

# 花岗岩问题两百年：争论、演进与启示

马昌前

中国地质大学(武汉) 地球科学学院,地质过程与成矿预测全国重点实验室,武汉 430074

**摘要:** 花岗岩(广义)作为地球上最常见且极具标志性的岩石,其岩石成因问题长期以来是地质学研究的核心议题。围绕花岗岩问题的争论贯穿了地质学发展的两个多世纪,不仅催生了多个理论学派,也推动了地质学理论的演进与技术方法的革新。本文系统梳理了花岗岩问题的科学争论与发展历程,并探讨其对地质学理论与学科发展的深远影响。首先回顾了花岗岩问题的五个主要争论阶段:从18世纪末水成论与火成论的对立,到19世纪至20世纪中期变成派与岩浆派的分歧,再到19世纪中至20世纪末关于“空间问题”的原地派与异地派之争,以及20世纪中期以来分异派与深熔派关于岩浆起源与演化的讨论,直至21世纪以来围绕岩浆房与岩浆晶粥储库的前沿之争。本文重点分析了这些争论中涉及的关键科学问题,包括岩浆产生的物质来源与热源机制、地壳熔融与幔源岩浆分异过程、大型侵入体的侵位与组装模式,以及晶粥系统的结晶分异与熔体抽取过程等。随后,总结了花岗岩研究的科学演进逻辑,探讨了技术进步、多学科交叉及社会需求在推动花岗岩研究深化中的关键作用。本文进一步分析了这些争论所带来的理论创新与方法论提升,强调学术争论对未来花岗岩研究的驱动效应,以及全球视角整合与区域性研究结合的重要性。最后,指出了花岗岩问题不仅对地球科学具有基础性意义,同时也为行星地质学提供了独特的研究启示,助力揭示地外天体形成与演化的关键过程。

**关键词:** 花岗岩问题;研究历程;岩浆起源;分离结晶;地壳演化;行星地质

中图分类号: P588.12<sup>+1</sup> 文章编号: 1007-2802(2025)02-0219-31 doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240170

## Two centuries of the granite problem: Debates, evolution, and implications

MA Chang-qian

State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, School of Earth Sciences,  
China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

**Abstract:** Granite (*sensu lato*) is one of the most abundant and geologically significant rock types on Earth, and its petrogenesis has long been a central focus of geological research. The enduring debate surrounding the “granite problem” has spanned more than two centuries, not only giving rise to multiple theoretical schools but also significantly advancing geological theories and analytical techniques. This study systematically reviews the historical progression of scientific debates on the granite problem and explores their profound implications for geological theories and the broader development of the discipline. We first review the five major stages of debate on the granite problem: from the late 18th-century confrontation between Neptunism and Plutonism, to the disputes between the metamorphic-origin and magmatic-origin schools from the 19th century to the mid-20th century, followed by the mid-19th to late 20th-century debate over the “space problem” between the autochthonous and allochthonous models, the mid-20th-century discussions between differentiationists and anatexis advocates on the origin and evolution of granitic magma, and finally, the 21st-century frontier debates on magma chambers versus magma mush reservoirs. This study focuses on key scientific questions arising from these debates, including the material and heat sources driving magma generation, the crustal melting versus differentiation processes of mantle-derived magmas, the emplacement and assembly of large intrusions, and the crystallization

收稿编号:2025-0022,2025-02-04 收到,2025-02-23 改回

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(42130309)

作者简介:马昌前(1958—),男,博士,教授,研究方向:岩石学、岩浆动力学、花岗岩地质学. email: cqma@cug.edu.cn

引用此文:

马昌前. 2025. 花岗岩问题两百年:争论、演进与启示. 矿物岩石地球化学通报,44(2):219-249

Ma C Q. 2025. Two centuries of the granite problem: Debates, evolution, and implications. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 44(2):219-249

differentiation and melt extraction in crystal mush systems. We then summarize the scientific evolution of granite research and discuss the crucial roles of technological advancements, interdisciplinary collaboration, and social needs in driving further progress in granite research. Furthermore, we analyze how these debates have fostered theoretical innovations and methodological advancements, emphasizing the role of academic discourse in shaping future granite research and the importance of integrating global perspectives with regional investigations. Finally, we highlight that the granite problem holds fundamental significance not only for Earth sciences but also for planetary geology, offering unique insights into the formation and evolution of extraterrestrial bodies.

**Key words:** granite problem; research history; magma origin; fractional crystallization; crustal evolution; planetary geology

## 0 引言

关于花岗岩这一话题,我心中总是难以平静。

——James Hutton(1788)《地球的理论》

在这个节奏匆忙的时代,地质学家们不妨放慢脚步,静心回顾哪怕是地质学中这一小部分的历史,必将对他们有所裨益。

——Herbert Harold Read(1957)《花岗岩的争论》,第XIII页

建立能解释多数地质事实的模式,是当前认知的需要。

——周新民(2003)

花岗岩镌刻在大陆地壳之上,却始终笼罩着神秘的面纱。自地质学诞生以来,它便令人困惑,至今仍未完全揭晓其奥秘。

——Antonio Castro(2014)

“花岗岩”一词的英文源自意大利语。最早由佛罗伦萨学者切萨尔皮诺(Andreas Caesalpinus, 1524—1603)于1596年提出,泛指粒状岩石。到了1787年,水成论的奠基人魏尔纳(Abraham Gottlob Werner)明确将其定义为由石英、长石和云母组成的岩石(Tomkeieff, 1983),标志着花岗岩正式进入科学研究领域。至于“花岗岩”一词在中文中的最早记载,在1872年美国传教士玛高温(D.J. MacGowan)与华蘅芳合作翻译的《金石识别》中还称为“合拉尼脱石”,到1899年傅兰雅和潘松合译的《求矿指南》(卷二,第29页)中,称为“花刚石”(使用的是“刚”)。

关于花岗岩的定义,学界存在狭义和广义之分。按照国际岩石学QAPF分类方案,狭义花岗岩(granite s.s.)专指正长花岗岩和二长花岗岩,而广义花岗岩(granite s.l.)则涵盖碱长花岗岩、正长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩及英云闪长岩,统称花岗岩类(马昌前等, 2023)。还有一种认识是,石英含量大于20%,且碱性长石占有长石总量的2/3以上但低于90%的长英质侵入岩可归入狭义花岗岩,而QAP图解中石英体

积分数大于5%的长英质侵入岩则属于广义花岗岩范畴。本文讨论的花岗岩均指广义花岗岩。

花岗岩是大陆地壳的重要组成部分,其体积约 $3.75 \times 10^9 \text{ km}^3$ (Bonin, 2007)。尽管仅占地球总体积的不到0.35%,它却是大陆地壳的标志性岩石,其广泛分布成为地球区别于太阳系其他行星和月球的关键特征。例如,中国东南部晚中生代花岗岩和流纹质火山岩分布极为广泛,覆盖浙赣闽粤四省39%的面积(Zhou and Li, 2000)。

花岗岩的成分、结构与分布特征承载着大陆地壳演化的重要信息(翟明国等, 2016)。其富硅、低铁镁、低密度和高强度的化学物理特性,使其在板块构造和大陆生长演化研究中占据核心地位,同时在工程地质与核废料处置方面亦具重要应用价值(Gibb and Attrill, 2003; 朱弟成等, 2018)。尤其是,与花岗岩相关的矿产资源极为丰富,众多关键矿产赋存于花岗岩体内或周缘,这不仅提升了研究其成因与演化的现实意义,也促进了地球科学的深入发展(陈骏等, 2014; 国家自然科学基金委员会和中国科学院, 2023)。

过去两个多世纪里,关于花岗岩的成因问题,学界争论不休,形成了一系列著名的“花岗岩问题”。18世纪末,“水成论”与“火成论”之争奠定了现代地质学的基础(Dean, 1992),也开启了对花岗岩成因的系统研究。19—20世纪,变成论者提出固态化学转变假说,进一步引发了关于花岗岩成因及“空间问题”的新一轮讨论(Pitcher, 1997)。20世纪中期以来,岩浆分异与深熔作用逐渐成为研究热点,推动了熔融机制和岩浆演化过程的突破性认识。

尽管研究不断深化,关于花岗岩成因的争论仍层出不穷,例如壳幔物质贡献、熔融机制、花岗岩成因类型、侵位方式、构造背景、岩浆分异、岩浆房与晶粥模型等问题。这些讨论不仅映射出大陆地壳演化的复杂性,也彰显了多学科交叉研究在地球科学中的重要性。

中国是全球花岗岩分布最广的国家之一,在该领

域的研究取得了诸多重要进展,积累了大量数据,并逐步跻身国际前沿(翟明国等,2016)。在学科发展的关键阶段,系统回顾“花岗岩问题”的争论及其演进历程,对于推动未来研究具有重要意义。

20年前, Davis A. Young(2003)在《驾驭岩浆:火成岩岩石学的故事》中,对火成岩岩石学的历史进行了全面解析。近期, González-Esvertit等(2025)基于库恩范式论,回顾了过去200余年花岗岩研究的理论演变。然而,国内外尚缺少聚焦“花岗岩问题”争论与演进历史的系统总结。

本文旨在回顾花岗岩成因问题的研究历程,探讨其对科学方法和地质学发展的启示,并以此缅怀我国著名的岩石学家周新民教授。

花岗岩问题博大精深,相关文献浩如烟海,历史人物不胜枚举,学术观点交错纷呈。限于作者才学,文中疏漏在所难免,诚盼读者批评指正。

## 1 花岗岩问题的争论

### 1.1 早期争论:水成论与火成论的对抗(18世纪末至19世纪初)

1.1.1 水成论的兴起与衰落 18世纪末,地质学逐渐从自然哲学中独立出来,围绕岩石成因的争论成为其发展的关键议题。其中,水成论(Neptunism)主张,包括花岗岩在内的结晶岩由远古海洋沉淀形成,其主要倡导者是德国弗赖贝格矿业学院教授魏尔纳(Abraham Gottlob Werner, 1749—1817)。1776年,他在考察萨克森州玄武岩山时,未找到火山成因的直接证据,由此提出所有结晶岩均源于矿物富集的海水沉淀(Young, 2003)。魏尔纳坚信地球内部并不存在熔融状态,并认为火山活动是近代才出现的现象。

凭借卓越的学术声誉和教学影响力,魏尔纳吸引了欧洲各地的众多学生前来学习。其中包括沃伊辛(Jean-François d'Aubuisson de Voisins, 1769—1841)、洪堡(Alexander von Humboldt, 1769—1859)、布赫(Leopold von Buch, 1774—1853)和詹姆森(Robert Jameson, 1774—1854)等。这些学者深受魏尔纳影响,积极传播水成论。他们通过沉积层序和沉积物分布的研究,进一步强化了水成作用在岩石形成中的重要性,使其在当时声名大噪。

然而,随着研究的深入,水成论的局限性逐渐显现。它无法合理解释火山岩的分布、高温特征,以及花岗岩的粗粒结构、与变质岩的侵入接触关系和花岗岩脉的穿插现象(Marmo, 1967)。例如,水成论者曾将北爱尔兰Portrush地区的含菊石结晶岩视为化学沉淀产物的证据,但后续研究表明,这些岩石实际上是热变

质作用的产物(Cobbing, 2000)。类似反例不断削弱水成论的科学基础,导致其逐渐衰落。

尽管最终被淘汰,水成论仍在早期地质学的发展中发挥了重要作用。它强调水在地质过程中的作用,推动了沉积学、地层学和古生物学的建立,并促使地质学从经验观察走向实验验证,为岩石学的诞生奠定了基础。值得注意的是,“岩石学”(最初拼写为petralogy)一词由苏格兰历史学家平克顿(John Pinkerton, 1758—1826)于1811年提出(Young, 2003)。水成论的兴起与衰落,不仅反映了地质学从单一理论向多元解释的演进,也标志着地质学从自然哲学向实证科学迈出了关键一步。

1.1.2 火成论的崛起与胜利 18世纪中叶,俄国学者Lomonosov在《地球的分层》中首次区分了次生岩石和原生岩石,为火成论奠定了思想基础(Zubkov, 1967)。早在1796年,R. Kirwan就提出了“火成岩”一词(Tomkeieff, 1983),但真正确立火成论(Plutonism)的是苏格兰地质学家赫顿(James Hutton, 1726—1797)。他在1788年出版的《地球的理论》中,通过对苏格兰高地的野外观察,发现花岗岩脉侵入变质岩,推断其来源于地球深部熔融物质的冷却结晶(Cobbing, 2000)。赫顿的理论强调地球内部热能的作用,并与他的学生、苏格兰地质学家莱伊尔(Charles Lyell, 1797—1875)提出的均变论相呼应,共同构筑了现代地质学的重要基石。

赫顿的学术经历颇具传奇色彩。他最初学习医学,随后转向农学,最终投身地质学。正因如此,欧洲学术界一度将他视为“业余科学家”。甚至在他去世后不久,爱丁堡还成立了一个“魏尔纳学会”,以捍卫魏尔纳的权威地位。然而,在赫顿的两位忠实追随者——普雷费尔(John Playfair, 1748—1819)和莱伊尔的大力宣传下,火成论逐渐获得广泛认可(Touret and Nijland, 2002)。

“火成论”的崛起首先得益于实验的支持。苏格兰地质学家霍尔(James Hall, 1761—1832)在18世纪90年代进行了一系列岩石熔融与结晶实验,试图验证赫顿的观点。他发现,熔化后的岩石若快速冷却,会形成黑色玻璃,而缓慢冷却则会产生结晶结构,从而验证了火成岩的形成机制(Young, 2003)。由于18世纪的岩石化学分析极为困难,直到1798年底,肯尼迪(Robert Kennedy)才发表关于火成岩化学成分的相关研究成果(Young, 2003)。随后,一系列岩石化学分析实验进一步揭示了玄武岩与现代火山熔岩在成分上的一致性,从化学角度为火成论提供了有力的科学依据。

1802年,普雷费尔在爱丁堡出版了厚达528页的

《赫顿地球的理论阐述》一书,系统总结了赫顿的研究成果(Touret and Nijland, 2002)。1826年,苏格兰地质学家麦卡洛克(John Macculloch, 1773—1835)进一步梳理了火成论的证据。他详细描述了花岗岩与围岩的接触关系,尤其是角砾化现象和热接触变质作用,并指出这些特征与水成论相矛盾。此外,他还提出花岗岩与深成岩在成因上的一致性,进一步巩固了火成论的地位。

尽管显微镜早在17世纪便已问世,但直到19世纪中叶,英国地质学家索比(Henry Clifton Sorby, 1826—1908)和德国科学家A. Oschatz于1849年独立研发了岩石薄片磨制技术,才使偏光显微镜成为研究岩石的重要工具(Young, 2003)。这一技术突破使地质学家能够在微观尺度上研究矿物成分和结构,为火成论提供了更精确的证据。

19世纪后半叶,德国矿物学家福格尔桑(Hermann Vogelsang, 1838—1874)、齐克尔(Ferdinand Zirkel, 1838—1912)和罗森布施(Harry Rosenbusch, 1836—1914)相继发表了显微镜岩相学的研究成果(Vogelsang, 1867; Zirkel, 1873; Rosenbusch, 1873, 见Young, 2003)。他们不仅系统鉴定了火成岩中的矿物种类,估计了矿物含量,还分析了矿物的结晶顺序,最终确认花岗岩是由岩浆冷却结晶形成的(Cobbing, 2000)。罗森布施所著的《显微镜岩相学》一书为岩石学的发展奠定了坚实的基础(Marmo, 1967)。此外,美国地质学家伊丁斯(Joseph Paxson Iddings, 1857—1920)提出了“斑晶”一词,用以描述火成岩的结晶过程(Iddings, 1889)。

莱伊尔虽然是火成论的积极倡导者,但他并未明确“火成岩”这一统一概念。在1833年出版的《地质学原理》(第三卷)中,他将岩石划分为水成岩、火山岩、侵入岩和变质岩四类,其中的火山岩与侵入岩属于独立的岩类(Read, 1957)。1866年,德国地质学家冯·科塔(Bernhard Von Cotta, 1808—1879)将岩石划分为火山岩、侵入岩、变质岩和沉积岩(Young, 2003)。直到1938年, Kennedy W. Q. 和 Anderson P. M. 在一篇论文中,才正式提出将火山岩与侵入岩统称为火成岩(Read, 1957),从而确立了现代岩石学的三大类岩石分类体系。

19世纪,火成论逐渐取代水成论,成为主流,并推动了现代岩石学的建立。然而,当时对岩浆侵位机制和冷却过程的认识仍然有限,这促使20世纪岩浆成因理论进一步发展(Dean, 1992)。火成论的胜利不仅标志着地质学从哲学推演迈向科学实证,也促进了岩浆作用与岩石循环的深入研究。赫顿、霍尔和麦卡洛克

的贡献,充分展现了创新科学方法在地质学发展中的核心作用。

为纪念赫顿对地质学的贡献,自1987年在赫顿的家乡爱丁堡举办首届“赫顿研讨会”以来,该会议地质学界每四年召开一次,重点探讨花岗岩及相关岩石成因问题。2019年第九届赫顿研讨会在中国南京大学成功举办(Zheng et al., 2021)。这一学术传统不仅体现了赫顿思想的深远影响,也凸显了花岗岩成因研究在岩石学中的重要地位。

## 1.2 理论扩展: 变成派与岩浆派的分歧 (19世纪至20世纪中期)

### 1.2.1 变成派: 花岗岩化学说的提出与衰退

19世纪末至20世纪初,关于花岗岩的成因,学术界形成了两种主要观点: 花岗岩化学说(变成派)与花岗岩浆说(岩浆派)。变成派认为,花岗岩是由地壳深部的其他岩石在化学作用下转化而成,而岩浆派则主张花岗岩主要来源于岩浆的冷凝固晶。这场学术争论异常激烈,甚至一度升级至人身攻击。

(1) 花岗岩化学说的提出与发展: 变成派的奠基人是芬兰岩石学家赛德荷姆(Jakob Johannes Sederholm, 1863—1934), 而英国地质学家里德(Herbert Harold Read, 1889—1970)则是该学派的代表性人物。里德长期致力于花岗岩成因研究,并在《花岗岩的争论》一书中收录了他在1939—1954年间发表的8篇演讲,系统阐述了花岗岩化理论(Read, 1957)。他认为,花岗岩化是一种固态岩石在未经岩浆阶段,直接转变为花岗岩的过程。

变成派的思想可追溯至早期的变质作用理论。1824年, Ami Boué 提出, 地下热流与气体可促使片岩、砂岩等逐步转化为花岗岩(Read, 1957, p.91)。1833年, 莱伊尔(Charles Lyell)在《地质学原理》中提出了“变质”的概念, 认为地下热、热水、蒸汽及其他气体可渗透多孔岩石, 引发化学分解与重组, 从而改变岩石的成分和结构(Read, 1957)。19世纪中叶, 法国地质学家进一步发展“花岗岩化”与“长石化”理论, 发现某些地区的围岩在变质与长石化过程中逐步转变为花岗岩(Gilluly, 1948, p.9)。

1841年, Deville 提出“矿化剂”(mineralizing agents)概念。他认为挥发性气体可促进固态岩石的交代作用(Holmes, 1945; Reynolds, 1947)。19世纪末, Michel-Lévy、Lacroix、Barrois 等通过对比利牛斯山、布列塔尼等地区的研究, 进一步论证了围岩在矿化剂、挥发分和流体作用下会发生化学成分改变, 并最终趋于花岗岩化的过程(Read, 1957)。

芬兰岩石学家赛德荷姆不仅是一位杰出的野外

地质学家,还凭借其精通瑞典语、芬兰语、德语、英语和法语的优势,创造了多个岩石学术语。1907年,他在研究芬兰南部片麻岩与花岗岩的接触关系时,首次提出“混合岩”(migmatite)概念,用以描述同时具片麻岩和花岗岩特征的过渡性岩石(Sederholm, 1907)。他特别强调“岩汁”(ichor)在混合岩形成过程中的作用,并试图将变质作用与岩浆作用相结合,为花岗岩化提供更综合的解释框架(Young, 2003)。然而,Read(1948)认为,这一理论仍未形成现代意义上的花岗岩化模式(Gilluly, 1948, p.9)。

变成派内部也存在分歧,主要表现为“湿派”与“干派”之争。湿派学者强调“岩汁”与流体作用的关键性。相反,1937年,Perrin和Roubault则主张固态扩散才是花岗岩化的主导机制,并否定液态物质的影响(Bowen, 1948)。Perrin(1956)通过实验和地质观察,提出固态岩石置换形成花岗岩的假说,认为花岗岩中长石晶体与围岩中的相似,表明其可能在固态条件下逐渐形成。

Reynolds(1943, 1944)研究爱尔兰Newry花岗闪长岩时,通过化学分析揭示了花岗岩化的潜在机理。她认为,奥长花岗岩的形成涉及角岩中Na-Ca-Si组分的引入,而黑云母富集边缘带的形成则与Al-Fe-Mg-K-Ti-P-Mn等组分的迁移相关(Reynolds, 1944)。

挪威岩石学家巴尔特(Thomas F.W. Barth, 1899—1971)进一步提出,花岗岩不仅是热量的被动载体,更是一种活跃的介质,能够在较大范围内传递热量和物质,甚至远离接触带的区域也可能发生花岗岩化(Barth, 1948)。一些极端的花岗岩化支持者甚至认为,所有大型花岗岩基都可能通过置换作用形成(Gilluly, 1948, p.80)。

Perrin(1956)在探讨花岗岩化机制时提出一系列问题:“这种作用是通过静态扩散完成,还是依赖热溶液的循环运输?它是否与混合岩化和变质作用相关?”Read(1957)进一步发展了交代作用的思想,提出热液作用、矿物重结晶及局部元素迁移等具体变成机制。

变成派学者的核心观点在于强调岩石成分和结构的连续性。例如,赛德荷姆(Sederholm, 1923)观察到,花岗岩与围岩之间并不存在岩浆侵入模式所描述的清晰界面,而是呈现渐变过渡的特征(Cobbing, 2000)。Backlund(1938, 1946)的研究认为,环斑花岗岩的特征(如环斑结构、水平层理)难以用岩浆冷却解释,而更可能是由砂岩或古老岩石的交代作用形成。

(2) 岩浆派的挑战与花岗岩化学说的衰退: 18世纪末至19世纪初,法国和英国的学者开始对玄武岩及类似岩石进行熔融实验,这是实验岩石学的早期尝

试(Zubkov, 1967)。19世纪中叶,美国地质学家达纳(James Dwight Dana, 1813—1895)和爱尔兰地质学家霍顿(Samuel Haughton, 1821—1897)初步奠定了岩浆派的理论基础(Dana, 1849; Haughton, 1862)。进入20世纪,大陆漂移学说的创立者魏格纳(Alfred Lothar Wegener, 1880—1930)在1915年出版的《海陆的起源》第六章中,描述了大西洋两岸尚未分离时花岗岩侵入围岩的现象。他指出,新花岗岩侵入到巴西米纳斯吉拉斯省和戈亚斯省的米纳斯系地层,形成了金矿脉,也侵入到圣保罗省的米纳斯系中(魏格纳, 2006)。

在实验岩石学领域,鲍文(Bowen, 1948)系统研究了岩浆分异过程,提出花岗岩的化学组成和矿物特征可以通过岩浆分异解释。他指出,花岗岩体中常见环带斜长石,如果其生长依赖于固态扩散机制,其成分应趋于均一。然而,连厘米级的扩散均一化都未能在长石中出现,更难以通过扩散来解释横跨数千千米的花岗岩体的形成(Bowen, 1948)。

在19世纪晚期至20世纪初,变成派与岩浆派的争论愈演愈烈。变成派主要由英国、法国和斯堪的纳维亚的学者代表,主张花岗岩主要由交代作用形成;而岩浆派则主要由德国、瑞士和北美的学者支持,强调岩浆过程在花岗岩成因中的主导地位。在1947年美国地质学会的会议上,Gilluly(1948)主持讨论,两派均认可对方理论存在合理的方面,但对于花岗岩形成的主导机制仍存在分歧。Bowen(1948)批评花岗岩化学说缺乏实验验证,强调应结合物理化学原理进行研究,而Read(1943)则质疑岩浆成因理论的适用性,认为其难以解释大规模花岗岩体的存在,并指出大量野外证据不容忽视。他提出,花岗岩主要通过先存岩石的花岗化过程形成,仅涉及少量花岗岩浆;但地壳岩石的部分熔融可能有所参与。总体而言,变成派认为,自然界的花岗岩,交代成因者要多于岩浆成因者。对此,加拿大地质学家戴利(Reginald Aldworth Daly, 1871—1957, 鲍文的博士生导师)专门撰文提出批评(Daly, 1949)。

随着偏光显微镜的广泛使用和实验岩石学的发展,岩浆派的观点逐渐占据主流。19世纪末,罗森布施的研究表明,岩浆液体大规模渗透变质岩的可能性极低(Cobbing, 2000)。花岗岩中长石巨晶的成因,一直存在“斑晶”与“变斑晶”之争(Vernon, 1986),这一争论实际上是岩浆派与变成派分歧的延伸。早在20世纪30年代,何作霖先生就对北京西山周口店花岗闪长岩中的钾长石巨晶进行了岩相学研究,并明确其为岩浆结晶的产物(马昌前和王人镜, 1990)。

20世纪中期, Luth和Tuttle(1969)的实验表明,除非在极高压力(约 $10^3$  MPa)条件下,才能形成足以交代花岗岩成分的流体相,而要形成同时包含长石和石英的气相,则需花岗质岩浆的存在。因此,交代作用难以形成大规模花岗岩。Winkler(1965)进一步指出,由高碱富硅的“岩汁”通过远距离交代作用形成体积达数立方千米的岩石,并发生“花岗岩化”的假设缺乏支持。

尽管花岗岩化理论未能经受严格验证,其强调的深熔作用和混合岩研究仍影响深远(Cobbing, 2000; Young, 2003)。Kennedy和Anderson(1938)提出的花岗岩与玄武岩岩浆关联理论,部分吸收了变成派的观点。赛德荷姆提出的综合性成因模型,则在传统岩浆论与激进花岗岩化理论之间搭建了桥梁,为后续研究提供了启示。瑞士矿物岩石学家尼格里(Paul Niggli, 1888—1953)和芬兰花岗岩岩石学家埃斯科拉(Pentti Elias Eskola, 1883—1964)分别于1946年和1950年的研究,进一步深化了对变质作用与岩浆过程相互联系的理解(Eskola, 1950; Young, 2003)。埃斯科拉在赛德荷姆的影响下,提出了变质相(metamorphic facies)的重要概念,将变质岩的形成放在不同的压力和温度条件下进行解释。

尽管花岗岩化学说在20世纪中期趋于衰退,但其强调的流体活动和固态置换在花岗岩形成中的作用仍具有重要意义(Barth, 1948)。相关研究奠定了混合岩学说的基础,并揭示了超变质作用在花岗岩成因中的关键作用。这些观点不仅推动了对地壳演化机制的深入研究,也为理解花岗岩成因提供了更丰富的理论框架。

1.2.2 岩浆派: 花岗岩为岩浆冷却的产物 岩浆派认为,花岗岩是深部地壳中岩浆冷却结晶的直接产物,这一理论自19世纪中期形成,并在德国、瑞士和北美得到广泛支持(Cobbing, 2000)。Dana(1849)和 Haughton(1862)基于矿物学和地质分布的研究,提出花岗岩可由岩浆活动形成,其中 Dana 在《矿物学体系》中明确支持这一观点。19世纪末至20世纪初, Hans Cloos、Victor Goldschmidt和Otto Erdmannsdorffer等欧洲学者的研究进一步深化了岩浆派理论(Young, 2003)。20世纪中叶,戴利(Daly, 1949)提出,自然界中可能存在两种岩浆体系,一种是辉长质/玄武质的,主要以喷出相形式存在;另一种是花岗质的,主要形成侵入岩。

实验岩石学的进展为岩浆派提供了关键支撑。芬兰岩石学家埃斯科拉和加拿大地质学家鲍文(Norman L. Bowen, 1887—1956)通过实验验证了硅铝质岩浆的冷却结晶过程。在华盛顿特区卡内基地球物理

实验室工作了35年的鲍文,1915年就完成了一系列实验研究,并发表了《火成岩演化的晚期阶段》(Bowen, 1915),对火成岩岩石学的发展产生了深远影响。在《火成岩的演化》(Bowen, 1928)一书中,他提出玄武质岩浆的结晶分异可形成一系列成分连续变化的岩浆,包括花岗岩。这部著作属于现代火成岩岩石学的奠基之作。为纪念鲍文的贡献,Yoder, Jr. (1979)仍以《火成岩的演化》为书名,并沿用相似的章节结构,邀请相关领域的专家撰写论文,探讨鲍文名著发表50年后的新进展。

Tuttle和Bowen(1958)的实验进一步证实了花岗岩的岩浆成因,使岩浆派在20世纪中期成为主流理论。岩浆派的主要证据包括:①花岗岩的矿物学与结构特征,如石英、长石的粒状结晶结构(Grout, 1941);②花岗岩与闪长岩、安山岩的共存关系,暗示其来源于相似的岩浆系统;③实验岩石学证明,硅铝质岩浆冷却可直接形成花岗岩的矿物组合。

岩浆派的研究不仅深化了对花岗岩成因的认识,还推动了对分异作用、岩基侵位、构造环境与陆壳演化的深入探索。这一理论的演进,反映了实验技术、区域地质研究与理论模拟的紧密结合,为现代地球科学的发展奠定了重要基础。

### 1.3 “空间问题”: 原地派与异地派的矛盾 (19世纪至20世纪中后期)

1.3.1 花岗岩体容纳空间的形成机制 许多大型花岗岩基由数百甚至数千个侵入体组成,出露面积最大的可达数十万平方公里(Glazner et al., 2003)。例如,南美洲的巴塔哥尼亚岩基,出露面积高达50万 $\text{km}^2$ ,是地球上最大的花岗质岩基之一(Parada et al., 2000);加拿大西部和阿拉斯加的海岸山脉岩基,绵延1700 km,平均宽度达250 km(Cecil et al., 2018);我国南岭地区的佛冈岩基出露面积约6000  $\text{km}^2$ ,为该区域最大的晚中生代岩基(徐夕生等, 2007);幕阜山岩基则达2400  $\text{km}^2$ (Wang et al., 2014)。这些庞大的花岗岩体是如何侵入并占据现今的位置? 它们的形成过程中,原先的岩石又经历了怎样的变化? 这一被称为“空间问题”的核心议题,自19世纪以来一直是地质学关注的焦点议题(Holmes, 1945)。

1835年,莱伊尔(Charles Lyell)与挪威地质学家凯尔豪(Balthazar M. Keilhau, 1797—1858)就奥斯陆附近德拉门花岗岩(Drammen granite)展开了讨论(Pitcher, 1997)。莱伊尔认为,花岗岩侵入了周围的岩层,使石灰岩变质为大理岩,页岩转变为云母片岩,因此,花岗岩晚于其下的石灰岩。而凯尔豪则提出质疑:如果花岗岩是晚期侵入的,那么如此庞大的岩浆体究

竟如何获得足够的侵位空间?凯尔豪或许是最早意识到侵入岩体“空间问题”的地质学家。他推测,原有的岩石经历了缓慢而宁静的转变,逐渐演化为花岗岩和正长岩(Marmo, 1967)。这一争论的实质,正是变成派与岩浆派在花岗岩成因问题上的长期对立(Holmes, 1945)。

变成派(原地派)主张,花岗岩可通过原位固态转化形成,无需额外的侵位空间。凯尔豪在1838年提出,围岩可以在固态条件下经历矿物重结晶和化学成分迁移,最终演化为花岗岩。而Michel-Lévy(1893)认为,岩浆与围岩的相互作用可促使围岩溶解,从而获得侵位空间(见Young, 2003)。支持者强调,花岗岩体与围岩的渐变过渡关系表明无需大规模岩浆侵入(Holmes, 1945)。里德曾明确表示,“唯一的解释是,并不存在庞大的花岗质岩浆体,这些大规模的花岗岩体是通过置换作用形成的——它们是花岗岩化的产物”(Holmes, 1945)。

与之相对,岩浆派(异地派)则坚持花岗岩由岩浆冷却结晶形成,并提出了多种侵位假说。挪威地质学家谢鲁夫(Theodor Kjerulf, 1825—1888)就把“同化作用”引入岩石学,认为炽热的侵入岩体通过“吞噬”部分原有的沉积岩,就可以获得侵位空间(Kjerulf, 1879; 转引自Marmo, 1967)。Michel-Lévy(1893, 见Young, 2003)也指出,岩浆与围岩发生化学反应,导致围岩部分熔融或溶解,从而扩展容纳空间。Rastall(1945)提出,岩浆通过推开或抬升围岩来获得空间,而陈国能等则提出了“原地重熔—壳内对流”理论,以解释花岗岩的成因和侵位过程(Chen and Grapes, 2007)。里德(Read, 1957)总结出两种主要的侵位机制,一是围岩的构造调整,二是岩浆通过逐块顶蚀剥离其覆盖层。

近年来,基于构造分析、侵入力学实验和数学模拟(Ramberg, 1981; Dixon and Summers, 1985)的研究表明,大多数花岗质岩体是通过机械方式从地壳中获得容纳空间的,涉及多种不同的力学机制。归纳起来,岩浆获得容纳空间的方式主要包括顶部抬升、围岩顶蚀、火口沉陷及侧向扩展。

顶部抬升(穹窿作用)假说认为,上升的岩浆能够推起上覆围岩,从而形成侵位空间。这种机制在浅成侵入体中较为常见,因其通常沿断层或层理等薄弱面侵入,以岩床、岩墙、岩盖或环状岩体形式产出。岩浆上升可能会导致地表轻微隆起,为较薄的侵入体提供空间。

顶蚀(stoping)概念最早由Goodchild(1892)提出,并由戴利(Daly, 1903)在研究美国佛蒙特州阿斯卡特尼山(Ascutney Mountain)时进一步发展。他认

为,岩浆通过加热围岩,使其破碎并下沉到岩体中,从而扩大侵位空间(Daly, 1903)。这一假说的支持证据包括侵入体中的围岩捕虏体、混杂带及未变形的围岩。顶蚀作用本质上是岩浆通过挖掘上部围岩而上升,但其效果长期受到质疑(Marsh, 1982):捕虏体是否真正下沉?野外观察为何捕虏体并不多见?如果岩浆上升过程中发生了顶蚀作用,又如何保持高温?戴利(Daly, 1914; 1933)回应称,捕虏体的密度较大,往往能下沉,而顶蚀作用的产物往往经历了同化作用。后来,Glazner和Bartley(2006)与Clarke和Erdmann(2008)对顶蚀作用在岩浆侵位中的重要性展开了激烈争论。

火口沉陷(底板下沉)是顶蚀作用的一种特殊形式。当上覆岩层受到岩浆上升压力的作用,大片岩块可能会整体塌陷,形成凹陷区,随后被花岗岩填充。这一过程受控于先存断裂及岩石中的薄弱面,一般发生在构造伸展阶段,并可形成环状杂岩体(马昌前等, 1994)。

侧向扩展(岩墙扩展)模式最早由苏格兰地质学家安德森(Ernest Masson Anderson, 1877—1960)在20世纪初提出(Anderson, 1905; Shaw, 1980)。该模式认为,岩浆沿深部断裂向上运移的过程中,不仅会发生上升位移,还会对断裂施加扩展和挤压作用,逐渐拓宽裂隙(马昌前等, 1994)。当大量岩墙发生扩展时,便可形成大型的侵入体。Pitcher(1997)指出,岩浆侵位通常发生在张性应力主导的区域,沿断裂或张性裂隙扩展,形成复式岩体。

岩墙扩展模式的核心包括三方面:①张性区域的控制,岩浆主要沿裂谷、伸展盆地或断裂系统侵位;②岩墙系统,岩浆沿断裂带或裂隙扩展,通过侧向扩展或多次注入形成复杂式岩体;③侵位证据,花岗岩体的侵位界面常有明显的断层活动痕迹,岩浆与围岩之间的剪切作用尤为明显。

现代研究表明,在中地壳条件下,花岗岩岩浆的黏度相对较低,能够沿垂直裂缝快速上升。同时,岩墙的扩展仅需少量岩浆注入即可完成。例如,Hutton(1982)对多内加尔花岗岩的研究,以及Castro(1986)对西班牙一些岩体的构造地质学解剖,均表明陆内大型剪切带或深断裂是岩浆上升的重要通道。Cruden和McCaffrey(2001)进一步指出,岩浆侵位时,其垂向膨胀远大于水平伸展。

长期以来,一种颇具吸引力的观点认为,低密度花岗质岩浆可通过类似于沉积盆地中盐层底辟的方式穿越地壳并完成侵位,这也是侧向扩展的一种形式。Wegmann(1930)系统阐述了底辟侵位假说,认为低密

度岩浆在浮力驱动下上升,塑性变形导致上覆地壳物质向外推移,为岩浆侵位创造空间(Pitcher, 1997)。Spera(1980)对底辟作用进行了深入探讨,而Copley等(2023)在研究英格兰北部Skiddaw花岗岩的侵位机制时,提出了三种可能的底辟方式:①熔体主导的岩浆底辟;②岩浆从岩墙向岩床的转化;③晶粥底辟。其中,晶粥底辟最具可能性,因为前两种方式需要高于固相线温度的岩浆,而晶粥底辟的侵位温度接近或低于固相线温度。底辟体的上升速率主要受其宽度、与围岩的密度差及围岩有效粘度的控制(Marsh, 1982)。

尽管底辟侵位理论具有较强的解释力,但由于野外鲜见与之相关的周缘向斜构造,许多学者对其在花岗岩侵位中的作用持保留态度。

作为对底辟侵位模式的补充,英国构造地质学家拉姆齐(John Graham Ramsay, 1931—2021)提出了气球膨胀假说,认为低密度岩浆可通过多次侵位的方式逐步推挤围岩和早期侵入体,从而拓展空间(Ramsay, 1981)。这一理论已逐渐演变为当前广泛接受的岩浆多次增量式累积生长模型,可有效解释花岗岩体的体积膨胀特征(马昌前等, 1994)。例如,北京周口店花岗岩闪长岩体便显示出符合气球膨胀模式的地质特征,同时显示了岩浆多次累积生长的证据(马昌前, 1988a)。

无论是底辟侵位还是气球膨胀模式,二者都包含侧向扩展和顶部抬升的作用,甚至可能涉及到底板的下沉。美国地质学家巴丁顿(Arthur Francis Buddington, 1890—1980)根据花岗岩侵位深度,将其划分为浅带、中带和深带(Buddington, 1959)。不同深度的岩体形态、热演化、与围岩的关系及构造样式上均存在差异,相应的侵位机制也有所不同(Brown, 2007)。

总之,20世纪中后期,Hutton(1982, 1988)、Hutton等(1990)和Pitcher(1997)的研究奠定了岩浆侵位研究的基础,推动了从单一侵位机制向多因素综合分析的转变。Clarke和Erdmann(2008)提出,在探讨花岗质岩浆的侵位方式时,最合理的做法是结合围岩变形特征(如底板下沉、侧向扩展、顶部抬升)及岩体内部的成分变化(例如外来成分的比例),并尝试为不同的侵位过程赋予量化权重。

事实上,王涛等(Wang et al., 2000)的研究得出了相似结论,指出花岗岩侵位通常是多种机制共同作用的结果,包括主动侵位、围岩扩展和岩浆侵吞。研究岩浆侵位机制及其分异作用的物理约束,不仅深化了岩石学研究,也推动了岩浆动力学的发展(Daly, 1903; Hargraves, 1980; Marsh, 1982; 马昌前, 1987; 马昌前等, 1994)。

### 1.3.2 岩浆侵位和侵入体组装的现代观点

McNulty等(1996)和Horsman等(2009)将岩浆侵位视为岩体在地壳中获得空间的力学机制,而侵入体的组装则涉及岩浆在储库中的充填和排列方式。完整的穿地壳岩浆过程涵盖从源区熔体的提取、岩浆上升、侵位、组装、分异直至火山喷发的一系列动态演化(Brown, 2007)。

关于花岗质岩浆源区与侵入体的关系,现有的认识是单个侵入体的供浆通道数量可从一个到多个不等,其岩浆源区的范围通常超过花岗岩体的横向分布范围(Brown, 2007)。在中-上地壳的花岗质系统中,岩浆主要以岩席的形式输运并完成侵位(Hutton, 1988; Weinberg and Searle, 1998; Rocher et al., 2021)。岩席的侵位过程受到局部岩浆应力场与区域构造应力场的共同调控(Mattsson et al., 2024)。

岩浆在地壳深部积聚后开始上升,直至到达中性浮力面。在此过程中,由于岩浆与围岩的密度差逐渐减小,最终浮力消失,岩浆停滞于中-上地壳。这一过程对大陆地壳的稳定化至关重要,因为富含长英质的上地壳密度远低于富含镁铁质残余物质的下地壳。岩浆从深熔前缘到侵位区的垂向迁移距离通常不超过30 km(Brown, 2007)。然而,即便在同一地区,花岗岩体的侵位深度也可能存在较大差异。此外,花岗岩区的负重力异常表明,即使花岗岩已完成侵位,其密度仍然低于围岩(Brown, 2007; Copley et al., 2023)。

Copley等(2023)指出,岩体的侵位主要发生在地壳的脆-韧性转换带内,这表明围岩的流变学性质以及岩浆与地壳的各向异性相互作用,在控制侵位深度方面起到了关键作用。当岩墙或底辟体上升至该转换带后,围岩不再发生显著的韧性变形,岩浆上升受阻,从而导致侵位的终止。

岩体侵位的核心问题在于如何获得占位空间。根据围岩的位移方式,岩体侵位机制可分为围岩向下位移、围岩向上位移、围岩横向位移和围岩无明显位移四类(Clarke, 1992; 马昌前等, 2023)。从岩浆运动的角度来看,侵位过程可进一步划分为主动侵位、被动侵位和诱发侵位三种模式(马昌前等, 1994)。此外,Glazner等(2003)提出,在造山带环境中,岩基侵位所需的空間可能来源于下地壳物质向弧后区域的流动或挤出,这一过程可通过地表隆升和/或弧后区域的水平收缩来实现。

侵入体的组装反映了岩体从小规模单元逐步累积形成大型岩体的过程(马昌前等, 2020)。传统观点认为,岩浆房是通过大规模岩浆脉冲快速充填形成的(Daly, 1933)。然而,近年来的研究表明,侵入体的形成更可能是一个渐进式的积累过程(Coleman et al.,

2004; Glazner et al., 2004)。

多数大型花岗岩体的形成经历了数百万年甚至更长时间的增量式侵位与累积((Harry and Richey, 1963; Miller et al., 2018; 马昌前等, 2020), 而与超级喷发相关的大型岩浆房则可能在数千年甚至更短时间内快速形成(van Zalinge et al., 2022)。这些侵入体通常由多个侵入单元或次级侵入体组成, 根据组装方式可将其分为以下三类:

(1) **层叠板状侵入体**: 由多个平行或近平行的独立岩席垂向叠加形成, 表现出纵向分层结构。例如, 意大利西部Elba岛的侵入体是由至少三次岩浆注入形成的层叠式板状侵入体, 侵入深度约为15~20 km, 通常与地壳的脆-韧性转换带相关(Westerman et al., 2004; Brown, 2007)。

(2) **嵌套带状侵入体**: 由多股岩浆依次从外向内侵入, 形成同心或偏心的环带状分布。例如, 北京周口店岩体(马昌前, 1988a)和美国内华达Tuolumne侵入岩系(Bateman and Chappell, 1979)均属于此类。这表明, 传统基于岩浆分异假说提出的侵入体相带划分模式, 在多次侵入的背景下可能并不适用。

(3) **楔状侵入体**: 由多个近直立的楔状侵入单元汇聚形成的大型侵入体。例如, 鄂南-湘北幕阜山燕山期花岗质侵入杂岩体, 其锆石U-Pb年龄为154~146 Ma, 时间跨度约8 Ma(Wang et al., 2014)。美国北部和加拿大半岛山脉的白垩纪侵入体亦属此类(Hildebrand and Whalen, 2021)。

Brown(2007)指出, 构造环境、源区范围及岩浆通道的形态共同影响侵入体的规模和形态。在大陆岩浆弧环境中, 部分熔融程度较高, 熔融区通常较狭窄, 形成的侵入体间距较小, 形态多呈板状; 而在碰撞造山带中, 部分熔融程度较低, 熔融区较宽广, 形成的侵入体间距较大, 多呈楔状。

岩浆侵位与侵入体组装是复杂的地质过程, 其内在机制和外在表现反映了岩浆活动与地壳动力学的相互作用。深入理解这些过程不仅有助于解析岩浆系统的演化模式, 也为地壳构造演化研究提供了关键线索。

#### 1.4 现代争论: 分异派与深熔派的辩论(20世纪中期至今)

自20世纪中期以来, 随着地球科学理论的不断发展和分析技术的日益精进, 花岗质岩浆的成因问题再次成为地质学界关注的焦点。花岗岩的物质来源或源岩性质、构造环境或背景、成因机制与构造运动的关系, 构成了现代花岗岩研究的三大基本问题(杨经绥等, 2009)。这三大问题, 也可以称为物源、热源和动

力源三大要素(周新民, 2007), 而这些要素的具体表现又与构造环境密切相关。

在花岗岩成因研究中, 董申保(1917—2010)将其划分为地幔分异型和地壳重熔型两大类(董申保, 1984)。英国地质学家皮切尔(Wallace Spencer Pitcher, 1919—2004)则认为, 造山带花岗岩主要形成于俯冲带上方, 源于幔源镁铁质岩浆的分异或幔源物质的熔融; 而在碰撞或后碰撞环境中, 花岗岩的形成则更多依赖于地壳的部分熔融(Pitcher, 1987; 1997)。这些观点构建了花岗岩成因研究的不同理论框架, 从幔源岩浆分异到地壳部分熔融, 再到壳-幔相互作用的深层机制, 为花岗岩成因提供了多元视角。

1.4.1 幔源岩浆分异 早在20世纪20年代, 挪威矿物学家兼地球化学家戈尔德施密特(Victor Moritz Goldschmidt, 1888—1947, 现代地球化学和晶体化学的奠基人)和鲍文(Bowen, 1928)便提出, 花岗岩可能源于幔源玄武质岩浆的分异演化。他们基于玄武岩与花岗岩之间的成分过渡关系, 认为玄武岩浆在上升过程中经历分离结晶作用, 逐步演化为花岗质岩浆。

“分离结晶”这一概念可追溯至亚里士多德时期, 最初用于描述化合物的提纯现象(Becker, 1897)。进化论的奠基人达尔文(Charles Robert Darwin, 1809—1882)早期以地质学研究而闻名, 他在《火山岛的地质观察》(Darwin, 1844)一书中, 最早用分离结晶尤其是晶体沉降的思想来解释火山岩的成分多样性(Harker, 1909; Daly, 1914)。美国地质学家贝克(George Ferdinand Becker, 1847—1919)最早以“分离结晶”为题, 论述岩墙和岩盖的成分分带是分离结晶的产物, 认为岩浆对流是驱动分异的关键因素: 岩墙边缘因熔点较低的矿物先行结晶, 而中心区域则富集熔点较高的物质(Becker, 1897)。随后, 英国地质学家哈克(Alfred Harker, 1859—1939)在《火成岩的自然历史》中进一步阐述了岩浆分异的概念, 并将伴随结晶发生的岩浆分异称为“分离结晶”(Harker, 1909)。他指出, 从岩浆中结晶的矿物会按照特定顺序分离, 使岩浆成分随温度梯度发生系统性变化。例如, 侵入体边部的成分往往偏基性, 而中心区域更偏酸性, 并呈现出连续的成分过渡特征。鲍文指出, 一系列硅酸盐熔体结晶实验表明, 在适当的条件下, 岩浆的分离结晶可以形成我们在野外观察到的各种类型的火成岩(Bowen, 1919)。随后, 鲍文在《火成岩的演化》(Bowen, 1928)中系统总结了岩浆分异过程, 为岩浆演化研究奠定了理论基础。他区分了两种岩浆分异模式: 在平衡结晶中, 晶体持续与熔体发生反应并重新平衡; 而在分离结晶过程中, 晶体一旦形成便与熔体隔离, 不再发生后续反应。

需要澄清的是,“分离结晶”(fractional crystallization)和“结晶分异”(crystallization differentiation)是两个容易混淆的概念。鲍文(1919)曾撰文探讨了包括“分离结晶”在内的多种岩浆分异机制。《岩石学词典》(Tomkeieff, 1983)将“结晶分异”定义为岩浆分异的一种方式,其中早期形成的晶体与残余岩浆分离;而“分离结晶”特指连续结晶矿物从残余岩浆中分离所导致的岩浆分异作用。Neuendorf等(2005)在《地质学术语》(第五版)中沿用了鲍文(1928)的定义,认为结晶分异包括平衡结晶、分离结晶及二者的结合;而分离结晶则是指晶体从岩浆中物理分离,导致残余熔体成分比平衡结晶所产生的熔体更为极端和演化。总体来看,现在的共识是,结晶分异是多个机制的综合,而分离结晶仅是其中的一种,并涉及矿物与熔体的物理分离。此外,“岩浆分异”(magmatic differentiation)是指单一母岩浆通过结晶分异、同化作用、岩浆混合及液态不混熔等机制形成多种岩石类型的过程。

现代研究表明,在封闭系统中,幔源玄武质岩浆通过岩浆分异作用就可形成典型的弧岩浆序列(玄武岩—安山岩—英安岩—流纹岩);而在开放系统中,玄武质岩浆与地壳物质的相互作用可产生多种混合岩浆与岩石。例如,在下地壳,玄武质岩浆分异后形成超镁铁质-镁铁质堆晶岩和长英质熔体,后者可向上迁移至浅部岩浆储库,最终冷却固化形成花岗质岩体,部分熔体甚至可能喷发为安山岩或流纹岩(Moyen et al., 2021; Pichavant et al., 2024)。

支持岩浆分离结晶成因的证据包括不同类型火成岩之间的成分连续性、长英质岩石相较玄武质母岩浆的不相容元素富集、下地壳中广泛分布的镁铁质与超镁铁质堆晶岩,以及矿物的成分环带(Villiger et al., 2007)。此外,岛弧和大陆弧的地壳剖面研究显示,深部地壳的堆晶岩成分与浅部花岗岩的化学组成互补,如塔尔基特纳弧(Talkeetna)、科希斯坦弧(Kohistan)、法马蒂纳弧(Famatina)、雪兰杂岩体(Chelan complex)及内华达山脉南部(Jagoutz and Klein, 2018)。其中,科希斯坦弧保存了完整的地壳剖面(厚约50~55 km),从上地幔橄榄岩和超镁铁质堆晶岩,过渡到辉长岩成分的下地壳,再到上地壳的花岗岩与火山岩。地球化学模拟表明,从原生弧岩浆中剔除下地壳堆晶岩的成分后,可再现上地壳岩石的体积和化学特征(Jagoutz and Klein, 2018),这进一步支持了岩浆分离结晶作用对大陆弧上地壳花岗岩形成的贡献。

近年来的实验研究发现,在高挥发分含量与中下地壳压力条件下,玄武质岩浆在不同深度经历多阶段的分离结晶作用,有利于形成富硅残余岩浆(Villiger

et al., 2007; Nandedkar et al., 2014; Marxer et al., 2022)。高压条件下,熔体密度增加,晶体与熔体的密度差加大,促进了单斜辉石、角闪石和石榴子石的分异,使岩浆更易发生分离结晶(Hargraves, 1980)。此外,高挥发分含量降低了熔体黏度,抑制了斜长石的结晶,有利于矿物的分离,尤其在高压富水条件下,有助于形成高Sr/Y比值的花岗质熔体(Marxer et al., 2022)。

尽管该理论获得了不少支持,但随着地质和地球化学数据的积累,其局限性也逐渐显现。例如,Daly (1933)指出,分离结晶难以解释大规模花岗岩的分布,同时也无法合理解释中基性岩稀少的问题。Grout (1926)计算发现,形成花岗质岩浆所需的镁铁质堆晶岩体积应达到8~10倍,但许多花岗岩区却缺乏结晶分异的相应证据(Gilluly, 1948; Jagoutz and Klein, 2018)。早在20世纪70年代,卡迈克尔(Ian S. E. Carmichael, 1930—2011)就指出,科迪勒拉花岗岩中仅有少量闪长岩和辉长岩共生,“这排除了其来源于玄武质岩浆分异的可能性”(Carmichael et al., 1974)。

此外,部分花岗岩表现出明显的壳源特征,如高硅铝含量、低镁铁比值及地壳同位素组成。部分地区的侵入岩呈双峰式分布,缺少中性岩成分,层状侵入体晚期分异产物(一般为富铁的成分)与花岗质大岩基的化学成分和矿物组合也不相同,这与分离结晶过程中应有的连续演化趋势不符(Yoder Jr, 1979; 翟明国, 2017; Jagoutz and Klein, 2018)。这些现象说明,单一的结晶分异机制难以解释大规模花岗岩基的成因(Reid et al., 1993; 吴福元等, 2007)。

1.4.2 地壳岩石熔融 通过地壳岩石熔融产生花岗岩的思想由来已久。早在1886年,美国地质学家达纳(James Dwight Dana, 1813—1895)就提出,花岗岩可能通过变质作用达到熔融状态而形成。随后,加拿大岩石学家亚当斯(Frank Dawson Adams, 1859—1942)于1910年进一步支持深部地壳岩石重熔形成花岗质岩浆的机制(Read, 1957)。尽管里德强调花岗岩的形成主要是花岗岩化的产物,但他也认识到地壳岩石熔融可能在花岗岩形成过程中发挥了作用(Read, 1957)。

Tuttle和Bowen(1958)通过高温高压实验,首次验证了地壳岩石熔融形成花岗岩的可能性。他们发现,富硅铝的长英质岩石在适宜的温度和压力下可熔融形成花岗质熔体。尤其值得一提的是,德国实验岩石学家温克勒(Helmut G. F. Winkler, 1915—1980)通过一系列实验研究,有力回击了变成派认为花岗岩由固态转换形成的观点。他采用天然变质杂砂岩进行熔融实验,发现温度达到700~800 °C时即可生成花岗质熔体。此外,利用黏土、页岩和杂砂岩实验,他揭示了

副片麻岩及含石英-长石的云母片岩在深熔作用下可产生大量花岗质和花岗闪长质岩浆,以及少量英云闪长质或奥长花岗质岩浆(Winkler, 1965)。随后, Carmichael等(1974)结合对科迪勒拉花岗岩的研究,提出其岩浆主要来源于硅铝质地壳,而Pitcher(1997)则进一步指出,碰撞造山带中的花岗岩主要由古老大陆地壳再造形成,地幔的直接贡献可能较小。

地壳熔融模型认为,花岗岩浆的形成源于下地壳的部分或完全熔融,而熔融源区的厚度通常不超过20 km(Brown, 2007)。Clemens(2005)强调,许多花岗岩的成因与高级麻粒岩的变质作用密切相关,而熔融所需热量主要来源于侵入地壳深部的镁铁质岩浆(Zhou and Li, 2000; Zhou et al., 2006; Wang et al., 2021)。这种熔融过程通常发生在无自由流体条件下,但外来热量和流体的输入可加速下地壳的深熔作用,并触发熔融反应、分凝和岩浆抽取。最终,熔体沿通道向上迁移,在地壳浅部聚集形成岩浆储库,固结后形成花岗质岩体,或喷发为流纹质火山岩(Moyen et al., 2021)。

在大陆碰撞带和地壳增厚区域,地壳岩石熔融模式被广泛用于解释区域性花岗岩的成因,而玄武质岩浆的结晶分异模式主要适用于增生造山带。此外,幔源镁铁质岩浆的间接或直接作用,如提供热量和流体,也被认为是影响花岗岩成因的重要因素。例如, Xu等(2021)在研究中国东南地区白垩纪火山-侵入杂岩时,提出了一种融合地壳部分熔融与幔源岩浆分异的成因模型。

值得注意的是,露头花岗岩的化学成分可能与真实的熔体存在显著差异。这主要归因于堆晶、残留晶、转熔晶以及来自围岩的捕虏晶的影响(马昌前等, 2020)。花岗岩的成分多样性反映了源区的不均一性及岩浆演化过程的复杂性。例如,实验研究表明,南非开普花岗岩套中的S型花岗岩镁铁质组含量偏高,可能包含转熔晶(如石榴子石和钛铁矿),因而无法直接代表熔体成分(Brown, 2007)。此外,部分熔融形成花岗质岩浆后,理论上应遗留大量镁铁质-超镁铁质残余物质,然而,实际观察到的残余岩石规模很小。Jagoutz和Klein(2018)推测,大体积的堆晶岩或熔融残余体可能因地壳底部拆沉作用而被再循环至地幔,从而导致地壳中残余岩石或堆晶岩体积不匹配。

需要强调的是,许多花岗岩的地质特征(如野外产状、矿物组合、元素及同位素地球化学)具有多解性,既可能支持幔源岩浆分异模式,也可能符合地壳熔融模式。例如,花岗岩中缺乏继承锆石,既可能指示了幔源岩浆的显著贡献,也可能是由于岩浆源区在高温熔

融过程中导致继承锆石溶解所致。而花岗岩中含有老锆石,既可能是源区未完全溶解的锆石,也可能是在岩浆上升或侵位过程中捕获了围岩的锆石。同样,地壳型同位素特征既可能源于地壳熔融,也可能是富集地幔熔体分异的结果(Jagoutz and Klein, 2018; Moyen et al., 2021)。

目前研究认为,玄武质岩浆的分异和地壳岩石的部分熔融在花岗岩的形成中均发挥重要作用,但其贡献比例取决于构造环境。在火山弧地区,结晶分异可能占有重要地位(Jagoutz and Klein, 2018),而在大陆碰撞造山带,地壳熔融则更加重要(郑永飞等, 2024)。除此之外,近年来还提出了一些新的花岗质熔体形成机制,例如俯冲板片的部分熔融、辉石质地幔楔组分的熔融,以及俯冲板片超临界流体的分离并在地幔楔中形成花岗质熔体等(Taniuchi et al., 2020)。

表1总结了幔源岩浆分异与地壳熔融的主要观察特征及其可能解释。这些研究表明,两种模型并非相互排斥,而是在不同构造环境和条件下可能共同作用,为理解花岗岩的多样性提供了更为完整的视角。

#### 1.4.3 地壳熔融的条件和动力

地壳岩石熔融理论的提出还引发了进一步的讨论,主要围绕三个核心问题展开:地壳熔融的具体条件是什么?其动力或热源来自何处?在花岗岩的形成中地壳和地幔物质各自起着多大的贡献?

熔融的发生取决于多个因素,包括温度升高、压力降低或挥发分(如水)的加入。此外,熔融过程受构造背景的制约。例如,在板块俯冲环境中,幔源岩浆的底侵作用可导致地壳加热并触发熔融;而在伸展构造背景下,减压熔融可能成为主要机制。

##### (1) 地壳熔融的条件: 湿熔融与干熔融之争

在研究地壳熔融的条件时,学界围绕湿熔融(fluid-present melting)与干熔融(fluid-absent melting)展开了长期争论(Young, 2003; Clemens et al., 2020)。

湿熔融指在源区由于挥发分(主要是水)的存在,或来自底侵岩浆分异和冷却后出溶的水加入源区,降低了岩石的熔点,使其能够在较低温度下发生熔融(加水熔融)。1792年, L. Spallanzan最早注意到熔融岩石中水的存在及其成因意义。随后,在1825年和1862年, Scrope G. P.、Scheerer T.和罗森布施进一步提出水与花岗质岩浆的成因联系(见Marmo, 1967)。Tuttle和Bowen(1958)通过经典实验验证了水在壳源花岗岩成因中的关键作用,这一研究结果得到了广泛认可。

在富水环境下,多种变质沉积岩可发生部分熔融,其最终成分取决于源岩的性质。实验研究表明,在

表1 幔源岩浆分异和地壳岩石熔融的主要观察和解释 (据Moyen et al., 2021修改)

Table 1 Key observations and interpretations of rocks formed by mantle-derived magma differentiation and crustal rock melting (modified from Moyen et al., 2021)

主要观察	幔源岩浆分异模式		地壳岩石熔融模式	
	作为幔源岩浆分异的证据	其他解释	作为地壳熔融的证据	其他解释
野外地质	同时代的花岗岩类与镁铁质和中性岩共生, 包括堆晶岩	镁铁质岩石代表与花岗岩无关的地幔熔融事件	花岗岩与混合岩共生	混合岩与形成花岗岩的地壳熔融无关
矿物组合	角闪石、辉石±榍石	变玄武岩源岩的熔融	白云母、堇青石、石榴子石、铝硅酸盐矿物±独居石	长英质-中性成分的母岩浆的分异
主量元素	在哈克图解上表现出多相饱和的液体演化线趋势	不同熔融分数的部分熔融	成分变化趋势代表了熔融反应过程	分异趋势
微量元素	具有弧岩浆的化学特征(例如, 在Pearce et al.(1984)图解中的“VAG”区)	具有岩浆弧化学特征的陆壳岩石重熔	具有同碰撞的化学特征, 例如, 在Pearce等(1984)图解中“COLG”区	富集微量元素特征的镁铁质-中性母岩浆分异
同位素	地幔型的同位素特征	新生的基性岩源的熔融	地壳型同位素特征	富集地幔熔融体的分异或地壳同化作用
继承锆石	缺乏继承锆石	高温地壳熔融导致锆石溶解, 或本来就缺少锆石的地壳岩石熔融	大量继承锆石	围岩同化(捕虏晶)、岩浆混合

含水流体存在的情况下, 常见地壳岩石的熔融温度通常低于700°C (Brown, 2008)。当温度超过湿固相线时, 水的引入可显著促进熔融, 形成大量花岗质熔体 (Collins et al., 2021)。

此外, 水的存在不仅影响熔融温度, 还决定了矿物相的生长、熔体的性质及后期岩浆的演化 (Pitcher, 1987)。低温、流体存在条件下熔融产生花岗质岩浆的模式部分是基于对俯冲带熔融反应性质得到的认识 (Clemens et al., 2020)。

相较而言, 干熔融依赖于极端高温, 即使缺乏独立的流体相, 在局部温度足够高时仍可触发熔融 (Wyllie and Wolf, 1993; Clemens et al., 2020)。这一机制常见于克拉通、裂谷、地幔柱和大陆碰撞带等环境。然而, 深部变质岩石通常缺乏独立的水分, 若无云母或角闪石等含水矿物发生脱水反应, 则难以发生大规模熔融。因此, 所谓的干熔融大都是含水矿物分解引发的部分熔融(脱水熔融)。研究表明, 角闪石分解则会生成英云闪长质熔体, 而云母分解可形成花岗质熔体 (Sawyer et al., 2011)。若源岩含角闪石, 其熔融温度可能超过850~900°C, 而黑云母的脱水熔融温度大约为750~850°C (Brown, 2008; Palin et al., 2016)。脱水反应在干熔融过程中起到了至关重要的作用, 其中, A型花岗岩往往是脱水熔融的产物 (Fyfe, 1970; Collins et al., 2021)。

在不同压力-温度条件下, 脱水熔融的程度直接影响熔体的组成。例如, Rapp和Watson (1995) 对角闪岩的部分熔融实验表明, 在0.8~1.6 GPa压力和1000~1100°C条件下: 5% 熔融可形成高K<sub>2</sub>O花岗质熔体; 5%~10% 熔融会产生低铝奥长花岗质熔体; 而20%~40%

熔融可形成高铝奥长花岗岩-英云闪长岩、花岗闪长岩及石英闪长岩的液相。

此外, 源岩的含水量也显著影响熔融效率和岩浆通量。一般而言, 正片麻岩的部分熔融形成I型花岗岩, 但其效率低于S型花岗岩。这是由于, 变沉积岩富含白云母和黑云母(含水量高达4%), 而角闪岩的主要含水矿物为绿帘石和角闪石(含水量约2%)。在地壳压力条件下, 白云母和黑云母的分解温度比绿帘石和角闪石的低100~200°C (Jagoutz and Klein, 2018)。因此, 富含白云母的变沉积岩脱水反应所产生的熔体体积远大于角闪岩熔融所形成的熔体体积 (Patiño Douce and Beard, 1995)。

尽管湿熔融理论长期占据主导, 但随着实验技术与分析方法的进步, 近年来干熔融机制受到了越来越多的关注。Clemens等(2020)认为, 虽然流体存在或缺失都可以生成花岗质岩浆, 但大多数花岗质岩浆是通过高温、流体缺失的熔融形成的。

实际上, 湿熔融与干熔融并非完全对立, 而是取决于具体的地质环境与熔融条件, 二者也可以在同一区域内发生 (郑永飞等, 2024)。湿熔融与干熔融的争论不仅深化了对岩浆动力学的理解, 也推动了壳-幔相互作用研究的发展。研究地壳岩石的熔融过程时, 应将花岗岩与变质岩结合起来, 因为角闪岩相和麻粒岩相变质岩可以提供地壳熔融的温度及熔融发生时流体状态的信息 (Clemens et al., 2020)。

## (2) 地壳熔融的热源: 地幔岩浆底侵、放射性生热还是地壳加厚?

地壳熔融的热源受区域性构造背景和动力学机制的影响, 具有一定的复杂性。主要的热源包括: ①放

放射性元素(如 $^{40}\text{K}$ 、 $^{230}\text{Th}$ 、 $^{235}\text{U}$ 和 $^{238}\text{U}$ )衰变所释放的放射性热;②地壳减薄导致的地幔物质上涌,进而增加下地壳的热通量;③地幔岩浆侵入和结晶时释放的热量(Bea, 2012)。在碰撞造山带等地壳加厚区域,放射性衰变热可触发地壳部分熔融,并驱动晶粥体的底辟作用(Arnold et al., 2017)。Bea(2012)的研究表明,大多数花岗岩的放射性热产量远高于大陆地壳的平均水平,表明放射性加热通常是大量花岗质岩浆形成的必要条件。研究表明,放射性衰变可以提供长期稳定的热源,而地幔岩浆底侵及镁铁质岩床的侵入则是促使局部快速熔融的重要驱动力(Annen et al., 2006; Thybo and Artemieva, 2013; Riel et al., 2016)。此外,地壳在块体碰撞过程中加厚,也可能引发地温升高,从而促进熔融。

不同构造环境下,地壳熔融的热源可能有所不同,甚至可能由多种热源共同作用。例如,在碰撞造山带,放射性生热及地壳加厚导致的温度升高可能是驱动地壳深部熔融的主要因素,而大陆地壳在高压或超高压变质过程中经历俯冲、抬升和减压,也可诱发熔融(Brown, 2007)。在活动板块边缘或伸展环境,地幔岩浆底侵的作用则更加显著。然而,目前关于伸展构造、地壳熔融与玄武质岩浆底侵的时间关系仍存在较大争议。在大陆裂谷环境,地壳重熔的主要热源来自岩石圈减薄引发的软流圈物质上涌,这不仅提升了地壳的热流强度,也促进了深部熔融(Zheng and Gao, 2021)。Clemens等(2020)也指出,下地壳发生广泛的部分熔融并实现大规模地壳分异,必须依赖额外的地幔热输入。这些对热源机制的研究,为理解花岗质熔融的热力学过程提供了更深入的认识,并为探讨构造背景、热源类型与时间尺度的相互作用开辟了新的视角。

熔融机制和源岩类型共同决定了熔融的程度及其形成花岗岩体的规模。在中等供热条件下,泥质岩源岩的熔融程度通常在0~25%之间,主要形成混合岩,而不太可能形成侵入体(Brown, 2001)。中度熔融(25%~40%)和高度熔融(40%~60%)才可能产生大规模的花岗岩体(Guernina and Sawyer, 2003)。中度熔融通常需要较高的地温梯度、高放射性生热层或临近高温岩床,而高度熔融则依赖大量易熔的地壳物质及广泛的地幔热源,如岩浆底侵作用(Thompson, 1999)。

总结而言,幔源岩浆分异假说构建了20世纪花岗岩成因研究的早期理论框架,而地壳部分熔融理论奠定了现代研究的基础。湿熔融与干熔融机制的深入研究,不仅加深了对岩浆起源和演化的理解,也促进了花岗岩成因与壳-幔相互作用研究。

### (3) 壳-幔物质的贡献与花岗岩成因类型划分

自20世纪70年代以来,关于花岗岩源区的研究不断深入,研究视角从单一的地壳或地幔扩展到更加复杂的壳-幔相互作用体系。大量研究表明,花岗岩的形成可能涉及多个圈层的物质来源,包括地幔、俯冲板片和陆壳(Clarke, 1992)。在这一认识的基础上,I-S-M-A四类花岗岩的分类体系逐步建立,并广泛应用于全球花岗岩的研究中。

20世纪70年代初,澳大利亚地质学家查佩尔(Bruce William Chappell, 1936–2012)和怀特(Allan James Risley White)首次提出I型和S型花岗岩的概念,研究对象为澳大利亚东南部拉克兰褶皱带的花岗岩(Chappell and White, 1974)。I型花岗岩主要来源于变质火成岩或地壳深部物质,而S型花岗岩则源于变质沉积岩或地壳表层物质的部分熔融。随着研究的深入,该分类体系得到了进一步拓展。White(1979)提出M型花岗岩(幔源型),认为其可能来源于俯冲洋壳或上覆地幔的部分熔融;Loiselle和Wones(1979)则首次提出A型花岗岩(碱性/非造山/无水型)的概念,认为其主要形成于裂谷或克拉通环境。虽然A型花岗岩的提出者未正式发表相关论文,但后续研究不断完善和补充其特征,并进行亚类的划分(Collins et al., 1982; Whalen et al., 1987; Eby, 1990, 1992; Bonin, 2007),其中,Eby(1992)将A型花岗岩划分为A1型和A2型两个亚类。进一步研究表明,A型花岗岩可能来源于先前熔融事件耐熔残余或岩浆分异产生的堆晶物质(麻粒岩)的部分熔融(Skjerlie and Johnston, 1992; 郑永飞等, 2024)。实验岩石学研究指出,地幔橄榄岩直接熔融难以形成原生的花岗质岩浆(Wyllie, 1984; Johannes and Holtz, 1996)。因此,尽管所谓的幔源型花岗岩常常表现出地幔来源的地球化学印记,它们更可能是初始地壳部分熔融或幔源岩浆分异的产物。

Didier等(1982)基于岩石包体的类型,进一步划分出C型和M型花岗岩。C型花岗岩以法国中央高原的海西期淡色花岗岩为代表,通常可见围岩残留体;而M型花岗岩属于地幔与地壳混合源的产物,常含暗色微粒包体。Pitcher(1983)对I型花岗岩进行了更细致的划分,提出“科迪勒拉I型”和“加里东I型”两类,并分析了它们在成因和特征上的差异。两者均与铜-碱金属矿化相关,但科迪勒拉环境中的矿化较发育,而锡矿化通常与S型花岗岩相关。此外,尼日利亚的碱性和过碱质环状花岗岩也常与锡矿化相伴生。Clarke(1992)系统总结了I型、S型、M型和A型花岗岩的特征,而Barbarin(1990)提出的H型花岗岩,代表了具混合源特征的花岗岩。在日本,石原舜三(Shunso Ishihara, 1934

—2020)基于氧逸度差异,将花岗岩划分为磁铁矿系列(高氧逸度)和钛铁矿系列(低氧逸度)(Ishihara, 1977)。

近年来, Moyen(2020)基于成因的新分类框架,也区分出C型(地壳型)和M型(地幔型)花岗岩,并指出M型花岗岩常与镁铁质熔体共生,表现为磁铁矿系列(氧化型);而C型花岗岩通常缺乏镁铁质岩浆的共生,更倾向于钛铁矿系列。

在中国,20世纪80年代前后,花岗岩成因分类及其与成矿关系的研究进入高峰期,取得了一系列重要成果。众多学者提出了不同的花岗岩成因分类体系,如涂光炽等(1979)、王联魁等(1982)、刘家远和沈纪利(1982)、杨超群(Yang, 1982)、徐克勤等(1983)、董申保(1984)、莫柱孙(1985)、吴利仁(1985)、张德全和孙桂英(1988)等。其中,1979年涂光炽(1920—2007)等在《华南花岗岩类的地球化学》一书中系统论述了华南花岗岩的多成因观点。1980年,由原地矿部宜昌地质矿产研究所莫柱孙、叶伯丹等编著的《南岭花岗岩地质学》,基于扎实的野外与岩相学观察,深入总结了南岭花岗岩的类型与成矿的关系(莫柱孙和叶伯丹, 1980)。尤其是徐克勤(1907—2002)等的分类影响深远:他们基于华南地区的研究,提出了同熔型、陆壳改造型和幔源型三类花岗岩(徐克勤等, 1983; Xu et al., 1982; 王德滋等, 1984)。同熔型花岗岩表现出壳幔混合特征,与I型花岗岩类似;陆壳改造型主要为地壳重熔或岩浆结晶产物组成,类似于S型;而幔源型则由长期地幔分异演化形成(王德滋, 2004)。此外,王德滋等(1992)还拓展了S型花岗岩的概念,并首次识别出S型火山岩。

近年来,随着对花岗岩与关键矿产关系的深入认识,淡色花岗岩或高分异花岗岩的识别和研究受到了广泛关注(付建明等, 2011; 许志琴等, 2019; 毛景文等, 2019)。吴福元等(2017)根据结晶分异程度,将花岗岩划分为低分异花岗岩、高分异花岗岩及伴生的堆晶花岗岩,并指出高分异花岗岩的形成主要受高温和富挥发分环境控制。高分异花岗岩相当于各种淡色花岗岩-白岗岩(包括花岗伟晶岩和细晶岩),化学成分上表现为高硅、铝过饱和和弱饱和,稀土元素分布型式为W型或M型的四分组效应、高Rb/Sr、低K/Rb和Nb/Ta比值等特征(Miller and Mittelfehldt, 1982; 赵振华, 2016)。研究表明,稀有金属花岗岩(rare-metal granite)通常都是高分异花岗岩(Breiter et al., 2006)。此外, Vernon和Collins(2011)提出了一套识别堆晶花岗岩的标志。值得注意的是,随着岩浆分异程度的增加,将这些花岗岩划分为I型或S型变得更加困难(Chap-

pell et al., 1998),同时高分异花岗岩与铝质A型花岗岩的界限也变得模糊(吴福元等, 2017)。

英国岩石学家山德(Samuel James Shand, 1882—1957)提出的铝饱和指数(Alumina Saturation Index, ASI)在花岗岩分类中具有重要意义(Shand, 1927)。该指数根据岩石中铝含量相对于长石结晶所需的铝量,划分为过铝质、准铝质和过碱质三类。过铝质岩石(大致相当于S型花岗岩及高分异花岗岩)含有白云母、黑云母、堇青石、红柱石和石榴子石等铝饱和矿物;准铝质岩石(大致相当于I型和M型花岗岩)通常含角闪石、黑云母和辉石等矿物;而过碱质岩石(相当于A1型花岗岩)则含霓石、钠闪石和钠铁闪石。然而,铝饱和指数的大小与花岗岩成因类型之间并没有对应关系。例如, Chappell等(1998)研究澳大利亚拉克兰褶皱带1284个I型花岗岩样本时,发现其中41%为过铝质岩石。尽管如此,该指数仍然是花岗岩分类研究中的重要指标。King等(1997)就把A型花岗岩划分为铝质和碱性两个亚类。

然而, I-S-M-A-型花岗岩分类方案在实际应用中存在局限性(Frost et al., 2001; Bonin, 2007),因为这些方案都假设花岗岩的物质来源是单一的。而现实中,在华南、西班牙中部、阿根廷、东北亚等地均发现了I-S型及A-I型的过渡岩石(周新民, 2003; Castro, 2014; 王孝磊, 2017)。洪大卫(1994)指出,该分类方案的定义不统一,地区对比困难,过于简单化,未能全面反映花岗岩成因的复杂性。

尽管存在争议,不同的分类体系的提出仍推动了花岗岩的深入研究。Hildreth(1981)早期提出的壳-幔共同作用机制认为,大多数花岗质岩浆均包含地壳和地幔物质。自20世纪90年代起,壳-幔相互作用逐渐成为花岗岩成因研究的热点(肖庆辉等, 2002; 王德滋, 2004)。野外观察和地球化学分析表明, S型花岗岩主要来源于变沉积岩的熔融,其中幔源物质的贡献较小,但仍不可忽视(Collins, 1996; Kalsbeek et al., 2001)。Castro(2014)进一步指出,幔源熔体侵入地壳并诱发熔融和同化作用,是形成大型过铝质花岗岩体的重要机制。

不仅地壳熔融可以产生花岗岩,壳外的作用也可能产生花岗岩。Castro(2014)提出了壳外成因模式,认为多种过程均可能产生钙碱性的I型花岗岩。这些过程包括高镁安山质岩浆的分异、湿润的苦橄质玄武质岩浆经分异后演化为安山质岩浆,以及俯冲带混杂岩或底垫至下地壳物质的部分熔融。近期, Pichavant等(2024)基于对秘鲁马库萨尼火山岩的研究表明,几乎所有花岗岩都属于混合成因,既包含有地壳物质,也

含有幔源玄武质成分。这一观点进一步突显了壳-幔相互作用的复杂性及其在花岗岩成因中的关键作用。

可见,壳-幔相互作用对花岗岩的形成有深远影响。[Clarke\(1992\)](#)提出了一种基于“与地幔源距离”(remoteness-from-mantle-source)的花岗岩分类方法,强调地幔在花岗岩形成中的基础作用。他根据花岗岩成因与部分熔融的次数之间的关系,将花岗岩分为原生、次生和三次花岗岩三种类型。原生花岗岩经历一次熔融,如某些大洋斜长花岗岩、非造山过碱性花岗岩及太古代TTG,这些岩石可能起源于地幔橄榄岩部分熔融形成的玄武质岩浆,随后经历分离结晶及同化作用演化而成。次生花岗岩经历两次熔融,例如某些斜长花岗岩、太古代TTG及大陆弧准铝质英云闪长岩-花岗闪长岩套。这类花岗岩可能来源于幔源岩浆结晶形成古陆壳或洋壳,再经历第二次熔融后最终形成。三次花岗岩需经历三次熔融事件,如幔源岩浆形成的基性岩重熔后产生的岩石,经过风化剥蚀形成沉积岩,再次经历变质重熔最终形成花岗岩,或由次生花岗岩进一步熔融演化而成。过铝质花岗岩可能正是三次花岗岩的代表。这一分类体系不仅揭示了花岗岩成因的多样性,也进一步强调了壳-幔相互作用在大陆地壳分异中的核心地位。

**1.4.4 构造环境对花岗岩成因的控制** 花岗岩的形成与地质环境密切相关,这一认识由来已久。早在1915年,魏格纳在《海陆的起源》第六章中便对比了非洲和巴西的片麻岩高原,发现两地的花岗岩侵入现象、岩性分布及褶皱方向高度一致,从而提出大西洋两岸的大陆曾经连为一体([魏格纳,2006](#))。20世纪中期以来,研究者逐步认识到构造环境在花岗岩成因中的关键作用,特别是基于板块构造背景的分类研究,成为该领域的重要里程碑([王德滋和周新民,2002](#))。[Read\(1957\)](#)首次提出,不同类型的花岗岩对应特定的地质背景,并反映造山作用的不同阶段。[Reynolds\(1958\)](#)进一步强调,花岗岩的成因本质上是一个构造问题,不同的构造环境决定了花岗岩的类型及其特征。这些研究不仅奠定了理论基础,也开启了地球化学方法在构造环境研究中的应用。

板块构造理论的提出,使人们对花岗岩的形成机制有了更深入的理解。[Pitcher\(1983\)](#)指出,花岗岩是板块构造过程的直接产物,构造事件在新生地壳的形成及古老地壳的再循环过程中留下了不可磨灭的印记([Cobbing,2020](#))。在威尔逊旋回的不同阶段,往往会形成特定类型的花岗岩组合([Barbarin,1999](#))。因此,花岗岩不仅是地球深部过程的“探针”,也是记录板块运动与大地构造演化的重要载体。例如,过铝质花岗

岩可作为陆内俯冲造山作用的岩石学证据([莫宣学等,2009](#))。

利用岩石化学成分判别构造环境的研究可追溯至[Pearce和Cann\(1971\)](#)的开创性工作。他们结合玄武质岩石的地球化学特征,成功识别出不同构造环境下形成的岩石类型。在此基础上,[Pearce等\(1984\)](#)进一步发展了针对花岗岩的微量元素判别方法。例如,在经典的Yb-Ta判别图中,花岗岩被划分为洋脊花岗岩、火山弧花岗岩、同碰撞花岗岩和板内花岗岩(即非造山花岗岩)。该方法利用稀土元素和高场强元素的比值,揭示花岗岩成因与构造过程(如大陆碰撞或地壳伸展)之间的潜在联系,为探索花岗岩的形成机制提供了重要工具([Harris et al.,1986](#))。

总体而言,前人从多个角度探讨了花岗岩类型、源区及其构造背景的关系,包括主量元素([Debon and Le Fort,1983;Batchelor and Bowden,1985](#))、微量元素([Pearce et al.,1984](#))、黑云母成分([Nachit et al.,1985](#))、锆石形态([Pupin,1980](#))、不透明氧化物([Ishihara,1977](#))、岩石包体([Didier et al.,1982](#))及矿化类型([Xu et al.,1982](#))等。[Barbarin\(1990,1999\)](#)对这些研究进行了系统总结,认为上述标志均反映了岩浆源区的特征,而源区的组成又与花岗岩形成时的构造环境密切相关。他进一步将花岗岩的成因类型、物质来源与威尔逊旋回相结合,提出三类构造环境下的花岗岩类型:①大陆碰撞作用形成的过铝质花岗岩(壳源型);②俯冲及构造体制转换期的准铝质及钙碱性花岗岩(壳-幔混源型);③大洋扩张、陆内隆起或裂谷作用形成的拉斑玄武质、钙碱性及过碱性花岗岩(幔源型)。这一分类思路与[Maniar和Piccoli\(1989\)](#)提出的造山型与非造山型分类体系存在一定相似性。[Rollinson和Pease\(2021\)](#)指出,与主量元素相比,微量元素在判别构造环境方面具有更高的分辨能力,而二元判别图往往比三元判别图表现出更高的成功率。

然而,现有的构造环境判别方法并非完美,甚至存在大的争议([Collins et al.,2020](#))。例如,高度演化的花岗岩在大陆裂谷与洋岛环境下可能表现出相似的地球化学特征,而岛弧与大陆弧花岗岩的成分也可能高度相似,从而增加了判别难度。特别是经历了复杂地质过程(如结晶分异、堆晶作用、地壳混染、岩浆混合、转熔晶夹带及热液改造)的花岗岩,其全岩地球化学组成往往难以直接反映原生熔体特征,使得构造背景的判别更加复杂([Verma et al.,2012;Rollinson and Pease,2021](#))。

[Verma等\(2012\)](#)在扩展数据来源的基础上,对[Pearce等\(1984\)](#)提出的四张判别图(Nb-Y、Ta-Yb、

Rb-Y+Nb 及 Rb-Yb+Ta )进行了系统评估,发现这些图存在较大重叠区域,难以精确区分火山弧与碰撞环境、板内与洋中脊环境等对应的花岗岩类型。为此,他们提出了一种基于判别函数的主量元素多维判别方法,并通过数据对比和测试,证实该方法在判别成功率上具有显著提升。

要准确判别花岗岩的构造环境,研究者需要完成两个核心任务,一是识别岩浆源区及其演化条件,二是确定与这些条件相匹配的构造背景。然而,这一过程往往存在多解性(Moyen, 2020)。例如,Clemens等(2020)指出,花岗岩主要源于地壳熔融,其成因并不局限于特定的构造环境。这意味着,即便不同地区的花岗岩在化学成分和矿物组合上表现出高度相似,其形成机制可能截然不同。因此,仅依赖元素判别法难以得出可靠结论,研究者必须结合区域地质背景、岩石组合、时空分布及构造特征等多方面信息进行综合分析。

事实上,Read(1957)早在其研究中便强调:“每一种花岗岩都应作为独立的研究对象,不仅要分析其自身特征,还需结合其地质环境进行探讨,并据其内在证据作出合理解释。”肖庆辉等(2002)在研究中进一步提出了花岗岩构造环境判别的流程与注意事项,强调应避免过度简化或模式化,尤其要在区域地质演化的时空框架约束下进行分析。王强等(2005)强调,要把岩石组合、时空分布规律与区域地质特征结合起来认识花岗岩形成的动力学背景;翟明国(2017)特别推荐周新民(2003)关于华南花岗岩的研究。周新民(2003)在研究华南四期花岗岩时,综合运用地质填图、时代划分、典型岩体解剖、岩石地球化学分析,并结合区域地质背景及构造记录,深入探讨了花岗岩成因与地球动力学过程的关系。此外,马昌前等(1994)提出了构造环境判别的四大准则,强调需结合岩体的构造样式、岩石组合、成因演化及区域地质背景,从多角度评估花岗岩的成因及其与地球动力学体系的关系。

未来的研究应致力于构建更精准的构造环境判别模型,并深入探讨花岗岩地球化学与同位素特征,尤其是结合其时空分布特征,以揭示构造背景与成因之间的内在联系。同时,应关注古老地球及地外天体非板块构造体制(如热管构造、软盖构造、活动盖构造)(Cawood et al., 2022)与早期花岗岩形成之间的潜在联系,并深入研究太古代富钠花岗岩(TTG)向富钾花岗岩转化的过程和动力学背景。此外,加强对特殊地质环境或成因复杂地区的区域性研究也非常重要。

现代高精度同位素测定技术、新型地球物理探测手段以及“数据智能(data intelligence)”方法(包括大

数据、机器学习、人工智能等)的应用,将进一步推动对不同构造环境下花岗岩成因多样性的理解,并为构造地质学与岩石成因学的研究提供更加科学、系统的理论支撑。值得一提的是,Takaew等(2024)在玄武岩构造环境判别中引入了机器学习方法,以克服传统方法因数据量受限而带来的局限性,这一方法同样值得在花岗岩研究中推广应用。

### 1.5 最新议题: 岩浆房与岩浆储库的视角之争 (2000年至今)

自Bowen提出花岗岩为玄武质岩浆结晶分异的晚期产物以来,传统的岩石学模型通常假设花岗岩的成分能够代表液态熔体的成分(例如,Tuttle and Bowen, 1958)。然而,Petford等(2000)指出,这些模型面临挑战:一方面,它们假设岩浆具有不合理的流变学特性;另一方面,它们无法有效解释地质与地球物理观测数据。因此,近年来,关于花岗质岩浆在侵位过程中的物理状态及其演化机制的讨论日趋激烈。该问题不仅涉及穿地壳岩浆通道系统的形成(Sakuyama, 1984; Ma et al., 1998),还影响我们对岩浆上升与侵位机制、分异与抽取过程,以及火山喷发动力学的理解,因而成为地球科学研究的重要议题。

Bowen(1919)在早期的研究中就指出,“岩浆”一词的定义存在分歧。传统上,岩浆被视为完全熔融的物质,即熔体的同义词。然而,从词源学角度来看,岩浆更准确的定义应是含有大量悬浮晶体的熔体,即“晶粥”。在本文中,“岩浆”指的是由熔体、晶体和挥发分组成的混合物,在火山活动时间尺度上仍具流动性;“晶粥”主要由大量晶体及少量晶间熔体组成,流动性极低,其中晶间熔体的体积分数通常低于50%(Glazner, 2021);而“熔体”则主要指液相(熔体及挥发分),其中的晶体含量较低。

1.5.1 岩浆侵位的状态: 熔体还是晶粥? 花岗质岩浆在侵位过程中的物理状态长期存在争议,核心问题包括两个方面:岩浆从源区迁移至岩浆储库时的物理形态;岩浆侵位后在储库中的演化过程。

关于岩浆侵位前的状态,学界主要存在两种观点:一是认为岩浆以熔体为主。Clemens和Mawer(1992)通过研究花岗岩体提出,岩浆在侵位前主要以高流动性的熔体形式存在,大部分结晶与分异作用发生在岩浆房内,而非源区。这一观点强调岩浆房的动态演化在形成典型花岗岩体中的关键作用。Petford等(2000)也支持该观点,认为大陆地壳中的大多数花岗质侵入体以低黏度、低晶体含量(约30%)的岩浆形式侵位。Barboni和Schoene(2014)在意大利厄尔巴岛的花岗岩研究中发现,高熔体比例的证据包括镁铁质微

粒包体中正长石巨晶的存在,长石巨晶及其他矿物环绕镁铁质包体呈漩涡状排列(周口店岩株中也常见这一现象,见马昌前,1988a,图3),以及正长石巨晶的密集分布(可能是流动分选的结果)。二是认为在侵位前是晶粥主导的状态。Pitcher(1987,1997)指出,花岗质岩浆在上升过程中必然含有一定比例的晶体。残余锆石的广泛存在及再循环晶的出现表明,岩浆具有非牛顿流体特性,并呈现较高的屈服强度。Copley等(2023)对英格兰北部Skiddaw花岗岩的研究发现,该岩体岩浆以富晶体晶粥形态侵位。这一发现挑战了“熔体主导”模型,表明岩浆在抵达中上地壳前已部分固结,熔体含量较低,侵位温度约为580~650℃。

如果岩浆在进入岩浆储库前就呈晶粥状态,那么矿物年代学和温度计测定的年龄与温度就只能主要反映地壳深部的结晶过程,而非中上地壳的侵位事件。此外,剪切波可在富晶体的晶粥体中传播,使得地震成像难以直接探测这些岩浆体的存在。这不仅影响我们对地壳内岩浆迁移机制的理解,也对岩浆储库的演化模式提出新的挑战。

关于岩浆侵位后的状态,一个多世纪以来,火山学和火成岩岩石学的经典范式都是以岩浆房存在为前提的,认为岩浆房充满了无晶体的熔体(Daly,1911;Bowen,1928;Latypov et al.,2022)。该模型假设岩浆房长期存在于地壳浅部,并间歇性向上部火山喷发中心输送岩浆,引发火山活动。维基百科对此的定义类似,将岩浆房描述为“位于地球表面之下的大型液态岩石池”。

然而,过去20年的研究挑战了这一观点。大量证据表明,岩浆系统可能以富晶体的多阶段形式穿透地壳,并以较快速度运移(Cashman et al.,2017;马昌前等,2020)。地球物理调查尚未确凿证实地壳内存在大规模、可喷发熔体主导的岩浆房(Huang et al.,2015;Lundstrom and Glazner,2016)。同时,热模拟研究显示,在上地壳形成大型岩浆体的物理机制存在难题——其所需的岩浆积累速率比地质年代学估算值高出一二个数量级(Glazner,2021)。此外,野外观测和年代学数据表明,大多数大型岩基是由多次岩浆脉冲逐步累积形成,而非由单个完全熔融的岩浆房冷却固结而成(马昌前等,2020)。因此,有学者提出,地壳中的岩浆储库主要以富晶体的晶粥形式存在,而熔体主导的岩浆房仅占其中一小部分(Druitt et al.,2012;Wotzlaw et al.,2014;马昌前等,2020)。

Petford等(2000)提出,深部岩浆主要以小批次熔体的形式快速上升,并最终形成板状侵入体,其侵位时间通常不超过10万年。Glazner(2021)的热模拟研究

表明,岩浆在上地壳的储存时间较短,主要聚集于下地壳,并在水平构造作用(如伸展作用)影响下,以岩席的方式聚集成深部岩浆储库。

传统的单次侵位模型认为,大型岩基由单一岩浆房冷却固结形成,并因此具有明显的成分连续性和分带结构。然而,近年来的研究表明,许多花岗岩侵入体更可能是多阶段岩浆活动的产物。

近年来,多次累积组装模型(incremental assembly model)得到越来越多的支持。该模型认为,岩浆房在长时间尺度上经历多次小规模岩浆注入与固化。例如,高精度年代学研究发现,一些花岗岩体的年龄分布存在显著差异,支持多阶段岩浆活动的假设。Ardill等(2020)研究美国内华达Tuolumne侵入杂岩体,发现其在1000万年内经历过多次岩浆的脉冲注入,每次新增的岩浆都会与较早形成的晶粥体相互作用,最终形成更大规模的岩浆储库。Pang等(2025)基于喀斯喀特火山带的地震成像数据发现,火山下方5~15 km深处存在低速地震波体,表明岩浆储库中的熔体比例仅为13%~32%,甚至可能低至3%~5%。综合地球物理和岩石学证据表明,低温、富水(最高可达10%~12% H<sub>2</sub>O)的酸性岩浆可长期赋存于地壳深部,并在短暂的高温岩浆补充事件中发生间歇性喷发(Cooper and Kent, 2014)。

总之,越来越多的研究支持晶粥主导的岩浆储库模型,并重新定义了我们对岩浆房的认知。当然,近期研究也提出了不同观点。Latypov等(2022)在对南非布什维尔德杂岩体的野外研究中发现,该岩体中的残留熔体柱厚度超过5 km,体积高达380 000 km<sup>3</sup>,远超地球历史上已知的任何超级喷发规模。因此,他们认为,在某些特殊条件下,地球可能仍然存在超大型、完全熔融的岩浆房。然而,这种现象是否仅限于镁铁质-超镁铁质岩浆体系,或仅发生于前寒武纪时期,仍有待进一步研究验证。

1.5.2 岩浆分异与熔体抽取:花岗质岩浆/晶粥能否发生分离结晶? Bowen(1915,1928)在其著作中系统提出了岩浆分异的概念,即不同类型的岩石可以从同一母岩浆中衍生而出。与之密切相关的熔体抽取则是指从多相岩浆源区或岩浆储库中分离出熔体。两者的主要区别在于岩浆分异通常是连续的,而熔体抽取往往呈现出脉动或周期性(Brown,2007)。最早提出熔体从结晶的花岗质岩浆或晶粥中抽取思想的是达尔文,他在1844年就指出,部分结晶的花岗质液相中某些成分的渗出进入裂隙,可能解释了詹姆斯岛上脉岩在矿物组成上的某些变化(Darwin,1844)。

岩浆分异与熔体抽取不仅深刻影响着大陆地壳

的形成和演化,还与火山喷发机制、花岗岩和流纹岩的成因密切相关,尤其是在高硅流纹岩及“高分异”花岗岩的形成过程中,以及与W、Sn、Nb、Ta、Li、Be、Rb、Cs、REE等稀有金属成矿作用的关系上具有重要意义(吴福元等,2021)。自鲍文以来,岩浆混合、液体不混溶、索列特扩散、成分梯度以及同化混染等过程都被认为对岩浆分异及火成岩多样性起到了关键作用,但分离结晶仍被广泛视为岩浆分异的核心机制(Grove and Brown, 2018)。

大量野外观察和实验研究均证实,花岗质岩浆体系中存在显著的分异现象(Pitcher, 1997; Cobbing, 2000; 吴福元等, 2007; Memeti et al., 2022)。例如,在某些长英质火山-侵入杂岩中,花岗岩与火山岩表现出成分互补关系(Bachmann and Bergantz, 2004; Gelman et al., 2014; Liu et al., 2025);东昆仑地区的二叠纪-三叠纪侵入岩和火山岩的对比研究也显示,火山岩的SiO<sub>2</sub>平均含量普遍高于侵入岩(马昌前等, 2024);在日本中部泷谷岩体中,从下部的花岗闪长岩到上部的斑状细粒花岗岩,全岩主量和微量元素的变化呈“S”形趋势,不相容元素含量随着SiO<sub>2</sub>的增加而升高,而斜长石中的铁含量则由岩体顶部向底部递增(Hartung et al., 2017)。这些证据表明分异作用确实存在,但具体的控制机制,尤其是花岗质岩浆是否能够经历分离结晶,仍存在争议。

鲍文在《火成岩的演化》(Bowen, 1928)中详细阐述了分离结晶的过程,其本质是晶体与熔体的相对运动。主要机制包括:首先,在结晶初期,晶体在重力作用下下沉,而熔体相对上升;其次,在变形作用的影响下,晶体与熔体发生相对运动。此外,单一晶体生长时局部熔体成分发生分异,可形成矿物环带结构,为岩浆分异提供微观证据。

早在1831—1836年间,达尔文在“比格尔号”探险旅程中,随身携带了莱伊尔所著的《地质学原理》(第一版),其中的地质学知识启发了他在考察火山岛时的观察。他由此注意到,晶体的重力沉降可能对火山岩成分差异的产生有重要影响(Harker, 1909; Pitcher, 1997)。随后,晶体沉降(crystal settling)就被看作是镁铁质岩浆分离结晶的重要机制(Bowen, 1928; Wager and Brown, 1968),主要表现为高密度矿物在重力作用下下沉并与熔体分离。这一过程在镁铁质岩浆杂岩中尤为明显,例如,橄榄石在岩体底部富集,全岩镁指数(Mg<sup>#</sup>)自底部向顶部递减(Gibb and Henderson, 1992)。然而,由于花岗质岩浆通常具有较高的晶体含量、较高黏度,并具有一定的屈服强度,晶体及小包体的沉降受到明显限制(Pitcher, 1997)。对于牛顿流体

而言,晶体沉降主要受熔体与晶体的密度差、熔体黏度及晶体粒度的影响(马昌前, 1989);但花岗质岩浆通常表现出非牛顿流体特征,其主要矿物与熔体之间的密度差较小,从而降低了晶体沉降的可能性。因此,Bowen(1928)强调,分离结晶问题不能简单等同于晶体下沉,而应考虑变形、重力及环带效应的影响。

近年来,部分学者对花岗岩是否经历分离结晶提出质疑(Reid et al., 1993; 张旗, 2012; 2023)。张旗(2023)引用Pitcher(1997)的观点指出,除少数富含B、F或H<sub>2</sub>O的特殊岩浆外,目前尚无确凿的野外证据支持花岗质岩浆曾发生大规模晶体沉降。同时,Castro等(2021)指出,钙碱性花岗质系统中缺乏单矿物层理(monomineralic layering),这一现象进一步表明,晶体沉降可能并非主导岩浆分异的主要机制。

在探讨花岗质岩浆是否能够经历分离结晶时,必须明确不同分异机制的适用条件及其在晶粥系统中的作用,并阐明如何在地壳深部的晶粥储库中有效提取熔体或分离晶体。Castro等(2021)将岩浆分异过程区分为两种途径:一是从部分结晶的岩浆中抽取熔体,二是直接将晶体从岩浆中分离,而这两种机制的发生条件各不相同。针对哪些机制可能促使花岗质岩浆或晶粥发生分离结晶的问题,Bachmann和Bergantz(2004)提出,晶体与熔体的分离可能通过受阻沉降、微沉降和压实作用等单独或协同作用实现。

受阻沉降(hindered settling)是指晶体在晶粥中因重力作用而下沉的过程。Bachmann和Bergantz(2004)认为,受阻沉降是晶体与熔体分离的最快机制。然而,Holness(2018)指出,由于岩浆中晶体含量较高,传统的斯托克斯沉降公式(马昌前, 1989)已难以适用。不过, Lee和Morton(2015)坚持认为,在高黏度的长英质熔体中,受阻沉降依然是推动晶体与熔体分离的主要机制。

微沉降(micro-settling)的概念最早由Miller等(1988)引入地质文献,用于描述单个晶粒在多孔、开放的晶体骨架中受重力作用向下迁移的过程。在这一过程中,小颗粒往往会溶解并分离,而大颗粒则趋于生长,其基本驱动力是扩散,因此在晶粥系统中的作用受到一定限制(Holness, 2018)。

压实作用(compaction)是指晶体在重力和堆积压力作用下发生自重压缩,导致颗粒间孔隙减少并挤出熔体。Holness(2018)将这一过程分为两种类型:一是黏性压实,即晶体在重力作用下通过塑性变形导致晶间熔体的挤出;二是机械压实,在岩浆流动、晶粥层滑塌或脱气过程中,刚性矿物颗粒在内部压力梯度或外部应力作用下重新排列,促使熔体分离。

此外, Holness (2018) 指出, 在花岗质晶粥系统中, 由于矿物密度较低且岩浆黏度较高, 外部应力(如高温岩浆补给、气体压滤或区域变形)能够促使高硅、贫晶体的流纹质熔体从晶粥中分离。Petford等(2000)进一步强调, 变形在花岗质岩浆的分离、运移及侵位过程中发挥着关键作用, 而流体出溶与岩浆脱气也可能会改变花岗质岩浆系统的流变学状态, 影响晶体-熔体的分离。

岩浆流动或压滤作用可能是导致花岗质岩浆成分变化的重要机制(例如, Pistone et al., 2015)。压滤作用(filter pressing)的思想最早由英国地质学家巴罗(George Barrow, 1853—1932)提出。巴罗是变质地质学的重要奠基人之一, 其名字如今被用于命名泥质变质岩的递增变质带(巴罗型变质作用)。巴罗提出, 苏格兰高地的小型伟晶岩侵入体可能是在晚期富钾的残余熔体被挤压后, 通过已结晶的石英、更长石和云母的网状结构从大岩体中迁移出来, 并最终被输送至地壳较高位置而形成的(Barrow, 1893)。

当高温岩浆脉冲侵入后, 晶粥体可能发生活化和对流, 不同时期的晶粥体相互融合, 形成更大规模的岩浆储库(Ardill et al., 2020), 加速岩浆混合与分异。随着新岩浆的不断上升, 岩墙对早期侵位的晶粥体施加挤压, 使晶间熔体沿岩墙方向迁移, 最终聚集成更为活跃的岩浆, 并与新侵入岩浆混合。据估算, 晶粥体可排出高达40%~50%的晶间熔体, 并可能形成富含斜长石的堆晶岩。这一过程的效率受晶粥体的结晶程度、变形强度及流变学特性的影响(Memeti et al., 2022)。特别在地壳浅部(<10 km), 富含挥发分的晶粥体中, 气体驱动的压滤作用对熔体与晶体的分离至关重要, 并可能形成富含气体的岩浆体, 为后续火山喷发积累物质和能量(Pistone et al., 2015)。

Garibaldi等(2018)提出, 构造压滤作用能够活化高晶体含量的晶粥, 实现粒间流纹质熔体的分离。Holness(2018)也指出, 无论是岩浆补给、气体压滤还是区域变形施加的外部应力, 都能有效促进晶粥活化和分异。众多研究者(如 Žák and Paterson, 2010; Alasino et al., 2019)均认为, 构造变形和压滤作用在晶粥体活化及岩浆分异过程中起着关键作用。

可见, 在岩浆的上升、运移及混合过程中, 由压滤作用引发的晶粥体变形可显著促进花岗质岩浆的分离结晶。值得注意的是, 相较于主要依赖重力驱动的压实作用, 压滤作用的核心在于外部应力(如剪切力、构造压力或岩浆压力)的作用。通过挤压、剪切或构造变形, 熔体被迅速“挤出”晶体骨架, 并沿裂隙或薄弱面迁移。

此外, 上地壳中晶粥体(岩浆储库)的规模、存续时间和活跃程度不仅影响火山喷发行为, 也直接决定岩浆储库的分异效率及其在地壳中的垂向迁移(Ardill et al., 2020)。Hartung等(2019)通过 rhyolite-MELTS 计算与热模拟评估了上地壳长英质岩浆的分离与抽取过程, 发现初始含水量对岩浆分异起着决定性作用。

他们指出, 当花岗闪长质岩浆的初始含水量超过2%时, 一旦结晶度达到40%~50%(即流变学锁定点), 残余熔体便会进入水饱和状态(Hartung et al., 2019)。此时, 熔体黏度降低, 晶体与熔体的密度差增大, 促使熔体分离, 在岩浆储库顶部形成富熔体的帽状小岩浆房。然而, 由于还有大约20%~30%的熔体可能被困在堆晶中, 区分堆晶岩与抽取出的高分异熔体存在一定困难(Lee and Morton, 2015)。为解决这一问题, 他们提出了一种定量估算堆晶岩中被困熔体比例的方法(Lee and Morton, 2015)。

另外, 如果长英质岩浆储库的初始含水量较低(<2% H<sub>2</sub>O), 通常只能形成孤立的小型岩浆囊(Hartung et al., 2019)。在适宜条件下, 岩浆停留时间越长, 可抽取的残余熔体也就越多(Dufek and Bachmann, 2010)。此外, 含水的花岗质岩浆因较低的黏度和密度(Clemens, 2005), 更有利于岩浆分异。

在对东昆仑三叠纪花岗岩-火山岩关系的研究中, 我们发现, 在富水的花岗质岩浆系统中, 随着储库压力的增加, 熔体黏度显著降低, 从而加速了岩浆分离、熔体迁移及喷发(Zou and Ma, 2024)。此外, 深部岩浆的持续补给与挥发分释放不仅能提高储库压力, 还能延长熔体抽取时间; 当岩浆储库处于较大深度时, 有助于维持长期的分异过程, 避免因散热过快而导致的快速冷却(Glazner, 2021)。

地质与地球物理证据亦支持这一观点。例如, Lipman(2007)指出, 火山喷发时的岩浆储库通常位于地壳深部 10~15 km处, 而圣胡安山脉中部的火山喷发后破火山口累计下沉深度也达到了10~15 km。Hartung等(2017)的研究表明, 日本中部泷谷岩体中的斑状细粒花岗岩是在9~6.5 km深度从花岗闪长岩晶粥体中抽取出来的, 当时晶粥体的结晶度为45%~65%。

总体而言, 在不同条件下, 各种机制都可能影响花岗质岩浆的分离结晶。近年来, 越来越多的研究表明, 外部应力诱发的压滤作用和构造变形是促进晶粥体活化及岩浆分异的重要动力。

除上述外, 围绕岩浆房与岩浆储库之争, 还涉及其他一些科学问题。例如, 花岗质侵入体完全结晶的温度到底能有多低? 深成岩与火山岩在成因上是否相关? 是否存在能够为超级火山喷发提供物质来源的

大型岩浆房? 对于这些问题的探讨,可参考Ackerson等(2018)、马昌前等(2020,2024)和van Zalinge等(2022)等相关研究。

## 2 花岗岩问题的科学演进

### 2.1 花岗岩问题演进的逻辑与科学思维

科学始于问题。花岗岩问题的演进不仅折射出地质学理论的发展历程,更展现了科学研究如何在积累、危机与革命的循环中不断前行。过去两百多年间,关于花岗岩的成因、演化及其构造背景的争论(图1),不仅映射出科学范式的变迁,也反映了观测技术的进步与研究思维的演化。花岗岩问题的研究历程遵循科学争论的基本逻辑框架,即对立与竞争、证据积累与修正、综合与融合的动态过程。按照库恩(2012)的科学革命模型,花岗岩研究的发展大致可划分为三个主要阶段(González-Esvertit et al., 2025)。

#### (1) 对立与竞争: 早期范式的建立 (18世纪末至19世纪初)

这一阶段的研究主要依赖宏观观察和有限的矿物学手段,形成了两大对立观点。水成论认为花岗岩是海水沉淀形成的,强调沉积与化学作用的主导性;而火成论则主张花岗岩源于地下岩浆冷凝,突出岩浆活动的作用。这一时期属于库恩所描述的“常规科学”阶段,研究者在既定范式下尝试解释观测现象。尽管存在诸多未解之谜,但整体研究仍沿着线性积累的路径推进。

#### (2) 证据积累与修正: 范式的竞争 (19世纪至20世纪中期)

随着显微镜技术、岩相学、实验岩石学和放射性测年技术的发展,花岗岩研究进入机制探讨阶段,学界的争论变得更加复杂,主要集中在两方面:一是变成派与岩浆派之争。变成派认为花岗岩由围岩变质转换而

来,而岩浆派坚持其来源于岩浆冷却结晶。随着越来越多的观测数据(如花岗岩与围岩的侵入接触关系、先后结晶的证据)与传统理论相悖,研究者对旧范式的信任度下降。二是原地派与异地派的矛盾。原地派认为花岗岩源自原地岩石的改造,不存在“空间问题”,而异地派则主张深部岩浆上升侵位,通过各种方式取得占位空间。这些争论持续数十年,并在20世纪中叶进入库恩所谓的“异常现象堆积”阶段,即越来越多的新发现无法被旧范式解释,促使科学家寻找新的理论框架。

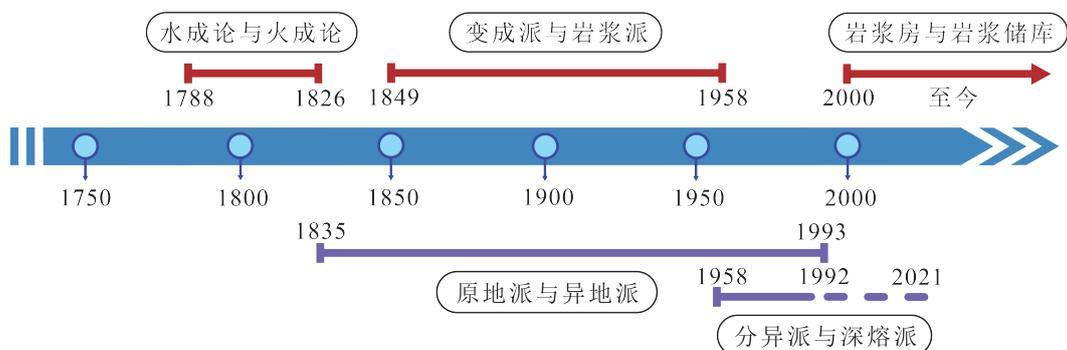
#### (3) 综合与融合: 范式转换与现代科学的深化 (20世纪中后期至21世纪)

20世纪中后期,随着板块构造理论的兴起,以及地球化学、同位素年代学、热力学计算和地球物理探测等技术的应用,花岗岩研究进入新的范式。

在深熔派与分异派的辩论中,深熔派通过高温高压实验模拟,提出大陆地壳部分熔融是形成花岗岩的重要机制,而分异派更注重利用岩浆分异理论解释岩浆房内的成分变化和花岗岩的形成。两者的争论催生了更具解释力的理论模型,并引发了新的研究方向。

进入21世纪后,研究视角进一步拓展,岩浆储库和岩浆通道系统的概念成为新的前沿议题。地球物理探测、数值模拟、流体动力学分析和微区原位探测等手段揭示了岩浆系统的复杂性,使花岗岩成因研究从单一假设走向多学科交叉验证。与此同时,“空间问题”也得到了新的诠释,岩墙扩展模式、热气球膨胀模式与侵入体累积组装机制的结合,使得花岗岩的迁移、侵位和形成机制得以更完整地理解。

科学思维方式在花岗岩研究的演化过程中也经历了深刻的转变。在18—19世纪,属于经验观察和归纳阶段,研究者主要依赖于宏观观察和矿物学分析,通过归纳总结花岗岩的成因模式。19—20世纪,为实验



每场争论的起点均以双方观点最早并存的时间为标志,其终点以其中一方或双方的观点获得学术界广泛认可或另一观点逐渐式微的时间为标志

图1 过去200多年间花岗岩问题争论与历史演进示意图

Fig.1 Schematic diagram of the debates and historical evolution of the granite problem over the past 200 years

岩石学与演绎推理阶段,由于显微镜技术、岩相学、实验岩石学的发展,使得研究者可以通过实验手段模拟花岗岩的形成,采用演绎推理方式验证假设。到20—21世纪,则进入地球物理、地球化学和流体力学的量化分析阶段,其特征是,利用先进的同位素年代学、热力学计算、数值模拟等定量方法,使得花岗岩研究进入数据驱动的综合分析时代。

回顾花岗岩研究的演进历史,可以发现其发展路径符合库恩的范式转变模式。从最初的水成论—火成论对立,到变成派—岩浆派的分歧,再到深熔派—分异派的竞争,每一次理论更新都经历了“常规科学—危机—革命”的循环。更重要的是,这些争论不仅推动了地质学的进步,也为未来研究开辟了新的方向。

## 2.2 社会需求与技术进步双驱动的深入研究

地质学的进步不仅依赖于科学文化氛围、学术交流环境及科学家的个人兴趣与创造力,更受到社会需求和技术进步的双重驱动。这一互动关系体现了基础研究与实际应用的紧密结合,并推动了地球科学的持续发展。

以18世纪末的英国为例,工业革命的蓬勃发展使煤炭、铁矿等资源需求急剧增长,从而使地质学成为支撑矿产资源开发的重要学科。在这一背景下,苏格兰地质学家詹姆斯·赫顿提出了“火成论”,认为地壳物质循环受深部热能驱动,岩浆冷却凝固形成花岗岩,这一观点与当时流行的“水成论”相对立。赫顿的理论不仅基于对岩石和地层的细致观察,还紧密契合了矿业需求和工业发展,为矿产勘探提供了科学指导。

赫顿与英国工业革命的重要人物、蒸汽机改良者詹姆斯·瓦特(James Watt)私交甚笃。两人在书信中频繁交流科学问题,并曾共同进行地质考察(Jones et al., 1994; Leeder, 2020)。在18世纪之前,英国冶铁业长期以木炭作为燃料,导致生产受限,并造成森林资源的严重消耗。据估算,当时生产1万吨铁需砍伐10万英亩森林(Fernihough and O'Rourke, 2020)。1709年,亚伯拉罕·达比(Abraham Darby)发明了煤焦冶铁法,而1769年瓦特获得蒸汽机专利后,蒸汽机迅速普及,成为工业生产的核心动力。煤炭点燃了第一次工业革命的火焰(徐义刚, 2024)。煤炭的广泛使用不仅是工业革命的重要前提(Wrigley, 2010),也引发了冶金工业的变革,使钢铁工业得以大规模扩张,并加速了工业化和城市化进程。

由于煤炭体积和重量庞大,且运输成本高昂,工业企业若能在煤田附近建厂,将大幅节约成本。因此,工业化过程中,靠近煤矿的地区城市化进程最快,对人口分布也产生了深远影响。据统计,1750年之前,欧洲

各城市的人口增长率无显著差异;但1750年后,距离煤田25 km以内的城市人口增长速度约为远离煤田城市的两倍。例如,在18世纪末,前者人口增长74%,后者仅增长33%;到19世纪初,前者增长111%,后者增长57%;至19世纪晚期,前者增长123%,后者增长88%。整个150年间,靠近煤矿的城市人口累计增长721%,远离煤矿的城市仅增长293%(Fernihough and O'Rourke, 2020)。这些数据充分表明,矿业在工业化和城市化过程中发挥了重要作用,同时也凸显了地质学对经济发展的深远影响(Wrigley, 2010)。所以,“没有地质学,就没有工业革命”(徐义刚, 2024)。

进入20世纪,社会需求的变化持续塑造着地质学研究的方向。二战后的经济复苏(20世纪40—50年代)推动了岩浆作用与成矿关系研究,以满足资源勘探的需求。70—80年代,板块构造理论的成熟以及全球能源危机的加剧,进一步推动了对岩浆岩成因与资源潜力的深入研究,花岗岩逐渐成为油气储层、成矿作用和热能资源评估的重要研究对象(Wang et al., 2022)。同时,城市化的加速发展提高了对花岗岩建筑石材的需求,这促使科学家深入研究其物理力学特性,并推动了绿色矿业和资源可持续发展的技术创新。

社会需求的演变与技术进步相辅相成,为花岗岩研究提供了有力的技术支撑。现代科学技术的飞速发展,基础科学的交叉应用,使地质学家能够更精准地分析岩石的矿物组成、成因环境和演化历史,探索岩浆作用的深部过程和动力学机制。例如,光学显微镜、电子探针和X射线衍射技术的应用,使研究者能够精细解析岩石的矿物结构;放射性同位素分析提供了岩浆演化的时间尺度,帮助厘定花岗岩的成因;地震波研究、热力学模拟及流体力学方法的引入,揭示了深部岩浆与地壳相互作用的动力学过程,深化了对岩浆系统演化的理解。

综上所述,花岗岩研究的发展是社会需求与技术进步共同驱动的结果。从矿产资源开发到能源利用,再到防灾减灾等多个领域,科技创新不断加深人类对花岗岩成因的认识,并推动地质学更紧密地服务于社会发展。经济增长离不开创新,而工业革命以来的经济腾飞更是建立在矿业的基础之上(Fernihough and O'Rourke, 2020)。

## 3 花岗岩问题争论与演进的启示

### 3.1 争论的遗产:理论基础与方法论的提升

花岗岩问题的争论历经两个多世纪,形成了丰富的地质学思想遗产。从早期水成论与火成论的对立到现代分异派与深熔派的分歧,每一次争论都为现代地

质学奠定了重要的理论基石与方法论框架。这些经典论战不仅推动了花岗岩学和岩浆成因理论的深入发展,也见证了科学哲学从推测向实验验证的演进。

例如,变成派强调野外观察在花岗岩成因研究中的核心地位,主张“最好的地质学家是见过最多岩石的人”(Read, 1939; 1957);而岩浆派则认为,“无论如何观察岩石,人们都无法直接看到它们的形成过程”(Bowen, 1948),强调多学科结合以深入探究花岗岩的起源。正是变成派与岩浆派的分歧,以及分异派与深熔派的争论,催生了实验岩石学和高精度同位素技术的广泛应用,使花岗岩源区的化学演化过程得以量化研究。而原地派与异地派围绕“空间问题”的讨论,则进一步凸显了构造地质学、地球物理学与岩石学交叉研究的重要性,为花岗岩成因分析提供了更加立体的解析框架(Magee et al., 2018)。

近年来,围绕岩浆房与岩浆储库的现代争论引入了地球物理探测和应力场模拟等前沿技术,揭示了岩浆通道系统的复杂性及其在大陆地壳生长与演化中的关键作用。这些争论不仅深化了对地质过程的理解,也在不断创新中积累了宝贵的学术资源与方法论启示。事实上,争论本身已成为花岗岩研究的珍贵遗产,为后续研究提供了多维度的理论视角、实验技术以及跨学科整合的研究范式。

花岗岩问题的争论也凸显出,科学进步往往源于矛盾的交锋与最终的融合。正如Young (2003)所言:“历史告诉我们,那些今天看似荒诞的观点,曾被才华横溢的先辈视为合理。具有历史眼光的岩石学家会意识到,当下许多看似不可动摇的理论,或许终将成为后人莞尔一笑的对象。正因如此,回顾历史能帮助岩石学家以更开放和包容的心态看待不同的学术观点。”另一方面,科学的光芒往往在回望中熠熠生辉。当研究陷入困境时,前人的思想或许正是照亮前路的微光。例如,巴罗(Barrow, 1893)关于伟晶岩形成的压滤作用理论,历经岁月洗礼,仍值得后人细细品味。

### 3.2 对未来地质学研究的启示

围绕花岗岩成因的长期争论不仅深化了对岩浆作用与地壳演化的理解,也揭示了科学发展的核心逻辑——不同假说的碰撞、修正与融合共同推动理论创新。变成派与岩浆派的对立与互动促进了对岩浆动力学及地壳深部过程的认知,凸显了解决复杂地质问题需要多学科方法的综合应用。随着高温高压实验、地球化学分析和数值模拟等技术的进步,研究者能够更精准地验证假设,拓展研究视野,从而深入探讨岩浆源区的化学演化及岩浆房的动力学过程。尽管学界对花

岗岩成因的争论仍在持续,但正是这些科学辩论不断推动理论发展,拓展人类对地球深部过程的认知边界。

未来的花岗岩研究将更加注重学科交叉与系统性认知,强化跨学科合作,推动地质学方法论的完善。从岩浆的部分熔融、提取、侵位、混合,到晶粥活化、火山喷发与冷凝结晶,每个阶段的过程都赋予了岩浆通道系统的高度复杂性。因此,研究不应局限于岩石学本身,而应以地球系统科学的视角,引入更多基础学科的方法。例如,探讨岩浆脱气、流体活动、地表风化剥蚀及其与古气候变化的关系,以揭示地质过程的动态耦合及地球多圈层的相互作用。具体而言,可开展岩浆侵位过程的岩石力学实验,以分析岩浆如何克服围岩阻力形成侵入体;运用流体力学原理对岩浆房对流进行模拟,以研究不同成分的岩浆如何通过对流混合影响岩浆演化;利用典型矿物的扩散系数约束矿物生长、岩浆运移及岩浆房长期演化的时间尺度(马昌前, 1988b);引入体视学方法,从二维岩石截面定量推断三维侵入体的结构特征(马昌前等, 1994)。这些方法的应用不仅为岩浆成因研究提供了新思路,也为其他地质学问题提供了重要借鉴,强调理论与实证的紧密结合。

从18世纪水成论与火成论的对立,到现代对花岗岩成因的多维度探讨,科学进步始终依赖野外观测、实验验证与数据积累。未来的研究需整合多学科数据,避免依赖单一证据或理论推导,以推动科学创新。科学争论的动态性凸显了理论创新的驱动力。变成派与岩浆派、分异派与深熔派的交锋表明,科学进步并非某一理论的最终胜利,而是多种观点的相互碰撞、融合与修正的过程。因此,研究者应保持开放思维,勇于挑战现有理论,并通过多学科交叉推动理论深化。

此外,花岗岩争论突出了多尺度研究的重要性。从岩浆侵位的空间分布,到岩浆储库和晶粥系统的研究前沿,都反映了时间与空间尺度在理解复杂地质现象中的关键作用。未来研究需在局部与全球尺度之间建立联系,结合构造活动和地壳演化背景,推动区域性与全球性地质过程的协同研究。

花岗岩研究的未来发展不仅依赖科学理论的进步,还与社会需求和技术突破紧密相关,体现了基础研究与应用实践的深度融合。近年来,花岗岩研究的应用已拓展至自然灾害防治、资源勘查、能源开发和环境保护等多个领域。例如,花岗岩研究与火山喷发机制、矿床成因、油气资源勘查及地热开发密切相关(Wang et al., 2022; Zhou et al., 2020)。这预示着未来研究将进一步探索岩浆分异与抽取机制、火山喷发过程、矿床富集作用及资源勘探技术,使理论研究更加紧密地服

务于社会需求。随着全球矿物—岩石—地球化学数据库和数据智能技术的发展(Ouadfeul et al., 2023),尤其是基于因果推断的机器学习方法(Pearl and Mackenzie, 2018),可以有效识别变量之间的混杂因子、增强模型可解释性,花岗岩研究将向更精细化、定量化和综合化的方向迈进,为地球科学的前沿探索和应用研究提供更加坚实的支撑。

### 3.3 对行星地质学的启示

花岗岩问题的研究不仅深化了对地球岩浆过程的理解,也为行星地质学的探索提供了重要启示。

首先,花岗岩成因的经典争论为理解行星岩浆过程提供了借鉴。对岩浆分异和深熔作用的研究,不仅帮助科学家认识地球地壳的形成与演化,也为探索月球、火星和金星表层岩石的成因提供了关键参考。例如,月球样品中发现的“月球花岗岩”(马昌前, 2004),以及火星、金星和水星上检测到的高硅沉积物及可能的长英质火成岩(Squyres et al., 2008; 肖龙, 2013; Wray et al., 2013),都可能与地球花岗岩的形成机制存在相似性。这些发现暗示,地外天体可能经历了与地球类似的岩浆分异和热液作用,借鉴花岗岩成因研究的思想将有助于深入探讨行星岩石圈演化机制。

其次,花岗岩研究中有关“岩浆房与岩浆储库”模型以及穿地壳岩浆通道系统的认识,为理解行星地壳岩浆过程的复杂性开辟了新思路。正如Campbell和Taylor(1983)所言:“没有水,就没有花岗岩;没有大洋,就没有大陆。”近年来的研究表明,月球上的水可能比此前认为的更为丰富(Hayne et al., 2021),这为认识月球岩浆演化及水在行星地质演化中的作用提供了新视角。结合数值模拟与地球物理探测,可以进一步揭示其他行星岩浆侵位、分异与冷却的动力学机制,深化对行星内部热演化及岩石圈构造的理解。

第三,花岗岩研究的方法体系为行星地质学提供了强有力的工具。高温高压实验岩石学、同位素地球化学、高精度矿物分析及数值模拟技术的结合,不仅可解析地球岩石记录,也可用于揭示其他行星地表与内部的物质组成及其演化历史。例如,人工智能与机器学习的应用已开始用于行星探测数据的处理与解译,使科学家能够更精准地识别行星表面的岩石类型及其成因演化过程。

此外,花岗岩研究对地球特性的揭示,也为行星地质学中的对比研究提供了新思路。地球地壳的多样性与稳定性在支持复杂生命系统方面具有独特优势,而这一视角可用于探索地外天体上的潜在生命环境。例如,通过比较地球与火星、木卫二等天体的地质特征,可以进一步识别行星宜居性的关键因素,并为未来

深空探测提供科学依据。

未来,随着全球对战略性关键矿产需求的增加,花岗岩相关理论将在月球、火星乃至小行星等天体资源开发中发挥更大作用。新技术的不断发展,特别是数据智能和高分辨率遥感探测,将进一步提升行星地质学研究的精度,推动人类对地球及行星演化的系统性理解。

## 4 结语

花岗岩成因研究历经两百余年,贯穿了地质学从早期的经验描述到现代精密分析的发展历程。围绕花岗岩成因的科学争论与理论演进,不仅推动了地质学核心领域的持续进步,也为理解地球及行星演化提供了重要的启示。

(1) 花岗岩成因的争论推动了地质学理论的发展。从水成论与火成论的对立,到分异派与深熔派的分歧,再到岩浆房与岩浆储库视角的碰撞,花岗岩成因的研究展现了科学探索的多元视角和创新动力。这些理论冲突不仅深化了对花岗岩成因、地壳演化及岩浆通道系统形成机制的理解,也促进了地质学方法论的完善,成为推动学科发展的重要动力。科学争论本身促进了对地质过程多样性和复杂性的深入认识,并不断挑战和优化现有的理论框架。

(2) 花岗岩问题研究的演进反映了地质学的多学科融合。随着地球化学、同位素年代学、高精度地球物理探测和数值模拟技术的不断发展,花岗岩研究已从单一的岩性描述转向综合性、跨学科的分析。这一演进不仅深化了对岩浆演化、地壳构造及板块动力学的认识,也推动了资源勘查、能源开发及地质灾害预测等应用领域的发展。尤其在战略性矿产(如钨、锡、钼、稀土元素、锂等)资源评估方面,花岗岩研究为战略性资源的全球布局 and 开发提供了科学依据。

(3) 花岗岩研究为未来地质学及行星地质学提供了深远的启示。近年来,随着对战略性关键矿产需求的增长及太空资源勘探的兴起,花岗岩相关理论与技术在行星地质学中的应用将日益广泛。例如,在月球、火星等天体的探测任务中,基于花岗岩研究的矿物成分分析和岩浆演化模型,有助于揭示行星内部热演化过程,并为未来太空采矿及能源开发提供科学支持。

展望未来,全球资源竞争加剧以及科学技术的持续进步,将进一步推动花岗岩研究的深入发展。面对战略性关键矿产供应链的不确定性,地质学在矿产勘查、资源评估和可持续开发方面的作用将愈发重要。同时,数据智能等前沿技术的引入,将极大提升花岗岩成因研究的精确度和预测能力,为地球科学和行星地

质学提供全新的研究范式。这一研究不仅有助于深化对地质过程的理解,还将为探索宇宙演化的复杂性提供新的科学视角和实践经验。

**利益冲突声明:** 作者保证本文无利益冲突。

**致谢:** 审稿专家和编辑部提出的宝贵意见与建议对提升稿件质量起了很大作用,续海金、张金阳、王连训、熊富浩和刘彬等阅读了初稿并提出了修改建议,高珂和于涛协助查找资料并提出建议,研究生黄贵治和熊淮绘制了插图并整理了参考文献,在此一并表示衷心感谢!

**作者的话:** 自硕士研究生毕业以来,我就得到了南京大学周新民教授的悉心指导与热情关怀。他以渊博的学识、高尚的品格和宽广的胸怀,对作者的学术成长产生了重要影响。如今斯人已逝,我怀着沉痛的心情深切缅怀这位德高望重的先生。特别感谢徐夕生教授约稿,使我得以撰写此文,表达对周新民教授的深切怀念和崇高敬意。愿先生的精神风范长存于我们的记忆与心间!

#### 参考文献 (References):

- Ackerson M R, Mysen B O, Tailby N D, Watson E B. 2018. Low-temperature crystallization of granites and the implications for crustal magmatism. *Nature*, 559(7712): 94–97
- Alasino P H, Ardill K, Stanback J, Paterson S R, Galindo C, Leopold M. 2019. Magmatically folded and faulted schlieren zones formed by magma avalanching in the Sonora Pass Intrusive Suite, Sierra Nevada, California. *Geosphere*, 15: 1677–1702
- Anderson E M. 1905. The dynamics of faulting. *Transactions of the Edinburgh Geological Society*, 8(3): 387–402
- Annen C, Blundy J D, Sparks R S J. 2006. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones. *Journal of Petrology*, 47(3): 505–539
- Arnold Y P, Cabassi J, Tassi F, Caffè P J, Vaselli O. 2017. Fluid geochemistry of a deep-seated geothermal resource in the Puna plateau (Jujuy Province, Argentina). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 338: 121–134
- Ardill K E, Paterson S R, Stanback J, Alasino P H, King J J, Crosbie S E. 2020. Schlieren-bound magmatic structures record crystal flow-sorting in dynamic upper-crustal magma-mush chambers. *Frontiers in Earth Science*, 8: 190
- Bachmann O, Bergantz G W. 2004. On the origin of crystal-poor rhyolites: Extracted from batholithic crystal mushes. *Journal of Petrology*, 45(8): 1565–1582
- Backlund H G. 1938. The problems of the rapakivi granites. *The Journal of Geology*, 46(3, Part 2): 339–396
- Backlund H G. 1946. The granitization problem. *Geological Magazine*, 83(3): 105–117
- Barbarin B. 1990. Granitoids: Main petrogenetic classifications in relation to origin and tectonic setting. *Geological Journal*, 25(3–4): 227–238
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46(3): 605–626
- Barboni M, Schoene B. 2014. Short eruption window revealed by absolute crystal growth rates in a granitic magma. *Nature Geoscience*, 7(7): 524–528
- Barrow G. 1893. On an intrusion of muscovite-biotite gneiss in the southeastern Highlands of Scotland, and its accompanying metamorphism. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 49: 330–358
- Barth T F W. 1948. Recent contributions to the granite problem. *The Journal of Geology*, 56(3): 235–240
- Batchelor R A, Bowden P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 48(1–4): 43–55
- Bateman P C, Chappell B W. 1979. Crystallization, fractionation, and solidification of the Tuolumne intrusive series, Yosemite National Park, California. *Geological Society of America Bulletin*, 90(5): 465
- Bea F. 2012. The sources of energy for crustal melting and the geochemistry of heat-producing elements. *Lithos*, 153: 278–291
- Becker G F. 1897. Fractional crystallization of rocks. *American Journal of Science*, 4: 257–261
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects. *Lithos*, 97(1–2): 1–29
- Bowen N L. 1915. The later stages of the evolution of the igneous rocks. *Journal of Geology*, 23(8): 1–91
- Bowen N L. 1919. Crystallization-differentiation in igneous magmas. *The Journal of Geology*, 27(6): 393–430
- Bowen N L. 1928. *The Evolution of the Igneous Rocks*. Princeton: Princeton University Press, 332
- Bowen N L. 1948. The granite problem and the method of multiple prejudices. In: Gilluly J (ed.), *The Origin of Granite*. Geological Society of America Memoir, 28: 79–90
- Breiter K, Förster H J, Škoda R. 2006. Extreme P-, Bi-, Nb-, Sc-, U- and F-rich zircon from fractionated perphosphorous granites: The peraluminous Podlesí granite system, Czech Republic. *Lithos*, 88(1–4): 15–34
- Brown M. 2001. Crustal melting and granite magmatism: Key issues. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(4–5): 201–212
- Brown M. 2007. Crustal melting and melt extraction, ascent and emplacement in orogens: Mechanisms and consequences. *Journal of the Geological Society*, 164(4): 709–730
- Brown M. 2008. Granites, migmatites and residual granulites: relationships and processes. *Mineralogical Association of Canada Short Course*, 38: 97–144
- Buddington A F. 1959. Granite emplacement with special reference to North America. *Geological Society of America Bulletin*, 70(6): 671
- Campbell I H, Taylor S R. 1983. No water, no granites-No oceans, no continents. *Geophysical Research Letters*, 10(11): 1061–1064
- Carmichael I S E, Turner F J, Verhoogen J. 1974. *Igneous Petrology*. New York: McGraw-Hill
- Cashman K V, Stephen J Sparks R, Blundy J D. 2017. Vertically extensive and unstable magmatic systems: A unified view of igneous processes. *Science*, 355(6331): eaag3055
- Castro A. 1986. Structural pattern and ascent model in the Central Extremadura batholith, Hercynian belt, Spain. *Journal of Structural Geology*, 8(6): 633–645
- Castro A. 2014. The off-crust origin of granite batholiths. *Geoscience*

- Frontiers, 5(1): 63–75
- Castro A, Rodríguez C, Díaz Alvarado J, Fernández C, García Moreno O. 2021. Magma differentiation and contamination: constraints from experimental and field evidences. In: Masotta M, Beier C, Mollo S (eds.). *Crustal Magmatic System Evolution: Anatomy, Architecture, and Physico-Chemical Processes*. Wiley-American Geophysical Union, 107–124
- Cawood P A, Chowdhury P, Mulder J A, Hawkesworth C J, Capitanio F A, Gunawardana P M, Nebel O. 2022. Secular evolution of continents and the Earth system. *Reviews of Geophysics*, 60(4): e2022RG000789
- Cecil M R, Rusmore M E, Gehrels G E, Woodsworth G J, Stowell H H, Yokelson I N, Chisom C, Trautman M, Homan E. 2018. Along-strike variation in the magmatic tempo of the coast mountains batholith, British Columbia, and implications for processes controlling episodicity in arcs. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(11): 4274–4289
- Chappell B W, Bryant C J, Wyborn D, White A J R, Williams I S. 1998. High- and low-temperature I-type granites. *Resource Geology*, 48(4): 225–235
- Chappell B W, White A J R. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173–174
- Chen G N, Grapes R. 2007. *Granite Genesis: In-Situ Melting and Crustal Evolution*. Berlin: Springer-Verlag
- 陈骏, 王汝成, 朱金初, 陆建军, 马东升. 2014. 南岭多时代花岗岩的钨锡成矿作用. *中国科学(地球科学)*, 44(1): 111–121 [Chen J, Wang R C, Zhu J C, Lu J J, Ma D S. 2014. Multiple-aged granitoids and related tungsten-tin mineralization in the Nanling Range, South China. *Scientia Sinica (Terrae)*, 44(1): 111–121 (in Chinese with English abstract)]
- Clarke D B. 1992. *Granitoid Rocks*. London: Chapman & Hall
- Clarke D B, Erdmann S. 2008. Is stoping a volumetrically significant pluton emplacement process? *Comment. Geological Society of America Bulletin*, 120(7–8): 1072–1074
- Clemens J D. 2005. Granites and granitic magmas: Strange phenomena and new perspectives on some old problems. *Proceedings of the Geologists' Association*, 116(1): 9–16
- Clemens J D, Mawer C K. 1992. Granitic magma transport by fracture propagation. *Tectonophysics*, 204(3–4): 339–360
- Clemens J D, Stevens G, Bryan S E. 2020. Conditions during the formation of granitic magmas by crustal melting—Hot or cold; drenched, damp or dry? *Earth-Science Reviews*, 200: 102982
- Cobbing J. 2000. *The Geology and Mapping of Granite Batholiths*. In: *Lecture Notes in Earth Sciences*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Coleman D S, Gray W, Glazner A F. 2004. Rethinking the emplacement and evolution of zoned plutons: Geochronologic evidence for incremental assembly of the Tuolumne Intrusive Suite, California. *Geology*, 32(5): 433
- Collins W J. 1996. Lachlan Fold Belt granitoids: Products of three-component mixing. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 87(1–2): 171–181
- Collins W J, Beams S D, White A J R, Chappell B W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189–200
- Collins W J, Huang H-Q, Bowden P, Kemp A I S. 2020. Repeated S–I–A-type granite trilogy in the Lachlan Orogen and geochemical contrasts with A-type granites in Nigeria: Implications for petrogenesis and tectonic discrimination. *Geological Society, London, Special Publications*, 491(1): 53–76
- Collins W J, Murphy J B, Blereau E, Huang H Q. 2021. Water availability controls crustal melting temperatures. *Lithos*, 402–403: 106351
- Cooper K M, Kent A J R. 2014. Rapid remobilization of magmatic crystals kept in cold storage. *Nature*, 506(7489): 480–483
- Copley A, Weller O, Bain H. 2023. Diapirs of crystal-rich slurry explain granite emplacement temperature and duration. *Scientific Reports*, 13(1): 13730
- Cruden A R, McCaffrey K J W. 2001. Growth of plutons by floor subsidence: Implications for rates of emplacement, intrusion spacing and melt-extraction mechanisms. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(4–5): 303–315
- Daly R A. 1903. *Mechanics of igneous intrusion*. *American Journal of Science*, 15: 107–126
- Daly R A. 1911. *The nature of volcanic action*. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 47: 48–119
- Daly R A. 1914. *Igneous rocks and their origin*. McGraw-Hill, 563
- Daly R A. 1933. *Igneous rocks and the depths of the Earth*. McGraw-Hill, 598.
- Daly R A. 1949. *Granite and metasomatism*. *American Journal of Science*, 247(11): 753–778
- Dana J D. 1849. *Geology. Exploring Expedition During the Years 1838–1842 Under the Command of Charles Wilkes, U.S.N., v. 10*. New York: G. P. Putnam
- Darwin C. 1844. *Geological Observations on the Volcanic Islands*. London, Appleton
- Dean D R. 1992. *James Hutton and the History of Geology*. Ithaca: Cornell University Press
- Debon F, Le Fort P. 1983. A chemical–mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 73(3): 135–149
- Didier J, Duthou J L, Lameyre J. 1982. Mantle and crustal granites: Genetic classification of orogenic granites and the nature of their enclaves. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 14(1–2): 125–132
- Dixon J M, Summers J M. 1985. Recent developments in centrifuge modelling of tectonic processes: Equipment, model construction techniques and rheology of model materials. *Journal of Structural Geology*, 7(1): 83–102
- 董申保. 1984. 花岗岩成因类型划分的探讨. 徐克勤、涂光炽主编, 花岗岩地质和成矿关系. 南京: 江苏科学技术出版社 [Dong S B. 1984. Discussion on the classification of genetic types of granite. In: Xu K Q, Tu G C (eds.), *Geology of Granite and Its Metallogenic Relationship*. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press (in Chinese)]
- Druitt T H, Costa F, Deloule E, Dungan M, Scaillet B. 2012. Decadal to monthly timescales of magma transfer and reservoir growth at a caldera volcano. *Nature*, 482(7383): 77–80
- Dufek J, Bachmann O. 2010. Quantum magmatism: Magmatic compositional gaps generated by melt-crystal dynamics. *Geology*, 38(8): 687–690
- Eby G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*, 26(1–2): 115–134
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology*, 20(7): 641
- Eskola P. 1950. *The nature of metasomatism in the processes of granitization*.

- International Geological Congress Report of the 18th Session, Great Britain 1948, Part III: 5–13
- Fernihough A, O'Rourke K H. 2021. Coal and the European industrial revolution. *The Economic Journal*, 131(635): 1135–1149
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, Arculus R J, Ellis D J, Frost C D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048
- 付建明, 徐德明, 杨晓君, 马丽艳, 蔡明海, 刘云华. 2011. 南岭锡矿. 武汉: 中国地质大学出版社, 241 [Fu J M, Xu D M, Yang X J, Ma L Y, Cai M H, Liu Y H. 2011. Tin Deposits in Nanling Range. Wuhan: China University of Geosciences Press, 241 (in Chinese)]
- Fyfe W S. 1970. Some thoughts on granitic magmas. In: Newall G, Rast N (eds.), *Mechanics of Igneous Intrusion*. Geological Journal Special Issue. Liverpool: Gallery Press, (2): 201–216
- Garibaldi N, Tikoff B, Schaen A J, Singer B S. 2018. Interpreting granitic fabrics in terms of rhyolitic melt segregation, accumulation, and escape via tectonic filter pressing in the huemul pluton, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(10): 8548–8567
- Gelman S E, Deering C D, Bachmann O, Huber C, Gutiérrez F J. 2014. Identifying the crystal graveyards remaining after large silicic eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 403: 299–306
- Gibb F G F, Henderson C M B. 1992. Convection and crystal settling in sills. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109(4): 538–545
- Gibb F G F, Attrill P G. 2003. Granite recrystallization: The key to the nuclear waste problem? *Geology*, 31(8): 657
- Gilluly J (ed.). 1948. Origin of granite. *The Geological Society of America Memoir*, 28: 9, 80, 139
- Glazner A F. 2021. Thermal constraints on the longevity, depth, and vertical extent of magmatic systems. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22(4): e2020GC009459
- Glazner A F, Bartley J M, Coleman D S, Gray W, Taylor R Z. 2004. Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers? *GSA Today*, 14(4): 4
- Glazner A F, Bartley J M, Hamilton W B, Carl B S. 2003. Making space for batholiths by extrusion of sub-batholithic crust. *International Geology Review*, 45(11): 959–967
- Glazner A F, Bartley J M. 2006. Is stopping a volumetrically significant pluton emplacement process? *Geological Society of America Bulletin*, 118(9–10): 1185–1195
- Goodchild J G. 1892. IV. Note on a granite junction in the ross of mull. *Geological Magazine*, 9(10): 447–463
- González-Esvertit E, Prieto-Torrell C, Bons P D, Canals À, Casas J M, Elburg M A, Gomez-Rivas E. 2025. A review of the granite concept through time. *Earth-Science Reviews*, 261: 105008
- Grout F F. 1926. The use of calculations in petrology: A study for students. *Journal of Geology*, 34(6): 512–558
- Grout F F. 1941. Formation of igneous-looking rocks by metasomatism: A critical review and suggested research. *Geological Society of America Bulletin*, 52(10): 1525–1576
- Grove T L, Brown S M. 2018. Magmatic processes leading to compositional diversity in igneous rocks: Bowen (1928) revisited. *American Journal of Science*, 318(1): 1–28
- Guernina S, Sawyer E W. 2003. Large-scale melt-depletion in granulite terranes: An example from the Archean Ashuanipi Subprovince of Quebec. *Journal of Metamorphic Geology*, 21(2): 181–201
- 国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 2023. 中国学科发展战略: 花岗岩成因与成矿机制. 科学出版社, 333 [National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. 2023. Strategic Development of Chinese Disciplines: Granite Genesis and Metallogenic Mechanism. Science Press, 333 (in Chinese with English abstract)]
- Hargraves R B. 1980. *Physics of Magmatic Processes*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 563
- Harker A. 1909. *The Natural History of Igneous Rocks*. Methuen & Co., London, 384
- Harris N B W, Pearce J A, Tindle A G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. *Geological Society, London, Special Publications*, 19(1): 67–81
- Harry W T, Richey J E. 1963. Magmatic pulses in the emplacement of plutons. *Geological Journal*, 3(2): 254–268
- Hartung E, Caricchi L, Floess D, Wallis S, Harayama S, Kouzmanov K, Chiaradia M. 2017. Evidence for residual melt extraction in the takidani pluton, central Japan. *Journal of Petrology*, 58(4): 763–788
- Hartung E, Weber G, Caricchi L. 2019. The role of H<sub>2</sub>O on the extraction of melt from crystallising magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 508: 85–96
- Hayne P O, Aharonson O, Schörghofer N. 2021. Micro cold traps on the Moon. *Nature Astronomy*, 5(2): 169–175
- Haughton S. 1862. Experimental researches on the granites of Ireland. part III. on the granites of Donegal. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 18(1–2): 403–420
- Hildebrand R S, Whalen J B. 2021. The mid-cretaceous peninsular ranges orogeny: A new slant on cordilleran tectonics? I: Mexico to Nevada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 58(8): 670–696
- Hildreth W. 1981. Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11): 10153–10192
- Holmes A. 1945. Natural history of granite. *Nature*, 155(3936): 412–415
- Holness M B. 2018. Melt segregation from silicic crystal mushes: A critical appraisal of possible mechanisms and their microstructural record. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 173(6): 48
- 洪大卫. 1994. 花岗岩研究的最新进展及发展趋势. *地学前缘*, 1(S1): 79–86 [Hong D W. 1994. Recent developments in granite research. *Earth Science Frontiers*, 1(S1): 79–86 (in Chinese with English abstract)]
- Horsman E, Morgan S, de Saint-Blanquat M, Habert G, Nugent A, Hunter R A, Tikoff B. 2009. Emplacement and assembly of shallow intrusions from multiple magma pulses, Henry Mountains, Utah. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 100(1–2): 117–132
- Huang H H, Lin F C, Schmandt B, Farrell J, Smith R B, Tsai V C. 2015. The Yellowstone magmatic system from the mantle plume to the upper crust. *Science*, 348(6236): 773–776
- Hutton D H W. 1982. A tectonic model for the emplacement of the main Donegal granite, NW Ireland. *Journal of the Geological Society*, 139(5): 615–631
- Hutton D H W. 1988. Granite emplacement mechanisms and tectonic controls: Inferences from deformation studies. *Earth and Environmental Science*

- Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 79(2-3): 245-255
- Hutton D H W, Dempster T J, Brown P E, Becker S D. 1990. A new mechanism of granite emplacement: Intrusion in active extensional shear zones. *Nature*, 343(6257): 452-455
- Hutton J. 1788. Theory of the Earth; or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of the land upon the globe. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 1: 209-304
- Iddings J P. 1889. On the crystallization of igneous rocks. *Bulletin of the Philosophical Society of Washington*, 11: 65-113
- Ishihara S. 1977. The magnetite series and ilmenite series granitic rocks. *Mining Geology*, 27: 293-305
- Jagoutz O, Klein B. 2018. On the importance of crystallization-differentiation for the generation of SiO<sub>2</sub>-rich melts and the compositional build-up of arc (and continental) crust. *American Journal of Science*, 318(1): 29-63
- Johannes W, Holtz F. 1996. *Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks*. Berlin: Springer-Verlag. 249
- Jones J, Torrens H S, Robinson E. 1994. The correspondence between James Hutton (1726-1797) and James Watt (1736-1819) with two letters from Hutton to George Clerk-Maxwell (1715-1784): Part I. *Annals of Science*, 51(6): 637-653
- Kalsbeek F, Jepsen H F, Jones K A. 2001. Geochemistry and petrogenesis of S-type granites in the east Greenland caledonides. *Lithos*, 57(2-3): 91-109
- Kennedy W Q, Anderson E M. 1938. Crustal layers and the origin of magmas. *Bulletin Volcanologique*, 3(1): 24-82
- King P L, White A J R, Chappell B W, Allen C M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan fold belt, southeastern Australia. *Journal of Petrology*, 38(3): 371-391
- 库恩·托马斯. 2012. 科学革命的结构(第四版).金吾伦, 胡新和译.北京: 北京大学出版社 [Kuhn T S. 2012. *The Structure of Scientific Revolutions*. Beijing: University of Chicago Press]
- Latypov R, Chistyakova S, Hornsey R A, Costin G, van der Merwe M. 2022. A 5-km-thick reservoir with >380, 000 km<sup>3</sup> of magma within the ancient Earth's crust. *Scientific Reports*, 12: 15651
- Lee C A, Morton D M. 2015. High silica granites: Terminal porosity and crystal settling in shallow magma chambers. *Earth and Planetary Science Letters*, 409: 23-31
- Leeder M. 2020. *Measures for Measure: Geology and the Industrial Revolution*. London: Dunedin, 35
- Lipman P W. 2007. Incremental assembly and prolonged consolidation of Cordilleran magma chambers: Evidence from the Southern Rocky Mountain volcanic field. *Geosphere*, 3(1): 42
- Liu B, Wu L, Ma C Q, Zhang M Y, Xue Z H, Sun Y, Li S Z. 2025. Volcanic-intrusive connections and crystal-melt segregation in the Dulan tilted crustal section: Insights from accessory mineral evolution. *Chemical Geology*, 672: 122517
- 刘家远, 沈纪利. 1982. 江西钨的成矿岩浆体系. 长春地质学院学报, 12(1): 81-90 [Liu J Y, Shen J L. 1982. Metallogenic magma systems of tungsten in Jiangxi Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 12(1): 81-90 (in Chinese with English abstract)]
- Loiselle M C, Wones D R. 1979. Characteristics of anorogenic granites. *Geological Society of America, Abstracts with Programmes*, 11: 468
- Lundstrom C C, Glazner A F. 2016. Silicic magmatism and the volcanic-plutonic connection. *Elements*, 12(2): 91-96
- Luth W C, Tuttle O F. 1969. The hydrous vapor phase in equilibrium with granite and granite magmas. *Memoir of the Geological Society of America*, 115: 513-548
- 马昌前. 1987. 一门新兴的边缘学科: 岩浆动力学. 世界科学 (6): 45-47 [Ma C Q. 1987. Magmatic dynamics: A new frontier discipline. *World Science*, (6): 45-47 (in Chinese)]
- 马昌前. 1988a. 北京周口店岩株侵位和成分分带的岩浆动力学机理. 地质科学, 23(4): 329-341, 373-374 [Ma C Q. 1988. The magma-dynamic mechanism of emplacement and compositional zonation of the Zhoukoudian stock, Beijing. *Chinese Journal of Geology*, 23(4): 329-341, 373-374 (in Chinese with English abstract)]
- 马昌前. 1988b. 扩散方程的岩浆动力学意义. 地质科技情报, 7(2): 93-100 [Ma C Q. 1988. Significance of magmatic dynamics of diffusion equation. *Geological Science and Technology Information*, 7(2): 93-100 (in Chinese)]
- 马昌前. 1989. 结晶分异作用的岩浆动力学条件. 地球科学, 14(3): 245-252 [Ma C Q. 1989. Magma-dynamical conditions on crystallization-differentiation. *Earth Science*, 14(3): 245-252 (in Chinese with English abstract)]
- 马昌前. 2004. 月球花岗岩: 比较行星学意义. 地质科技情报, 23(4): 19-24 [Ma C Q. 2004. Lunar granites: implications for comparative planetology. *Geological Science and Technology Information*, 23(4): 19-24 (in Chinese with English abstract)]
- Ma C Q, Li Z C, Ehlers C, Yang K G, Wang R J. 1998. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-Central China. *Lithos*, 45(1-4): 431-456
- 马昌前, 刘彬, 薛振华, 邹博文, 黄贵治, 连泉程, 高珂, 孙洋, 王连训. 2024. 从长英质侵入体揭示火山喷发过程与岩浆通道系统. 岩石学报, 40(7): 1997-2018 [Ma C Q, Liu B, Xue Z H, Zou B W, Huang G Z, Lian Q C, Gao K, Sun Y, Wang L X. 2024. Insights into the volcanic eruption process and magmatic plumbing systems from felsic intrusions. *Acta Petrologica Sinica*, 40 (7): 1997-2018 (in Chinese with English abstract)]
- 马昌前, 王国庆, 陈能松, 余振兵等. 2023. 岩石学 (第三版). 北京: 地质出版社 [Ma C Q, Wang G Q, Chen N S, She Z B, et al. 2023. *Petrology (3rd Edition)*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)]
- 马昌前, 王人镜. 1990. 北京周口店岩体中钾长石巨晶的特征及成因. 矿物学报, 10(4): 323-331, 389 [Ma C Q, Wang R J. 1990. The characteristic features and origin of k-feldspar megacrysts in the Zhoukoudian pluton, Beijing. *Acta Mineralogica Sinica*, 10(4): 323-331, 389 (in Chinese with English abstract)]
- 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 李增田. 1994. 花岗岩类岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析. 武汉: 中国地质大学出版社 [Ma C Q, Yang K G, Tang Z H, Li Z T. 1994. Magma-dynamics of granitoids: Theoretical methods and a case study of the Eastern Hubei granitoids. Wuhan: Press of China University of Geosciences (in Chinese with English abstract)]
- 马昌前, 邹博文, 高珂, 文霞. 2020. 晶粥储存、侵入体累积组装与花岗岩成因. 地球科学, 45(12): 4332-4351 [Ma C Q, Zou B W, Gao K, Wen X. 2020. Crystal mush storage, incremental pluton assembly and granitic petrogenesis. *Earth Science*, 45(12): 4332-4351 (in Chinese with English abstract)]
- Magee C, Stevenson C T E, Ebmeier S K, Keir D, Hammond J O S, Gottsmann J H, Whaler K A, Schofield N, Jackson C A, Petronis M S,

- O'Driscoll B, Morgan J, Cruden A, Vollgger S A, Dering G, Micklethwaite S, Jackson M D. 2018. Magma plumbing systems: A geophysical perspective. *Journal of Petrology*, 59(6): 1217–1251
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643
- 毛景文, 袁顺达, 谢桂青, 宋世伟, 周琦, 高永宝, 刘翔, 付小方, 曹晶, 曾载淋, 李通国, 樊锡银. 2019. 21世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展. *矿床地质*, 38(5): 935–969 [Mao J W, Yuan S D, Xie G Q, Song S W, Zhou Q, Gao Y B, Liu X, Fu X F, Cao J, Zeng Z L, Li T G, Fan X Y. 2019. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century. *Mineral Deposits*, 38(5): 935–969 (in Chinese with English abstract)]
- Marmo V. 1967. On the granite problem. *Earth-Science Reviews*, 3: 7–29
- Marsh B D. 1982. On the mechanics of igneous diapirism, stoping, and zone melting. *American Journal of Science*, 282(6): 808–855
- Marxer F, Ulmer P, Müntener O. 2021. Polybaric fractional crystallisation of arc magmas: An experimental study simulating trans-crustal magmatic systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 177(1): 3
- Mattsson T, McCarthy W, Schmiedel T. 2024. Transport of magma in granitic mush systems; an example from the götemar pluton, Sweden. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 25(1): e2023GC011061
- McNulty B A, Tong W X, Tobisch O T. 1996. Assembly of a dike-fed magma chamber: The Jackass Lakes pluton, central Sierra Nevada, California. *Geological Society of America Bulletin*, 108(8): 926–940
- Memeti V, Paterson S R, Mundil R. 2022. Coupled magmatic and host rock processes during the initiation of the Tuolumne Intrusive Complex, Sierra Nevada, California, USA: A transition from ephemeral sheets to long-lived, active magma mushes. *Geological Society of America Bulletin*, 134(5–6): 1347–1374
- Miller C F, Mittlefehldt D W. 1982. Depletion of light rare-earth elements in felsic magmas. *Geology*, 10(3): 129
- Miller R B, DeBari S M, Paterson S R. 2018. Construction, emplacement, and geochemical evolution of deep-crustal intrusions: Tenpeak and Dirtyface plutons, North Cascades, western North America. *Geosphere*, 14(3): 1298–1323
- Miller C F, Watson E B, Harrison T M. 1988. Perspectives on the source, segregation and transport of granitoid magmas. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 79(2–3): 135–156
- 莫宣学, 赵志丹, 喻学惠, 董国臣等. 2009. 青藏高原新生代碰撞-后碰撞火成岩. 北京: 地质出版社, 396 [Mo X X, Zhao Z D, Yu X H, Dong G C, et al. 2009. Cenozoic collisional-postcollisional igneous rocks in the Tibetan Plateau. Beijing: Geological Publishing House, 396 (in Chinese)]
- 莫柱孙. 1985. 试论南岭花岗岩的地质环境分类. *大地构造与成矿学*, 9(1): 17–27 [Mo Z S. 1985. A discussion on the classification of Nanling granites according to geological environment. *Geotectonica et Metallogenia*, 9(1): 17–27 (in Chinese with English abstract)]
- 莫柱孙, 叶伯丹. 1980. 南岭花岗岩地质学. 北京: 地质出版社, 363 [Mo Z S, Ye B D. 1980. Nanling Granite Geology. Beijing: Geological Publishing House, 363 (in Chinese)]
- Moyen J F. 2020. Archean granitoids: Classification, petrology, geochemistry and origin. *Geological Society, London, Special Publications*, 489(1): 15–49
- Moyen J F, Janoušek V, Laurent O, Bachmann O, Jacob J B, Farina F, Fiannacca P, Villaros A. 2021. Crustal melting vs. fractionation of basaltic magmas: Part 1, granites and paradigms. *Lithos*, 402: 106291
- Nacht H, Razafimahefa N, Stussi J M, Caron J P. 1985. Composition chimique des Biotites et typologie magmatique des granitoïdes. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série 2*, 301: 813–818
- Nandedkar R H, Ulmer P, Müntener O. 2014. Fractional crystallization of primitive, hydrous arc magmas: An experimental study at 0.7GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 167(6): 1015
- Neuendorf K K E, Mehl Jr J P, Jackson J A. 2005. *Glossary of Geology* (5th edition). Virginia: American Geological Institute, 779
- Ouadfeul S A, Jawak S D, Shirzadi A, Idrees M O. 2023. Editorial: Artificial intelligence and machine learning in Earth science. *Frontiers in Earth Science*, 10: 1090016
- Palin R M, White R W, Green E C R, Diener J F A, Powell R, Holland T J B. 2016. High-grade metamorphism and partial melting of basic and intermediate rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 34(9): 871–892
- Pang G N, Abers G A, Moran S C, Thelen W A. 2025. Long-lived partial melt beneath Cascade Range volcanoes. *Nature Geoscience*, 18(2): 184–190
- Parada M A, Lahsen A, Palacios C. 2000. The Miocene plutonic event of the Patagonian Batholith at 44° 30' S: thermochronological and geobarometric evidence for melting of a rapidly exhumed lower crust. *Special Paper 350: The Fourth Hutton Symposium on the Origin of Granites and Related Rocks*, 169–179
- Patiño Douce A E, Beard J S. 1995. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar. *Journal of Petrology*, 36(3): 707–738
- Pearce J A, Cann J R. 1971. Ophiolite origin investigated by discriminant analysis using Ti, Zr and Y. *Earth and Planetary Science Letters*, 12(3): 339–349
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983
- Pearl J, Mackenzie D. 2018. *The Book of Why: the New Science of Cause and Effect*. New York: Basic Books
- Petford N, Cruden A R, McCaffrey K J, Vignerresse J L. 2000. Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust. *Nature*, 408(6813): 669–673
- Perrin R. 1956. Granite again. *American Journal of Science*, 254(1): 1–18
- Pichavant M, Villaros A, Michaud J A S, Scaillet B. 2024. Granite magmatism and mantle filiation. *European Journal of Mineralogy*, 36: 225–246
- Pistone M, Arzilli F, Dobson K J, Cordonnier B, Reusser E, Ulmer P, Marone F, Whittington A G, Mancini L, Fife J L, Blundy J D. 2015. Gas-driven filter pressing in magmas: Insights into in-situ melt segregation from crystal mushes. *Geology*, 43(8): 699–702
- Pitcher W S. 1983. Granite type and tectonic environment. In: Hsü K, ed. *Mountain Building Processes*. London: Academic Press, 19–40
- Pitcher W S. 1987. Granites and yet more granites forty years on. *Geologische Rundschau*, 76(1): 51–79
- Pitcher W S. 1997. *The Nature and Origin of Granite*. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 387
- Pupin J P. 1980. Zircon and granite petrology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73(3): 207–220
- Ramberg H. 1981. *Gravity, Deformation and the Earth's Crust*, 2nd edn.

- London: Academic Press
- Ramsay J G. 1981. Emplacement mechanics of the Chindamora batholith, Zimbabwe. *Journal of Structural Geology*, 3: 93–105
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931
- Rastall R. H. 1945. The granite problem. *Geological Magazine*, 82: 19–30
- Read H H. 1939. Metamorphism and igneous action. British Association, Dundee, Sect. C, Presidential Address, 2
- Read H H. 1943. Meditations on granite: Part one. *Proceedings of the Geologists' Association*, 54(2): 64–85
- Read H H. 1948. Granites and granites. In: Gilluly J (ed.). *Origin of Granite*. Geological Society of America Memoir, 28: 1–9
- Read H H. 1957. *The Granite Controversy*. London: Thomas Murby & Co., xix
- Reid J, Murray D P, Hermes O D, Steig E J. 1993. Fractional crystallization in granites of the Sierra Nevada: How important is it? *Geology*, 21(7): 587–590
- Reynolds D L. 1943. Granitization of hornfelsed sediments in the Newry granodiorite of Goragwood Quarry, Co. Armagh. *Proceedings of the Royal Irish Academy*, 48B (11): 230–267
- Reynolds D L. 1944. The south-western end of the Newry Igneous Complex. a contribution towards the petrogenesis of the granodiorites. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 99(1–4): 205–246
- Reynolds D L. 1947. The granite controversy. *Geological Magazine*, 84(4): 209–223
- Reynolds D L. 1958. Granite: Some tectonic, petrological, and physico-chemical aspects. *Geological Magazine*, 95(5): 378–396
- Riel N, Mercier J, Weinberg R. 2016. Convection in a partially molten metasedimentary crust? Insights from the El Oro complex (Ecuador). *Geology*, 44(1): 31–34
- Rocher S, Alasino P H, Larrovere M A, Macchioli Grande M, Moreno J A, Dahlquist J A, Morales Cámara M M. 2021. Sheeted intrusion of granitic magmas in the upper crust—Emplacement and thermal evolution of the Guadacolinos pluton, NW Argentina. *Tectonophysics*, 816: 229034
- Rollinson W B, Pease V L. 2021. *Using Geochemical Data: To Understand Geological Processes* (2nd Ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 157–177
- Sakuyama M. 1984. Magma mixing and magma plumbing systems in island arcs. *Bulletin Volcanologique*, 47(4): 685–703
- Sawyer E W, Cesare B, Brown M. 2011. When the continental crust melts. *Elements*, 7(4): 229–234
- Sederholm J J. 1907. Om granit och gneiss. *Bulletin de la Commission Geologique de Finlande* 4(23): 110
- Sederholm J J. 1923. On migmatites and associated Pre-Cambrian rocks of southwestern Finland, part I: the Pelling region. *Bulletin de la Commission Geologique de Finlande*, 58
- Shand S J. 1927. On the relations between silica, alumina, and the bases in eruptive rocks, considered as a means of classification. *Geological Magazine*, 64(10): 446
- Shaw H R. 1980. The fracture mechanisms of magma transport from the mantle to the surface. In: Hargraves RB (ed.), *Physics of Magmatic Processes*. Princeton: Princeton University Press, 201–264
- Skjerlie K P, Johnston A D. 1992. Vapor-absent melting at 10 kbar of a biotite- and amphibole-bearing tonalitic gneiss: Implications for the generation of A-type granites. *Geology*, 20(3): 263
- Spera F J. 1980. Aspects of magma transport. In: Hargraves RB (ed.), *Physics of Magmatic Processes*. Princeton: Princeton University Press, 265–323
- Squyres S W, Arvidson R E, Ruff S, Gellert R, Morris R V, Ming D W, Crumpler L, Farmer J D, Des Marais D J, Yen A, McLennan S M, Calvin W, Bell J F III, Clark B C, Wang A, McCoy T J, Schmidt M E, de Souza P A Jr. 2008. Detection of silica-rich deposits on Mars. *Science*, 320(5879): 1063–1067
- Takaew P, Cecilia Xia J, Doucet L S. 2024. Machine learning and tectonic setting determination: Bridging the gap between Earth scientists and data scientists. *Geoscience Frontiers*, 15(1): 101726
- Taniuchi H, Kuritani T, Yokoyama T, Nakamura E, Nakagawa M. 2020. A new concept for the genesis of felsic magma: The separation of slab-derived supercritical liquid. *Scientific Reports*, 10(1): 8698
- Thompson A B. 1999. Some time-space relationships for crustal melting and granitic intrusion at various depths. *Geological Society, London, Special Publications*, 168(1): 7–25
- Thybo H, Artemieva I M. 2013. Moho and magmatic underplating in continental lithosphere. *Tectonophysics*, 609: 605–619
- Tomkeieff S I. 1983. *Dictionary of Petrology*. John Wiley & Sons Ltd.
- Touret J L R, Nijland T G. 2002. *Metamorphism today: New science, old problems*. Geological Society of London Special Publications, 192(1): 113–141
- 涂光炽等. 1979. 华南花岗岩类地球化学. 北京: 科学出版社 [Tu G C, et al. 1979. *Geochemistry of Granitoids in South China*. Beijing: Science Press (in Chinese)]
- Tuttle O F, Bowen N L. 1958. Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>-KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *Geological Society of America Memoirs*, 74: 153
- van Zalinge M E, Mark D F, Sparks R J, Tremblay M M, Keller C B, Cooper F J, Rust A. 2022. Timescales for pluton growth, magma-chamber formation and super-eruptions. *Nature*, 608(7921): 87–92
- Verma S K, Pandarinath K, Verma S P. 2012. Statistical evaluation of tectonomagmatic discrimination diagrams for granitic rocks and proposal of new discriminant-function-based multi-dimensional diagrams for acid rocks. *International Geology Review*, 54(3): 325–347
- Vernon R H. 1986. K-feldspar megacrysts in granites: Phenocrysts, not porphyroblasts. *Earth-Science Reviews*, 23(1): 1–63
- Vernon R H, Collins W J. 2011. Structural criteria for identifying granitic cumulates. *Journal of Geology*, 119(2): 127–142
- Villiger S, Ulmer P, Müntener O. 2007. Equilibrium and fractional crystallization experiments at 0.7 GPa; the effect of pressure on phase relations and liquid compositions of tholeiitic magmas. *Journal of Petrology*, 48(1): 159–184
- Wager L R, Brown G M. 1968. *Layered Igneous Rocks*. Edinburgh and London: Oliver & Boyd
- 王德滋. 2004. 华南花岗岩研究的回顾与展望. *高校地质学报*, 10(3): 305–314 [Wang D Z. 2004. The study of granitic rocks in South China: Looking back and forward. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 305–314 (in Chinese with English abstract)]
- 王德滋, 刘昌实, 陈克荣, 沉渭洲. 1992. 相山-东乡上侏罗统S型火山岩的发现及其地质背景. 南京大学内生金属矿床成矿机制研究重点实验室研

- 究年报. 南京: 南京大学出版社, 1-4 [Wang D Z, Liu C S, Chen K R, Chen W Z. 1992. Discovery of S-type volcanic rocks from the Upper Jurassic of Xiangshan-Dongxiang and their geological background. Annual Report of the Key Laboratory for Metallogenic Mechanism of Endogenous Metallic Ore Deposits, Nanjing University. Nanjing: Nanjing University Press, 1-4 (in Chinese)]
- 王德滋, 周新民, 孙幼祥. 1984. 华南前寒武纪幔源花岗岩类的基本特征. 徐克勤、涂光炽主编, 花岗岩地质和成矿关系. 南京: 江苏科学技术出版社, 82-90 [Wang D Z, Zhou X M, Sun Y X. 1984. Fundamental characteristics of Precambrian mantle-derived granitoids in South China. In: Xu K Q, Tu G C (Eds.), Granite Geology and Metallogenic Relationships. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, pp. 82-90 (in Chinese)]
- 王德滋, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化. 北京: 科学出版社 [Wang D Z, Zhou X M. 2002. The Genesis and Crustal Evolution of Mesozoic Granitic Volcanic-Intrusive Complexes in Southeast China. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract)]
- 王联魁, 朱为方, 张绍立. 1982. 华南花岗岩两个成岩成矿系列的演化. 地球化学, 11(4): 329-339 [Wang L K, Zhu W F, Zhang S L. 1982. On the evolution of two petrogenetic and mineralized series of granites in South China. Geochimica, 11(4): 329-339 (in Chinese with English abstract)]
- Wang L X, Ma C Q, Zhang C, Zhang J Y, Marks M A W. 2014. Genesis of leucogranite by prolonged fractional crystallization: A case study of the Mufushan complex, South China. Lithos, 206: 147-163
- 王强, 赵振华, 简平, 熊小林, 包志伟, 戴樟漠, 许继峰, 马金龙. 2005. 华南腹地白垩纪A型花岗岩类或碱性侵入岩年代学及其对华南晚中生代构造演化的制约. 岩石学报, 21(3): 795-808 [Wang Q, Zhao Z H, Jian P, Xiong X L, Bao Z W, Dai T M, Xu J F, Ma J L. 2005. Geochronology of Cretaceous A-type granitoids or alkaline intrusive rocks in the hinterland, South China: Constraints for late-Mesozoic tectonic evolution. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 795-808 (in Chinese with English abstract)]
- Wang T, Wang X X, Li W P. 2000. Evaluation of multiple emplacement mechanisms: The huichizi granite pluton, Qinling Orogenic Belt, Central China. Journal of Structural Geology, 22(4): 505-518
- Wang X L, Liu J X, Lü Q T, Wang S, Wang D, Chen X. 2021. Evolution of deep crustal hot zones constrained by the diversity of Late Mesozoic magmatic rocks in SE China. Ore Geology Reviews, 134: 104143
- 王孝磊. 2017. 花岗岩研究的若干新进展与主要科学问题. 岩石学报, 33(5): 1445-1458 [Wang X L. 2017. Some new research progresses and main scientific problems of granitic rocks. Acta Petrologica Sinica, 33(5): 1445-1458 (in Chinese with English abstract)]
- Wang Y J, Xu G S, Zhou W, Liang J J, Xu F H, He S. 2022. Predicting granitic buried-hill reservoirs using seismic reflection data: A case study from the bongor basin, southwestern Chad. Frontiers in Earth Science, 10: 949660
- Weinberg R F, Searle M P. 1998. The pangong injection complex, Indian karakoram: A case of pervasive granite flowthrough hot viscous crust. Journal of the Geological Society, 155(5): 883-891
- 魏格纳. 2006. 海陆的起源 (李旭旦译). 北京: 北京大学出版社 [Wegener A L. 2006. The Origin of Continents and Oceans (translated by Li Xudan), Beijing: Peking University Press]
- Westerman D S, Dini A, Innocenti F, Rocchi S. 2004. Rise and fall of a nested Christmas-tree laccolith complex, Elba Island, Italy. Geological Society London, Special Publications, 234(1): 195-213
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407-419
- White A J R. 1979. Sources of granite magmas. Geological Society of America Abstracts with Programs, 11(7): 539
- Winkler H G F. 1965. Petrogenesis of Metamorphic Rocks (5th Ed., 1979). Berlin: Springer-Verlag, 348
- Wotzlaw J F, Bindeman I N, Watts K E, Schmitt A K, Caricchi L, Schaltegger U. 2014. Linking rapid magma reservoir assembly and eruption trigger mechanisms at evolved Yellowstone-type supervolcanoes. Geology, 42(9): 807-810
- Wray J J, Hansen S T, Dufek J, Swayze G A, Murchie S L, Seelos F P, Skok J R, Irwin R P, Giorso M S. 2013. Prolonged magmatic activity on Mars inferred from the detection of felsic rocks. Nature Geoscience, 6(12): 1013-1017
- Wrigley E A. 2010. Energy and the English Industrial Revolution. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 23, 272
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. 岩石学报, 23(6): 1217-1238 [Wu F Y, Li X H, Yang J H, Zheng Y F. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites. Acta Petrologica Sinica, 23(6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract)]
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 王佳敏, 杨雷. 2017. 高分异花岗岩的识别与研究, 中国科学: 地球科学, 47(7): 745-765 [Wu F Y, Liu X C, Ji W Q, Wang J M, Yang L. 2017. Highly fractionated granites: Recognition and research. Science China Earth Sciences, 47(7): 745-765 (in Chinese)]
- 吴福元, 王汝成, 刘小驰, 谢磊. 2021. 喜马拉雅稀有金属成矿作用研究的新突破. 岩石学报, 37(11): 3261-3276 [Wu F Y, Wang R C, Liu X C, Xie L. 2021. New breakthroughs in the studies of Himalayan rare-metal mineralization. Acta Petrologica Sinica, 37(11): 3261-3276 (in Chinese with English abstract)]
- 吴利仁. 1985. 中国东部中生代花岗岩类. 岩石学报, 1(1): 1-10 [Wu L R. 1985. Mesozoic granitoids in East China. Acta Petrologica Sinica, 1(1): 1-10 (in Chinese with English abstract)]
- Wyllie P J. 1984. Constraints imposed by experimental petrology on possible and impossible magma sources and products. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, 310(1514): 439-453
- Wyllie P J, Wolf M B. 1993. Amphibolite dehydration-melting: Sorting out the solidus. Geological Society of London Special Publications, 76(1): 405-416
- 肖龙. 2013. 行星地质学. 北京: 地质出版社, 495 [Xiao L. 2013. Planetary Geology. Beijing: Geological Publishing House, 495 (in Chinese with English abstract)]
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨等. 2002. 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社 [Xiao Q H, Deng J F, Ma D Q, et al. 2002. The Ways of Investigation on Granitoids. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)]
- 徐克勤, 胡受奚, 孙明志, 张景荣, 叶俊. 1983. 论花岗岩的成因系列: 以华南中生代花岗岩为例. 地质学报, 57(2): 107-118 [Xu K Q, Hu S X, Sun M Z, Zhang J R, Ye J. 1983. On the genetic series of granites, as exemplified by the Mesozoic granites of South China. Acta Geological Sinica, 57(2): 107-118 (in Chinese with English abstract)]
- Xu K Q, Sun N, Wang D Z, Hu S X, Liu Y C, Ji S Y. 1982. On the origin and metallogeny of the granites of South China. In: Xu K Q, Tu G C (eds)

- Geology of the granites and their metallogenic relations. Proceedings of the International Symposium, Nanjing University, Science Press Beijing: 1-3
- 徐夕生, 鲁为敏, 贺振宇. 2007. 佛冈花岗岩基及乌石闪长岩-角闪辉长岩体的形成年龄和起源. 中国科学(D辑: 地球科学), 37(1): 27-38 [Xu X S, Lu W M, He Z Y. 2007. Formation age and origin of Fogang granite base and Wushi diorite-hornblende gabbro body. Science in China (Series D (Earth Sciences)), 37(1): 27-38 (in Chinese)]
- Xu X S, Zhao K, He Z Y, Liu L, Hong W T. 2021. Cretaceous volcanic-plutonic magmatism in SE China and a genetic model. Lithos, 402: 105728
- 徐义刚. 2024. 地球科学对人类文明的贡献. 在中国科学院学部第九届学术年会上的报告, 科学与中国网[http://scicn.casad.cas.cn/wz/202408/t20240815\\_5028860.html](http://scicn.casad.cas.cn/wz/202408/t20240815_5028860.html)(2024-08-15)[2025-03-03] [Xu Y G. 2024. The Contribution of Earth Sciences to Human Civilization. Report at the 9th Academic Annual Conference of the Chinese Academy of Sciences, Science and China website: [http://scicn.casad.cas.cn/wz/202408/t20240815\\_5028860.html](http://scicn.casad.cas.cn/wz/202408/t20240815_5028860.html)(2024-08-15)[2025-03-03](in Chinese)]
- 许志琴, 付小方, 赵中宝, 李广伟, 郑艺龙, 马泽良. 2019. 片麻岩穹窿与伟晶岩型锂矿的成矿规律探讨. 地球科学, 44(5): 1452-1463 [Xu Z Q, Fu X F, Zhao Z B, Li G W, Zheng Y L, Ma Z L. 2019. Discussion on relationships of gneiss dome and metallogenic regularity of pegmatite-type lithium deposits. Earth Science, 44(5): 1452-1463 (in Chinese with English abstract)]
- Yang C Q. 1982. The genetic types of the granitoids in South China. In: Geology of Granites and Their Metallogenic Relations. Proceedings of the Nanjing Symposium, Science Press: 253-276
- 杨经绥, 吴才来, 夏林圻, 樊祺诚, 徐义刚, 徐夕生. 2009. 火成岩的10年研究进展和未来的挑战. 地质论评, 55(3): 406-419 [Yang J S, Wu C L, Xia L Q, Fan Q C, Xu Y G, Xu X S. 2009. A decade of progress and challenges for the future in igneous petrology. Geological Review, 55(3): 406-419 (in Chinese with English abstract)]
- Yoder Jr. H S. 1979. The Evolution of the Igneous Rocks: Fiftieth Anniversary Perspectives. Princeton, NJ: Princeton University Press, 62
- Young D A. 2003. Mind over Magma: The Story of Igneous Petrology. Princeton, NJ: Princeton University Press, 686
- Žák J, Paterson S R. 2010. Magmatic erosion of the solidification front during re-intrusion: the eastern margin of the Tuolumne batholith, Sierra Nevada, California. International Journal of Earth Sciences, 99(4): 801-812
- 翟明国. 2017. 花岗岩: 大陆地质研究的突破口以及若干关键科学问题: “岩石学报” 花岗岩专辑代序. 岩石学报, 33(5): 1369-1380 [Zhai M G. 2017. Granites: Leading study issue for continental evolution. Acta Petrologica Sinica, 33(5): 1369-1380 (in Chinese with English abstract)]
- 翟明国, 张旗, 陈国能, 王汝成. 2016. 大陆演化与花岗岩研究的变革. 科学通报, 61(13): 1414-1420 [Zhai M G, Zhang Q, Chen G N, Wang R C. 2016. Adventure on the research of continental evolution and related granite geochemistry. Chinese Science Bulletin, 61: 1414-1420. doi: 10.1360/N972015-01272 (in Chinese)]
- 张德全, 孙桂英. 1988. 中国东部花岗岩类. 武汉: 中国地质大学出版社, 311 [Zhang D Q, Sun G Y. 1988. Granites of Eastern China. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 311 (in Chinese with English abstract)]
- 张旗. 2012. 花岗质岩浆能够结晶分离和演化吗? 岩石矿物学杂志, 31(2): 252-260 [Zhang Q. 2012. Could granitic magmas experience fractionation and evolution? Acta Petrologica et Mineralogica, 31(2): 252-260 (in Chinese with English abstract)]
- 张旗. 2023. 花岗岩可否分离结晶, 有堆晶花岗岩吗? 评学术界最近的一些争论. 地质科学, 58(2): 319-346 [Zhang Q. 2023. Can granite be formed by fractional crystallization? Is there any cumulate granite? Comment on some recent debates in academic circles. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 58(2): 319-346 (in Chinese with English abstract)]
- 赵振华. 2016. 微量元素地球化学原理(第二版).北京: 科学出版社 [Zhao Z H. 2016. Principles of Trace Element Geochemistry (2nd Edition). Beijing: Science Press]
- 郑永飞, 陈仁旭, 高彭. 2024. 大陆碰撞带深熔变质与花岗岩成因. 地球科学, 49(1): 1-28 [Zheng Y F, Chen R X, Gao P. 2024. Anatectic metamorphism and granite petrogenesis in continental collision zones. Earth Science, 49(1): 1-28 (in Chinese with English abstract)]
- Zheng Y F, Miller C F, Xu X S, Moyen J F, Wang X L. 2021. Introduction to the origin of granites and related rocks. Lithos, 402: 106380
- Zheng Y F, Gao P. 2021. The production of granitic magmas through crustal anatexis at convergent plate boundaries. Lithos, 402: 106232
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. 高校地质学报, 9(4): 556-565 [Zhou X M. 2003. My thinking about granite geneses of South China. Geological Journal of China Universities, 9(4): 556-565 (in Chinese with English abstract)]
- 周新民. 2007. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社 [Zhou X M. 2007. Mesozoic Granite Genesis and Lithospheric Dynamics in the Nanling Region. Beijing: Science Press (in Chinese with English Abstract)]
- Zhou X M, Li W X. 2000. Origin of late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas. Tectonophysics, 326(3-4): 269-287
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S, Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. Episodes, 29(1): 26-33
- Zhou Z M, Ma C Q, Qi S H, Xi Y F, Liu W. 2020. Late Mesozoic high-heat-producing (HHP) and high-temperature geothermal reservoir granitoids: The most significant geothermal mechanism in South China. Lithos, 366: 105568
- 朱弟成, 王青, 赵志丹, 牛耀龄, 侯增谦, 潘桂荣, 莫宣学. 2018. 大陆边缘弧岩浆成因与大陆地壳形成. 地学前缘, 25(6): 67-77 [Zhu D C, Wang Q, Zhao Z D, Niu Y L, Hou Z Q, Pan G T, Mo X X. 2018. Magmatic origin of continental arcs and continental crust formation. Earth Science Frontiers, 25(6): 67-77 (in Chinese with English abstract)]
- Zou B W, Ma C Q. 2024. Constraints of reservoir pressure and H<sub>2</sub>O on pre-eruptive melt accumulation and migration under water-rich systems based on the volcanic-plutonic connection in the east Kunlun Orogen, northern Tibet Plateau. Journal of Petrology, 65(9): egae090
- Zubkov V. 1967. General Petrography. Moscow: Mir Publishers, 227