典模型——结晶分异、同化混染-结晶分异、地壳熔融、岩浆混合、俯冲板片熔融、含水橄榄岩熔融、辉石岩熔融及MASH模型——分别从不同角度解释了安山岩的成分特征，共同构成了现代安山岩成因研究的思想基础。

总体来说，安山岩成因模型可归纳为两类：一类强调岩浆演化过程的主导作用，包括结晶分异、同化混染-结晶分异、岩浆混合及MASH模型；另一类强调源区性质的主导作用，包括地壳熔融、俯冲板片熔融、含水橄榄岩熔融及辉石岩熔融模型。两类模型均有实验和观测证据支持，但也各自存在局限性。

自20世纪80年代以来，安山岩成因研究范式逐渐从“非此即彼”的模型争论转向多过程耦合的综合框架。Gill (1981)的系统性总结奠定了板块构造背景下安山岩研究的全球框架，而MASH模型及后续的深部热区模型则进一步将源区过程与岩浆演化过程整合为统一的动力学系统。这一框架的确立标志着安山岩成因研究进入了一个以“系统思维”为核心的新阶段，即任何单一模型都难以独立解释安山岩的全部特征，必须置于多过程耦合的连续系统中加以理解。

致谢　感谢郑永飞主编邀稿并修改论文初稿，感谢执行主编和两位匿名审稿专家提出的富有建设性的评审意见，这些意见对提升本文质量至关重要。

参考文献

陈龙. 2023. 俯冲带辉石岩熔融: 对镁铁质弧岩浆成因的启示. 中国科学: 地球科学, 53: 1694–1698
陈龙, 郑永飞. 2025. 东特提斯构造域中生代和新生代镁铁质岩浆岩地球化学成分演化及其对汇聚板块边缘构造演化的启示. 中国科学: 地球科学, 55: 1152–1178
陈伊翔, 郑永飞. 2025. 俯冲带流体地球化学. 中国科学: 地球科学, 55: 4441–4450
郑永飞, 陈伊翔, 陈仁旭, 等. 2022. 汇聚板块边缘构造演化及其地质效应. 中国科学: 地球科学, 52: 1213–1242
郑永飞. 2023. 21世纪板块构造. 中国科学: 地球科学, 53: 1–40
郑永飞, 李振新. 2025. 板块构造理论的诞生. 中国科学: 地球科学, 55: 2104–2110
Anderson A T. 1976. Magma mixing: Petrological process and volcanological tool. J Volcanol Geotherm Res, 1: 3–33
Annen C, Blundy J D, Sparks R S J. 2006. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones. J Petrol, 47: 505–539
Bachmann O, Huber C. 2019. The inner workings of crustal distillation columns; the physical mechanisms and rates controlling phase separation in silicic magma reservoirs. J Petrol, 60: 3–18
Bergantz G W, Schleicher J M, Burgisser A. 2015. Open-system dynamics and mixing in magma mushes. Nat Geosci, 8: 793–796
Blatter D L, Sisson T W, Hankins W B. 2013. Crystallization of oxidized, moderately hydrous arc basalt at mid-to lower-crustal pressures: Implications for andesite genesis. Contrib Miner Petrol, 166: 861–886
Blundy J. 2022. Chemical differentiation by mineralogical buffering in crustal hot zones. J Petrol, 63: egac054
Borghini G, Fumagalli P, Rampone E. 2017. Partial melting of secondary pyroxenite at 1 and 1.5 GPa, and its role in upwelling heterogeneous mantle. Contrib Miner Petrol, 172: 70
Bowen N L. 1928. The Evolution of the Igneous Rocks. Princeton: Princeton University Press. 334
Bowman E E, Ducea M N. 2022. Pyroxenite melting at subduction zones. Geology, 51: 383–386
Cai R J, Chen L, Li S Z. 2025. Andesite formation dominated by inefficient fractional crystallization of andesitic melt: Insights from melt inclusions. Earth Planet Sci Lett, 672: 119702
Cashman K V, Sparks R S J, Blundy J D. 2017. Vertically extensive and unstable magmatic systems: A unified view of igneous processes. Science, 355: eaag3055
Chadwick Jr W W, Paduan J B, Clague D A, et al. 2016. Voluminous eruption from a zoned magma body after an increase in supply rate at Axial Seamount. Geophys Res Lett, 43: 63–70
Chen L, Zhao Z F, Zheng Y F. 2014. Origin of andesitic rocks: Geochemical constraints from Mesozoic volcanics in the Luzong basin, South China. Lithos, 190-191: 220–239
Chen L, Zhao Z F. 2017. Origin of continental arc andesites: The composition of source rocks is the key. J Asian Earth Sci, 145: 217–232
Chen L, Zheng Y F, Zhao Z F. 2018. Geochemical insights from clinopyroxene phenocrysts into the effect of magmatic processes on petrogenesis of intermediate volcanics. Lithos, 316-317: 137–153
Chen L, Zheng Y F, Xu Z, et al. 2021. Generation of andesite through partial melting of basaltic metasomatites in the mantle wedge: Insight from quantitative study of Andean andesites. Geosci Front, 12: 101124

Chen L, Feng K, Deng J, et al. 2024. Geochemical comparison between oceanic and continental arc volcanic rocks: Insights to arc magmatism. Geol J, 59: 113–136
Coats R R. 1962. Magma type and crustal structure in the Aleutian arc. In: Macdonald G A, Kuno H, eds. The Crust of the Pacific Basin. Washington DC: American Geophysical Union. 92–109
Costa F. 2021. Clocks in magmatic rocks. Annu Rev Earth Planet Sci, 49: 231–252
Couch S, Sparks R S J, Carroll M R. 2001. Mineral disequilibrium in lavas explained by convective self-mixing in open magma chambers. Nature, 411: 1037–1039
Daly R A. 1911. The nature of volcanic action. Proc Am Acad Arts Sci, 47: 48–119
Daly R A. 1914. Igneous Rocks and Their Origin. London: McGraw-Hill. 563
Daly R A. 1933. Igneous Rocks and the Depths of the Earth. New York: McGraw-Hill. 598
Davidson J P. 1987. Crustal contamination versus subduction zone enrichment: Examples from the Lesser Antilles and implications for mantle source compositions of island arc volcanic rocks. Geochim Cosmochim Acta, 51: 2185–2198
Davidson J P, Font L, Charlier B L A, et al. 2008. Mineral-scale Sr isotope variation in plutonic rocks—A tool for unravelling the evolution of magma systems. Trans R Soc Edinburgh-Earth Sci, 97: 357–367
DeBari S M, Greene A R. 2011. Vertical stratification of composition, density, and inferred magmatic processes in exposed arc crustal sections. In: Brown D, Ryan P D, eds. Arc-Continent Collision. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 121–144
Deer W A, Wager L R. 1939. Olivines from the Skaergaard intrusion, Kangerdlugssuak, east Greenland. Am Mineral J Earth Planet Mater, 24: 18–25
Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347: 662–665
DePaolo D J. 1981. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization. Earth Planet Sci Lett, 53: 189–202
Dickinson W R, Hatherton T. 1967. Andesitic volcanism and seismicity around the Pacific. Science, 157: 801–803
Druitt T H, Costa F, Deloule E, et al. 2012. Decadal to monthly timescales of magma transfer and reservoir growth at a caldera volcano. Nature, 482: 77–80
Ducea M N, Saleeby J B, Bergantz G. 2015. The architecture, chemistry, and evolution of continental magmatic arcs. Annu Rev Earth Planet Sci, 43: 299–331
Dufek J, Bergantz G W. 2005. Lower crustal magma genesis and preservation: A stochastic framework for the evaluation of basalt-crust interaction. J Petrol, 46: 2167–2195
Dufek J, Bachmann O. 2010. Quantum magmatism: Magmatic compositional gaps generated by melt-crystal dynamics. Geology, 38: 687–690
Eichelberger J C. 1975. Origin of andesite and dacite: Evidence of mixing at Glass Mountain in California and at other circum-Pacific volcanoes. GSA Bull, 86: 1381–1391
Eichelberger J C. 1978. Andesites in island arcs and continental margins: Relationship to crustal evolution. Bull Volcanol, 41: 480–500
Elliott T, Plank T, Zindler A, et al. 1997. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc. J Geophys Res, 102: 14991–15019
Floran R J, Grieve R A F, Phinney W C, et al. 1978. Manicouagan impact melt, Quebec, 1, Stratigraphy, petrology, and chemistry. J Geophys Res, 83: 2737–2759
Foley S F, Ezad I S, van der Laan S R, et al. 2022. Melting of hydrous pyroxenites with alkali amphiboles in the continental mantle: 1. Melting relations and major element compositions of melts. Geosci Front, 13: 101380
Foley S F, Ezad I S. 2024. Melting of hydrous pyroxenites with alkali amphiboles in the continental mantle: 2. Trace element compositions of melts and minerals. Geosci Front, 15: 101692
Gao P, García-Arias M, Collins W J, et al. 2025. Polybaric differentiation for arc magma genesis: A perspective from alumina saturation index. Lithos, 512-513: 108136
Gill J B. 1981. Orogenic Andesites and Plate Tectonics. New York: Springer-Verlag. 390
Gómez-Tuena A, Straub S M, Zellmer G F. 2013. An introduction to orogenic andesites and crustal growth. Geol Soc Spec Publ, 385: 1–13
Green D H. 1973. Experimental melting studies on a model upper mantle composition at high pressure under water-saturated and water-undersaturated conditions. Earth Planet Sci Lett, 19: 37–53
Green T H, Ringwood A E. 1968. Genesis of the calc-alkaline igneous rock suite. Contrib Mineral Petrol, 18: 105–162
Grove T L, Kinzler R J. 1986. Petrogenesis of andesites. Annu Rev Earth Planet Sci, 14: 417–454
Grove T L, Elkins-Tanton L T, Parman S W, et al. 2003. Fractional crystallization and mantle-melting controls on calc-alkaline differentiation trends. Contrib Miner Petrol, 145: 515–533
Grove T L, Baker M B, Price R C, et al. 2005. Magnesian andesite and dacite lavas from Mt. Shasta, northern California: Products of fractional crystallization of H_2O-rich mantle melts. Contrib Miner Petrol, 148: 542–565
Grove T L, Till C B, Krawczynski M J. 2012. The role of H_2O in subduction zone magmatism. Annu Rev Earth Planet Sci, 40: 413–439
Grove T L, Brown S M. 2018. Magmatic processes leading to compositional diversity in igneous rocks: Bowen (1928) revisited. Am J Sci, 318: 1–28
Hawkesworth C J, Gallagher K, Hergt J M, et al. 1993. Trace element fractionation processes in the generation of island arc basalts. Philos Trans R Soc London Ser A-Phys Eng Sci, 342: 179–191
Hickey-Vargas R. 1991. Isotope characteristics of submarine lavas from the Philippine Sea: Implications for the origin of arc and basin magmas of the Philippine tectonic plate. Earth Planet Sci Lett, 107: 290–304
Hildreth W, Moorbath S. 1988. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. Contrib Mineral Petrol, 98: 455–489
Hirose K. 1997. Partial melt compositions of carbonated peridotite at 3 GPa and role of CO_2 in alkali-basalt magma generation. Geophys Res Lett, 24: 2837–2840
Holmes A. 1932. The origin of igneous rocks. Geol Mag, 69: 543–558
Huber C, Bachmann O, Dufek J. 2012. Crystal-poor versus crystal-rich ignimbrites: A competition between stirring and reactivation. Geology, 40: 115–118
Isacks B, Oliver J, Sykes L R. 1968. Seismology and the new global tectonics. J Geophys Res, 73: 5855–5899
Jackson M D, Blundy J, Sparks R S J. 2018. Chemical differentiation, cold storage and remobilization of magma in the Earth's crust. Nature, 564: 405–409
Jagoutz O, Schmidt M W. 2012. The formation and bulk composition of modern juvenile continental crust: The Kohistan arc. Chem Geol, 298-299: 79–96
Jagoutz O, Kelemen P B. 2015. Role of arc processes in the formation of continental crust. Annu Rev Earth Planet Sci, 43: 363–404
Johnson C, Beard B, Weyer S. 2020. High-temperature Fe isotope geochemistry. In: Iron Geochemistry: An Isotopic Perspective. Cham: Springer International Publishing. 85–147
Kay R W. 1978. Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific ocean crust. J Volcanol Geotherm Res, 4: 117–132

Kelemen P B, Yogodzinski G M, School D W. 2003. Along-strike variation in the Aleutian island arc: Genesis of high Mg# andesite and implications for continental crust. Geophys Monogr Ser, 138: 223–276

Kelemen P B, Hanghoj K, Greene A R. 2014. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. Treat Geochem, 3: 593–659

Kent A J R, Darr C, Koleszar A M, et al. 2010. Preferential eruption of andesitic magmas through recharge filtering. Nat Geosci, 3: 631–636

Kessel R, Schmidt M W, Ulmer P, et al. 2005. Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical liquids at 120–180 km depth. Nature, 437: 724–727

Kogiso T, Hirschmann M M, Pertermann M. 2004. High-pressure partial melting of mafic lithologies in the mantle. J Petrol, 45: 2407–2422

Kuno H. 1950. Petrology of Hakone volcano and the adjacent areas, Japan. GSA Bull, 61: 957–1020

Kuno H. 1959. Origin of Cenozoic petrographic provinces of Japan and surrounding areas. Bull Volcanol, 20: 37–76

Kushiro I. 1972. Effect of water on the composition of magmas formed at high pressures. J Petrol, 13: 311–334

Lambart S, Laporte D, Provost A, et al. 2012. Fate of pyroxenite-derived melts in the peridotitic mantle: Thermodynamic and experimental constraints. J Petrol, 53: 451–476

Langmuir C H, Vocke Jr. R D, Hanson G N, et al. 1978. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts. Earth Planet Sci Lett, 37: 380–392

Latypov R, Chistyakova S, Barnes S J, et al. 2022. Chromitite layers indicate the existence of large, long-lived, and entirely molten magma chambers. Sci Rep, 12: 4092

Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. Lithos, 79: 1–24

Mitchell A L, Grove T L. 2015. Melting the hydrous, subarc mantle: The origin of primitive andesites. Contrib Miner Petrol, 170: 13

Nandedkar R H, Ulmer P, Müntener O. 2014. Fractional crystallization of primitive, hydrous arc magmas: An experimental study at 0.7 GPa. Contrib Miner Petrol, 167: 1015

Nicholls I A, Ringwood A E. 1973. Effect of water on olivine stability in tholeiites and the production of silica-saturated magmas in the island-arc environment. J Geol, 81: 285–300

Osborn E F. 1959. Role of oxygen pressure in the crystallization and differentiation of basaltic magma. Am J Sci, 257: 609–647

Perugini D, Poli G. 2012. The mixing of magmas in plutonic and volcanic environments: Analogies and differences. Lithos, 153: 261–277

Perugini D, De Campos C P, Ertel-Ingrisch W, et al. 2012. The space and time complexity of chaotic mixing of silicate melts: Implications for igneous petrology. Lithos, 155: 326–340

Pichler H, Zeil W. 1971. The Cenozoic rhyolite-andesite association of the Chilean Andes. Bull Volcanol, 35: 424–452

Plank T. 2005. Constraints from thorium/lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents. J Petrol, 46: 921–944

Plank T, Langmuir C H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. Chem Geol, 145: 325–394

Poldervaart A. 1955. Chemistry of the earth's crust. Geol Soc Am Spec Pap, 62: 119–144

Qian W, Wang W, Zou F, et al. 2018. Elasticity of orthoenstatite at high pressure and temperature: Implications for the origin of low V_P/V_S zones in the mantle wedge. Geophys Res Lett, 45: 665–673

Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. J Petrol, 36: 891–931

Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. Chem Geol, 160: 335–356

Reubi O, Blundy J. 2009. A dearth of intermediate melts at subduction zone volcanoes and the petrogenesis of arc andesites. Nature, 461: 1269–1273

Reubi O, Müntener O. 2022. Making andesites and the continental crust: Mind the step when wet. J Petrol, 63: egac044

Schmidt M W, Jagoutz O. 2017. The global systematics of primitive arc melts. Geochem Geophys Geosyst, 18: 2817–2854

Shu C, Foley S F, Ezad I S, et al. 2024. Experimental melting of phlogopite websterite in the upper mantle between 1.5 and 4.5 GPa. J Petrol, 65: egae030

Sisson T W, Grove T L. 1993. Experimental investigations of the role of H_2O in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatism. Contrib Mineral Petrol, 113: 143–166

Sisson T W. 2025. Igneous differentiation in arcs. In: Treatise on Geochemistry. 3rd ed. Elsevier. 703–743

Sobolev A V, Hofmann A W, Kuzmin D V, et al. 2007. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts. Science, 316: 412–417

Sparks R S J, Annen C, Blundy J D, et al. 2019. Formation and dynamics of magma reservoirs. Phil Trans R Soc A, 377: 20180019

Sparks R S, Huppert H E, Koyaguchi T, et al. 1993. Origin of modal and rhythmic igneous layering by sedimentation in a convecting magma chamber. Nature, 361: 246–249

Stern R A, Hanson G N. 1991. Archean high-Mg granodiorite: A derivative of light rare earth element-enriched monzodiorite of mantle origin. J Petrol, 32: 201–238

Stern R J. 2002. Subduction zones. Rev Geophys, 40: 1012

Straub S M, LaGatta A B, Martin-Del Pozzo A L, et al. 2008. Evidence from high-Ni olivines for a hybridized peridotite/pyroxenite source for orogenic andesites from the central Mexican Volcanic Belt. Geochem Geophys Geosyst, 9: Q03007

Straub S M, Gomez-Tuena A, Stuart F M, et al. 2011. Formation of hybrid arc andesites beneath thick continental crust. Earth Planet Sci Lett, 303: 337–347

Straub S M, Batanova V, Sobolev A, et al. 2025. Olivines Fo-Ni-MnO systematics in the trans-Mexican volcanic belt: Evidence for cool and silicic primary arc magmas. J Petrol, 66: egaf094

Tatsumi Y. 1989. Migration of fluid phases and genesis of basalt magmas in subduction zones. J Geophys Res, 94: 4697–4707

Tatsumi Y, Hamilton D L, Nesbitt R W. 1986. Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas: Evidence from high-pressure experiments and natural rocks. J Volcanol Geotherm Res, 29: 293–309

Taylor S R, White A J R. 1965. Geochemistry of andesites and the growth of continents. Nature, 208: 271–273

Thorpe R S, Francis P W, O'Callaghan L. 1984. Relative roles of source composition, fractional crystallization and crustal contamination in the petrogenesis of Andean volcanic rocks. Philos Trans R Soc London Ser A Math Phys Sci, 310: 675–692

Turner S J, Langmuir C H. 2022. A quantitative framework for global variations in arc geochemistry. Earth Planet Sci Lett, 584: 117411

Waters L E, Cottrell E, Coombs M L, et al. 2021. Generation of calc-alkaline magmas during crystallization at high oxygen fugacity: An experimental and petrologic study of tephras from Buldir Volcano, Western Aleutian Arc, Alaska, USA. J Petrol, 62: egaa104

Wyllie P J. 1977. Crustal anatexis: An experimental review. Tectonophysics, 43: 41–71

Wyllie P J, Sekine T. 1982. The formation of mantle phlogopite in

subduction zone hybridization. Contrib Mineral Petrol, 79: 375–380
Young D A. 2003. Mind over Magma: The Story of Igneous Petrology. Princeton: Princeton University Press. 686
Zellmer G F. 2008. Some first-order observations on magma transfer from mantle wedge to upper crust at volcanic arcs. Geol Soc Lond Spec Publ, 304: 15–31
Zellmer G F, Iizuka Y, Straub S M. 2024. Origin of crystals in mafic to intermediate magmas from circum-pacific continental arcs: Transcrustal magmatic systems versus transcrustal plutonic systems. J Petrol, 65: egae013
Zheng Y F. 2019. Subduction zone geochemistry. Geosci Front, 10: 1223–1254
Zheng Y F, Xu Z, Chen L, et al. 2020. Chemical geodynamics of mafic magmatism above subduction zones. J Asian Earth Sci, 194: 104185

（责任编委：郑永飞）