

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第98次

学部工作局学术与文化处
《中国科学》杂志社 编报

2020年3月16日

“花岗岩成因与成矿机制发展战略研究”论坛综述

一、国内外研究现状

花岗岩的研究已有100多年的研究历史，历经早期的“水成论”和“火成论”之争，到后来的部分熔融实验和花岗岩分类研究，以及最近20余年来地球化学在花岗岩中的广泛应用，奠定了花岗岩研究的基础，完善了花岗岩的成因理论。花岗岩既是陆壳演化的产物，也与大陆风化过程、板块构造启动等重大地学问题紧密相连。

许多重要矿床的形成与花岗岩密切相关，如与花岗岩有关的斑岩型矿床提供了世界上最重要的金属矿产（如铜、钼等）资源；同时，花岗岩也是目前国际上广为关注的关键金属（Critical Metals，稀有稀土金属、钨锡等）的成矿母岩，更是能源金属锂的成矿母岩。全球花岗岩分布区域广泛，有从太古代到新生代不同时代的花岗岩出露，不同时代的花岗岩均伴生有不同类型的金属矿床产出。

近年来，国际上有关花岗岩的研究也在不断深化，并寻求新的思路和角度来更好地理解花岗岩的形成以及相关的构造、环境变化过程；国内外花岗岩的研究取得了一些进展，但还面临着众多挑战。在准确

分析国内外有关花岗岩重要进展的同时，如何从更广的角度（与类地行星比较的角度、全球的角度和地球系统科学的角度）探索花岗岩形成与地球演化的内在联系，从而进一步凝练花岗岩研究中的本质性问题，探索多学科交叉的花岗岩研究理论和技术体系，并提出花岗岩研究的未来发展方向；同时，如何深入理解不同时代、不同构造背景花岗岩成矿机理，探讨花岗岩形成、演化与成矿物质“生-运-储”之间的内在关系。解决这些当前的科学问题迫在眉睫，从更广的角度（与类地行星比较的角度、全球的角度和地球系统科学的角度）探索花岗岩形成与地球演化的内在联系，将有助于提升我国花岗岩与成矿研究水平、推动花岗岩成因与成矿机制研究。

二、论坛概况

2019年10月16~17日，“花岗岩成因与成矿机制发展战略研究”科学与技术前沿论坛在南京大学仙林校区国际会议中心顺利召开。论坛由中国科学院学部主办，中国科学院地学部、学部学术与出版工作委员会承办，南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室和《中国科学》杂志社协办。论坛执行主席为陈骏院士。

国内外近50位专家学者参加了论坛，其中包括中国科学院院士翟明国、郑永飞、陈骏、杨树锋，中国工程院院士毛景文，以及海外专家 Bernd Lehmann 教授、Reimar Seltmann 教授、Calvin F. Miller 教授、Annen Catherine 助理教授等。中国科学院学部工作局龚剑明博士在会上介绍了论坛的目标和要求。

本次论坛重点关注的科学问题有：

- （1）花岗岩起源与早期地壳演变的动力学机制；
- （2）花岗岩与大陆演化的内在联系；
- （3）花岗岩的形成和演化过程；
- （4）花岗岩成矿作用。

三、报告内容

(一) 议题一：花岗岩起源与早期地壳演变的动力学机制

1. 惠鹤九教授：地外行星花岗岩与“深空”观测

南京大学惠鹤九教授通过行星遥感数据获得的月球表面的高硅成分和钽异常、火星的花岗岩侵入体、金星的薄饼火山、鳞石英的发现,地外花岗岩样品(包括阿波罗 12 号花岗岩岩屑、月球岩屑、Ureilite 外来物质、普通球粒陨石 Adzhi-Bogdo、小行星 GRA06128/9 等)等分析结果,对地外可能存在的花岗岩进行探讨,认为太阳系高分异岩浆的可能形成机制是极高程度的分离结晶作用,液态不混溶以及极地程度的部分熔融,这有助于理解冥古宙地壳以及太阳系早期的岩浆作用,并对未来的面对的挑战提供了初步的应对方向和策略。

2. 彭澎研究员：地球早期初始大陆的形成与花岗岩的产生

中国科学院地质与地球物理研究所彭澎研究员从 8 个现状态势出发,包括初始地壳的认识仍处于比较行星学阶段、早期陆壳地质记录与规模的研究取得的一些重要进展、中酸性大陆形成的研究不断获得新资料、灰色片麻岩(TTG)成因的认识达到前所未有的高度、深熔作用是克拉通重要地质过程的认识不断深化、表生过程对克拉通演化意义得到不同研究的证实、克拉通扩张及成矿作用研究进展缓慢、克拉通化的认识没有根本性突破等方面的探讨,提出了早期地球花岗岩领域的六大科学挑战,包括最古老岩石矿物、初始地壳与冥古/太古宙界限、花岗岩的出现与中酸性大陆地壳起始时代、特征等。

3. 唐铭博士：早期大陆的成分演变

美国 Rice University 的唐铭博士聚焦于早期大陆成分的演变,从花岗质大陆地壳何时出现、早期大陆地壳生长的控制机制等方面进行探讨,认为地球早期的大陆演化处于 pre-paradigm 阶段,没有被广泛认可的框架理论、基础模型,大部分一级科学问题缺乏统一认识,但存在重大发现、重要理论创新的可能。并提出从大面积地壳成分示踪、

地表物质循环的证据这两个方面作为切入点，这对于理解早期大陆成分演变具有重要意义。

(二) 议题二：花岗岩与大陆演化的内在联系

1. 舒良树教授：巨型花岗岩带和大陆聚合-离散作用

南京大学舒良树教授对我国在不同时代不同构造背景下出现的多条巨型花岗岩带进行总结，指出它们分别与晚太古代-古元古代、新元古代、早古生代晚期的大陆聚合事件，晚古生代-早中生代聚合事件，以及晚中生代陆内伸展事件相关，揭示了中国大陆构造的演化、花岗岩带的形成既与全球有相似性，也有独自的特征和规律，显示出鲜明的地域特色。当前在该领域也存在着一些重大科学问题，包括：大陆聚合-离散如何影响巨型花岗岩带的形成、大陆聚-散作用如何制约巨型花岗岩带时空展布与成分演化等。

2. 朱弟成教授：汇聚边缘花岗岩浆作用与大陆侧向增生

中国地质大学（北京）朱弟成教授从汇聚板块边缘花岗岩如何形成、如何通过花岗岩来揭示大陆地壳的侧向增生过程的两个问题出发，提出了五个关键科学问题：（1）板块汇聚带花岗岩基规模和厚度的限定；（2）汇聚带大型花岗岩基的成因；（3）弧的演化过程与大陆增生的关系；（4）俯冲带大陆地壳的形成机制；（5）碰撞带大陆地壳的形成过程。他建议主要研究对象集中在中亚、中央、华南、东北、青藏等大型造山带的大型花岗岩基。

3. 王强研究员：板内花岗岩浆作用与陆内构造过程

中国科学院广州地球化学研究所王强研究员从陆内构造过程（板块构造过程与陆内构造过程、陆内挤压或裂熔造山作用和陆内非造山或裂谷作用）和陆内花岗质浆作用及共生岩石组合（包括地壳变沉积岩熔融形成的花岗岩类、I型或壳幔混合型花岗岩类及共生的岩石组合、碱性岩或A型花岗岩类、其他类型岩浆岩及岩石组合）两大方

面进行总结，提出具体的挑战，如板内花岗岩成因、地壳演化与成矿、陆内地质过程及其动力学驱动机制等。

（三）议题三：花岗岩的形成和演化过程

1. 王孝磊教授：花岗岩成分多样性

南京大学王孝磊教授从花岗岩多样性以及产生的机制进行详细的探讨，并对当前的学科挑战，主要包括花岗岩成分多样性与构造环境演变、源区及熔融过程、复杂的岩浆演化过程、岩浆物理化学条件等方面的挑战，提出要加强国内花岗岩大区域的分析和花岗岩大数据库的建设、加快花岗岩成因的实验和模拟工作、加强精细化花岗岩成因研究、加强花岗岩岩体构造和岩体地质的工作等具体措施。

2. 李献华研究员：花岗岩与成矿机制研究的技术革新

中国科学院地质与地球物理研究所的李献华研究员着重探讨了花岗岩与成矿作用研究的同位素年代学新技术、微区原位元素-同位素快速分析与成像新技术以及非传统同位素示踪体系三个方面，认为上述方面的同位素定年、成像、示踪技术的进步，极大地促进了花岗岩与成矿机制的深入研究，尤其是在岩浆侵位-结晶过程、岩浆-热液成矿过程、花岗岩与成矿作用得到了较为明显的体现。

3. 马昌前教授：花岗质岩浆动力学过程的模拟和监测

中国地质大学（武汉）马昌前教授认为在花岗岩研究领域存在五大科学挑战：花岗岩与流纹岩是否存在联系、大型岩基如何获得占位的空间、如何刻画造山带岩浆活动的强度、如何评估岩浆的含水量和其他挥发份含量，以及如何定量评估岩浆过程的控制因素。主要聚焦于花岗岩岩浆动力学过程的模拟和监测，从火山岩与侵入岩的关系、花岗岩侵位机制、岩浆活动强度、岩浆水含量估算等方面进行深入探讨，认为需要将花岗岩与火山岩结合、壳源岩石与幔源岩石结合、岩浆与挥发份结合、定性与定量结合等方面，才能更好地了解这类关键科学问题。

4. Annen Catherine 助理教授：Construction and eruption of plutons: the heat problem

法国 Université Savoie Mont Blanc 的 Annen Catherine 助理教授主要通过热力学模拟的手段来限定花岗质岩浆系统的岩浆过程，强调热传导和热扩散起了重要的作用。她认为热量和温度是控制岩浆房寿命、物理条件和演化路径的第一要素。温度控制着岩浆中熔体、晶体和气体的含量，在高温下和低的晶体分数，岩浆是 mush 的状态，即晶体形成一个固体格架（network），而熔体和气体在这个格架中可以发生运移。

5. 徐夕生教授：Cretaceous volcanic-intrusive magmatism and geodynamic constraints, SE China

南京大学徐夕生教授对中国东南部广泛存在的白垩世的火山岩、侵入岩进行了系统的研究，并和北美 Cascades 和南美安第斯进行对比，发现中国东南部的白垩世的火山岩-侵入岩具有同时代、同成因、地化上互补的特征。基于国际上的“mush model”，结合岩石学、地球化学、地球物理学数据，从而提出了中国东南部穿地壳岩浆系统，大规模的岩浆作用与古太平洋板块俯冲相关，且复杂的岩浆过程记录了大陆边缘地壳成熟和演化的过程。

（四）议题四：花岗岩成矿作用

1. 胡瑞忠研究员：花岗岩成矿构造背景

中国科学院地球化学研究所的胡瑞忠研究员从花岗岩形成的构造背景以及不同构造背景下成矿特征进行总结归纳，详细探讨了洋中脊、地幔柱、裂谷花岗岩成矿作用、大洋俯冲花岗岩成矿作用、大陆碰撞花岗岩成矿作用、大陆伸展花岗岩成矿作用，在此基础上认为花岗岩构造背景分类方案需要细化，构造背景如何控制花岗岩成矿需要更多的研究。

2. 蒋少涌教授：花岗岩成矿专属性与成矿规律

中国地质大学（武汉）的蒋少涌教授阐述了花岗岩成矿专属性与成矿规律领域的发展历史与趋势，对两个科学问题（花岗岩成矿的区域差异性，以及花岗岩成矿专属性的控制因素）做了深入探讨，并以我国为例，举例说明地域性上成矿差异明显，成矿专属性的控制因素也不同。最后提出了未来本领域发展的重要研究方向：（1）重视花岗岩成矿的源、运、聚系统研究；（2）重视不同类型花岗岩与不同成矿金属组合的研究；（3）重视花岗岩成矿深度与定量化评价隆升剥露历史的研究；（4）重视岩相学与原位微区地球化学分析方法的有机结合，应用多手段综合方法研究成矿专属性与成矿规律。

3. 倪培教授：花岗质岩浆-热液中矿质的生、运、储过程与机制

南京大学倪培教授强调：（1）花岗质岩浆-热液中矿质的初始富集：包括岩浆过程对矿质富集的影响、岩浆到流体过渡过程对矿质富集的作用、矿质在成矿与贫矿体系中的初始差异；（2）花岗质岩浆-热液中矿质的运移过程：包括热液中矿质的运载能力、金属的气相迁移机制、 CO_2 对金属迁移的作用；（3）花岗质岩浆-热液中矿质的卸载机制：流体冷却、流体沸腾或不混溶、流体混合、水岩反应；并针对这三个方面提出了具体的科学问题和面临的挑战。

4. 王汝成教授：花岗岩与稀有金属成矿

南京大学王汝成教授主要围绕花岗岩与稀有金属成矿主题，指出花岗岩相关矿产资源是国防安全 and 国家战略防御的关键。从稀有金属花岗岩的分类、稀有金属花岗岩（伟晶岩）与大陆演化、成矿机制以及我国稀有金属矿床的新发现这四个方面探讨了稀有金属花岗岩研究现状，指出当前面临着诸多科学问题，例如，稀有金属的壳幔地球化学行为；花岗质熔体中稀有金属的络合、迁移与富集机制；岩浆—热液体系中稀有金属成矿机制；稀有金属赋存状态与矿床可利用性等。

5. 杨志明研究员：新世纪以来斑岩铜矿主要研究进展及科学前沿

中国地质科学院地质研究所的杨志明研究员认为斑岩铜矿是世界上最重要的一种矿床类型，具有埋藏浅、品位低、规模大的特点。近年来，在成矿构造背景、成矿岩浆及成矿物质起源、岩浆上侵及演化过程、岩浆-热液过渡过程、蚀变及矿化、勘探矿物化学这些方面取得了一些进展。但是在成矿金属起源、富集机制、金属沉淀阶段及机制、后碰撞环境斑岩铜矿的成因等方面还存在较大的争议。

6. Bernd Lehmann 教授：Formation of tin ore deposits: A reassessment

德国 Technical University of Clausthal 的 Bernd Lehmann 教授对全球锡矿的研究进行总结和评价，认为高演化的花岗岩、热液系统与锡矿具有密切的联系，并对三者的联系进行了具体的阐释。分离结晶作用是岩浆演化以及岩浆中锡富集的主要作用，而氧逸度条件控制着锡元素的分配系数。而热液系统是岩浆演化趋势的延续，对熔体的结晶具有一定的影响。热液活动中的锡元素主要是以 Sn^{2+} 氯化物的形式存在。若存在锡矿，通常在内部伴生着蚀变作用，包括云英岩化、矽卡岩化等。

7. Calvin Miller 教授：Volcano-pluton connection: Perspectives on material and process linkages from Searchlight pluton and the Highland Range volcanic sequence, Nevada, USA

美国 Vanderbilt University 的 Calvin Miller 教授具体阐述了侵入岩与火山岩之间的关系，主要以美国内华达州的 Searchlight 岩体和 Highland Range 的火山岩进行对比研究，这对理解岩浆体系以及成矿具有重要意义。他认为至少有些深成的岩浆一定能够喷发到地表，并且侵入岩与喷出岩存在必然联系。但是，这些联系却很难被确认。在一些例子中，可以确认某种联系，这很可能阐明了岩浆系统中关键的几个方面。

8. Reimar Seltmann 教授：Line rocks in rare metal granites as expression of fluid saturation and rhythmic crystallization

英国 Natural History Museum 的 Reimar Seltmann 教授围绕条带状的花岗质岩石与高演化的稀有金属成矿两方面，认为与流体的饱和以及韵律性的结晶作用有着密切的联系。通过对稀有金属花岗岩的详细研究，认为由于物理化学的快速转变，以及特定的构造控制导致的流体流动，都会导致浅部侵入体的成矿作用。因此，可以通过侵入体剖面的复杂结构和地化特征来判断是否含矿，这对于矿床的开采有着十分重要的意义。

四、论坛总结与初步共识和建议

此次科学与技术前沿论坛的主题为花岗岩成因与成矿机制发展战略研究，论坛进一步推动了花岗岩领域前沿科学理论研究，促进了地质学学科发展战略研究系统深入开展，促进了学科交叉融合及国际学术交流，提升了我国花岗岩与成矿研究水平，推动了花岗岩成因与成矿机制研究。围绕上述初步调研成果，翟明国院士、陈骏院士、杨树锋院士、毛景文院士、李献华研究员等与会项目专家及多位与会代表对此次论坛给予了充分的肯定和赞许，认为在该领域已经从“跟跑”到“并跑”，再到当前的部分方向的“领跑”，也期待产出更多原创性、创新性、高质量的成果。同时，与会专家代表也对相关的汇报提出了宝贵的建议和意见，包括要增加信息技术、物理模拟技术、数值模拟技术方面的研究；需要补充相关的成矿实验岩石学方面的内容，尤其是针对关键金属成矿；需要更好的顶层设计，避免各部分重复；花岗岩的研究要与板块构造、宜居地球相结合；强调地球科学是观测科学，需要理论创新，技术先行等。与会专家的热烈探讨，进一步凝练了花岗岩研究中的本质性问题，提出花岗岩研究的未来发展方向，为花岗岩领域的发展献计献策。论坛在与会代表们的大力支持和积极参与下，取得了圆满成功。

五、论坛的特色和创新之处

本次论坛的特色是多学科交叉深入研讨。论坛通过“花岗岩成因与成矿机制发展战略研究”这一科学技术前沿方向将花岗岩起源与早期地壳演变的动力学机制、花岗岩与大陆演化的内在联系、花岗岩的形成和演化过程、花岗岩成矿作用这四个方面有机地联系在一起，分别对其进行深入而又全面的研究。从岩石学、构造学、矿床学等多学科进行交叉，从研究现状到科学问题与挑战，从现象到本质进行深入剖析。

论坛安排每个报告人围绕前沿问题进行报告，共持续两天时间，最后进行了两个小时的深入讨论。参会国内外专家学者从不同方面、不同角度，紧密围绕花岗岩成因与成矿机制发展战略研究这一方向，对当前的研究现状综合研判，对不同方向上的科学问题发散探讨，更好地凝练了花岗岩成因与成矿机制的关键方向。通过专家学者的精彩报告以及之后的充分探讨，让与会者更加深入地理解了花岗岩成因与成矿机制发展战略中多个关键科学挑战，为我国的花岗岩理论研究以及相关矿产资源探索提供了理论支持，为国防安全和国家安全提供了理论保障。

（作者：王迪博士、王孝磊教授，南京大学地球科学与工程学院）