

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 118 次

学部工作局学术与文化处 编报
《中国科学》杂志社

2021 年 12 月 25 日

“早期大陆形成演化与环境资源效应”论坛综述

一、国内外研究现状

“前寒武纪地质学”研究的是寒武纪（5.42 亿年）之前地质时代的地质科学问题。前寒武纪时间跨度约 40 亿年，占地球形成以来的 90%，记录了一系列重大的地质事件，对于理解地球的历史、现在以及未来具有重要意义。与“前寒武纪地质学”相关的科学问题包括了地球圈层分异、大陆形成和演化，全球板块构造的建立，以及伴随的环境和生命演化及特殊矿产的形成等一系列重大科学问题。在世界各国地球科学研究白皮书中，早期大陆形成演化历来被列为第一项课题。同时，“前寒武纪地质学”也是和类地行星比较研究联系最密切的学科。

中国在前寒武纪地质研究中有特点有优势，尤其是华北克拉通大陆早期演化等方面的研究成果得到国际同行的高度关注和评价。中国的高校和科研院所有一批优秀的前寒武纪地质学的专业人才，形成了一支年龄结构合理的人才队伍，是进一步深化研究，推动学科跨越式发展的基础。在这样的有利条件下，进行学科发展战略研讨，并提出发展战略建议，是十分必要的。

二、论坛概况

2021年6月21日，“早期大陆形成演化与环境资源效应”科学与技术前沿论坛在中国科学院学术会堂召开。本次论坛旨在推动我国在早期大陆形成和演化以及构造体制转变、环境变迁、早期生命演化和矿产资源等关键研究领域的前沿科学理论研究和探索。

本次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、中国科学院地质与地球物理研究所、西北大学和北京大学共同承办，《中国科学》杂志社协办。来自中国科学院地质与地球物理研究所、西北大学、北京大学、南京大学等国内10余家科研院校的专家学者共计185人参加了论坛。

三、论坛重点关注的问题

前寒武纪地质学，主要研究地球早期的圈层分异、大陆的形成和演化，以及相关的构造机制的转变、环境变迁、早期生命的演化及相应的矿产资源，对于理解地球的历史、现在和未来，对于加强地球与行星的比较研究和学科交叉融合，都具有重要意义。中国前寒武纪地质记录丰富，基础资料积累丰厚，近20年来研究更为深入，在早期大陆演化方面，做出了一系列国际水准的研究成果，培育了一支年龄结构合理的人才队伍，形成了该学科领域进一步发展的良好势头。但是，我们也清醒地意识到，由于新思路、新技术、新方法的引入，学科交叉融合加速，国际学术界在这个领域的研究有加快发展的势头，我们的研究必须面对这一新的挑战 and 新的机遇。因此，迫切需要对本学科的发展情况进行研讨，并提出进一步发展的战略规划和建议。

本次论坛重点关注如下问题：（1）国际前寒武纪地质学的发展历程和现状，国际科学前沿和发展趋势、发展方向；（2）中国学术界在本学科领域的研究能力和创新能力；（3）中国在该学科领域应该着力发展的战略方向和重大科学主题。

四、报告内容

中国科学院地质与地球物理研究所翟明国院士围绕“前寒武纪地质研究需要关注的几个问题”作主旨报告。地球是太阳系中唯一的具有花岗岩质陆壳以及出现板块构造的星球，前寒武纪地质的研究，对于了解地球的形成演化、生命宜居环境，以至地球的未来命运都至关重要。地球早期历史中有三个重大的地质事件，即大陆地壳的巨量生长和稳定化、构造体制的演化与板块构造建立的过程、地球环境的剧变。它们涵盖了地球的物质（资源）、构造和环境（灾害）科学的所有内容。大陆起源和演化是前寒武纪地质中的核心科学问题，长英质地壳是地球圈层分异和相互作用的最终（至今）结果。其中陆核的成因、陆壳的生长和稳定化是重要主题，它是地球热演化、深部圈层以及气圈、水圈和生物圈层形成-耦合的最基本着眼点和切入点。可以说，大陆的形成和演化打破了全球被贫氧大洋壳覆盖的局面，改变了地球的氧化状态。由于只有大陆岩石记录了地球有地壳以来的演化历史，因此大陆演化与环境演化的关联性研究是可行的途径。其中早期环境演化与物质循环是两个亟待加强的学科前沿，系统的早期地球演化的研究是固体地球科学的基础，也是与行星科学最具可操作性的关联点。

香港大学、西北大学赵国春院士系统总结了前板块构造与大陆起源的研究历史，并介绍了未来需要重点关注的学科发展方向。建立于20世纪60年代并被誉地学史上一场革命的板块构造理论虽然能圆满地解释显生宙至元古宙几乎所有地质现象、过程和事件，但却无法解释太古宙克拉通的基本特征，包括绿岩带内高温（~1600°C）科马提岩的成因和缺乏弧安山岩的双峰式火山岩组合，占太古宙陆壳总面积70%以上、几乎同时侵位的TTG（英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩）岩石成因，反映垂向运动的片麻岩穹窿构造样式，缺失蛇绿岩、蓝片岩、榴辉岩和双变质带等板块构造特征标志。所有这些都说明太古宙大陆可能不是起源于板块构造体制，而是起源于某种前板块构造

体制。目前地质学家们已提出若干个前板块构造模式，包括地幔柱（mantle-plumes）、重力下沉（sagduction/drip）、热管（heat-pipes）、滞留盖（stagnant-lid）构造等，但这些前板块构造中没有一个模式能圆满解释大陆起源与演化。因此，建立一个能圆满地解释太古宙大陆起源与演化的前板块构造体系已成为当前地球科学领域研究的重中之重。目前国外已有若干科研团队正在主攻这一地球科学重大难题。预计在不久的将来，一个与板块构造理论地位同等重要的前板块构造理论体系即将诞生。在构建前板块构造理论体系过程中，我国地球科学研究者必须积极参与，为前板块构造理论体系的创立作出应有的贡献。

中国科学院地球化学研究所刘耘研究员重点关注“冥古宙地球状态及比较行星学研究”。地球是迄今唯一发现存在长英质陆壳的硅酸盐行星，陆壳的形成机制是地学界长期悬而未决的重大科学问题之一。地球最早的长英质岩石可能形成于约 40 亿年前，而以 TTG 为主的陆壳在世界范围内大量形成于约 27 亿年前。早期岩石及锆石的 Hf、Nd 同位素数据表明，地球在其形成的前 2 亿年内便经历了大规模的壳幔分异事件。此外，实验岩石学研究表明，地球上地幔的超镁铁质岩石（橄榄岩）很难直接通过部分熔融分异出长英质 TTG，且形成一份 TTG 需要分异约三份的含水基性岩。因此，长英质陆壳的形成始于冥古宙早期，但其大量形成于中、新太古代，经历了超镁铁质-镁铁质-长英质的漫长演化，TTG 形成之前的冥古宙必然大量存在镁铁质组成的原始地壳（proto-crust），其形成是陆壳形成和演化路径中的关键环节之一。由于缺乏来自冥古宙地球自身的岩石和其他地质记录，目前对早期地球的壳幔分异过程仍然知之甚少。现有 TTG 模型很大程度上依赖基性洋壳的俯冲作用，而太古宙板块构造是否存在仍然值得怀疑，因此，TTG 的形成构造背景仍需要更为合理的解释。观测结果表明，木卫一在较高的地幔温度条件下发育以大规模火山作用主导地幔物质-能量循环的热管构造，对早期地球的构造-分异提供了难得的参照。

冥古宙地球在内外地质作用下可能处于与木卫一类似的高能动力学条件下。基于上述相似性以及地球形成巨量太古宙长英质地壳对含水基性原岩大量存在的“苛刻”要求，刘耘等提出一个适用于早期地球的构造-壳幔分异模型：在岩浆洋固化后的冥古宙早期至 TTG 大量形成之前的始太古宙，地球因较高的内生热率和地幔温度形成以大规模火山作用主导、以原始地壳（岩石圈）发生大规模垂直循环为特征的热管构造体制。在该模型中，地幔可通过部分熔融大规模形成镁铁质原始地壳，且垂向主导的物质循环有利于将早期地表水带入地壳深部，使基性地壳具有富水特征，为 TTG 的形成提供必要的全球性的“原材料”。这一模型为早期地球的壳幔分异过程和全球构造模式提供了全新的思路，相应的细节和后果亟需学术界进一步开展多学科交叉的工作。

中国地质科学院万渝生研究员针对“太古宙大陆形成演化与克拉通化”等问题进行了梳理，提出未来需要着重研究的方向。了解最古老陆壳的形成及性质，是阐释地球壳幔物质分异和构造演化的逻辑起点；研究早期大陆地壳生长规律及与最古老地壳的继承关系，是古老大陆形成演化研究首要和长期的科学主题。已有研究表明，现今大陆的 70% 以上形成于 25 亿年以前，但陆壳巨量增生时代集中在中太古代-新太古代（30~25 亿年）。太古宙克拉通在各大陆都存在，构成大陆的核心，其中 TTG 岩石占了绝对的比例（70%~80%），其成因与早期陆壳的形成机制几乎成了同义语，与陆壳性质、成矿作用、板块构造启动等基础地质和理论问题密切联系。新太古代全球性的克拉通化是大陆地壳形成演化过程中的关键事件，奠定了现今太古宙克拉通的基本组成和结构。回顾 20 年来的研究进展，提出今后需注重如下方面的研究：（1）最古老陆壳物质的寻找和鉴别；（2）与冥古宙研究结合，开展比较行星学研究；（3）太古宙壳、幔岩浆物源区组成的时代演化规律及耦合过程；（4）岩浆形成（部分熔融和深熔作用）-定位的热动力学机制；（5）高精度微区原位分析和新的、多种同位素体系示踪应

用；(6) 高温高压实验岩石学研究；(7) 大数据应用；(8) 数值模拟。

南京大学王孝磊教授重点关注“早期花岗质岩石的形成与地壳性质”。花岗岩和大陆地壳是地球区别于其他固体星球的重要特征，寻找花岗质岩石是行星探测的重要内容。地球早期就开始出现了较多的花岗质岩浆活动，表现出独特的大陆演化特征。这些花岗质岩石的性质可以表现在澳大利亚 Jack Hills 冥古宙的碎屑锆石中，但是对于这些碎屑锆石的来源还存在较大的争议，至少它们的存在说明花岗质岩石可能在 4.2~4.0 Ga 之前就已存在。而在太古宙以来，花岗质岩石主要表现为 TTG，具有明显的钠质特征，高 Sr 和 La/Yb 比值，表现出较强的轻、重稀土的分馏。对于 TTG 岩石的成因，也存在很大的争议。从源区成分上来看，基本可以确定是水化的玄武岩。但是，这个镁铁质地壳的源区究竟是洋壳还是洋底高原的玄武质岩石？这些岩石如何水化？如何达到高压条件并发生熔融？这些问题还没有解决。主要的问题在于如何解释高压 TTG 的形成和源区的水化问题。对于早期花岗质岩石的成分多样性是未来一个有待解决的关键问题。一是 TTG 的成分有多样性，二是早期还存在非 TTG 的花岗质岩石。这种大量的非 TTG 岩石出现被认为是构造体制转换的结果。早期花岗质岩石的形成和大陆地壳演化是未来的重要研究方向。

中国地质科学院地质力学研究所张拴宏研究员系统梳理了“前寒武纪大火成岩省与超大陆重建及古环境”的研究历史。大火成岩省代表了地质历史上相对较短时期内形成的规模宏大的幔源岩浆活动。这种大规模岩浆活动通常与地球深部过程特别是地幔柱密切相关，对于研究全球性大气-海洋环境巨变及生物灭绝、大规模成矿都有重要意义。另外，大火成岩省也是超大陆重建与裂解（离）的关键性标志。前寒武纪大火成岩省常以大规模基性岩墙群、岩床群或者基性熔岩流等不同形式产出。通过不同大陆基性岩浆事件序列对比，结合岩墙群几何学产状、裂谷盆地内特殊沉积标志层（如大规模黑色页岩、火山

灰夹层等)及其他地质事件综合分析,可以开展两个或多个前寒武纪陆块在古大陆中相对位置的重建。另外,未经变质构造的基性岩墙群、岩床群或熔岩流也是开展古地磁研究的理想对象,其古地磁及岩石磁学结果可以为前寒武纪古大陆重建提供重要的古地磁约束。前寒武纪由于大气-海洋氧气含量相对偏低,生物门类简单,大火成岩省对表生环境及生物演化的影响不如显生宙显著,因此国内外关注的较少。近年来的研究表明,晚前寒武纪大火成岩省对大气-海洋环境可能有显著的影响,尤其是元古宙“地球中年期”(18~8 亿年)大气-海洋的波动演化可能与全球性大火成岩省有一定的成因联系。特别是这一时期在全球主要克拉通近于同期沉积的大规模黑色页岩,可能与同期发育的全球性的大火成岩省有密切的联系。初步的研究结果显示,全球 1650~1620 Ma、~1380 Ma 及~1100 Ma 大火成岩省与黑色页岩可能有明显的时空及成因联系。这些有时空联系的大火成岩省与黑色页岩沉积还可以为晚前寒武纪地质年代表划分提供重要的界线标志。未来值得开展深入研究主题有:大火成岩省导致黑色页岩沉积的机制、中元古代时期形成巨厚黑色页岩沉积及炭质超常富集的原因、中-新元古代黑色页岩沉积速率及其资源能源潜力等。

中国科学院地质与地球物理研究所 **Ross Mitchell** 研究员针对“超大陆旋回和地球动力学历史”开展了研究。超大陆是板块构造自我结构的表达。对过去的约 20 亿年,研究者主要识别出了三个超大陆,即潘吉亚、罗迪尼亚和哥伦比亚。太古宙超级克拉通(不同于超大陆,尺度相对较小)在构造上似乎是不同的,但大陆周期性的聚合和裂解型式可能延续到约 30 亿年前。**Ross Mitchell** 研究员讨论了超大陆的出现如何为现代全球板块构造的开启提供最小年龄约束。他认为,潘吉亚的聚合和裂解证明超大陆旋回与整个地幔对流密切相关。因此,超大陆旋回与地幔对流具有因果关系,且这些过程强调自上而下(俯冲板片诱导)和自下而上(地幔诱导)的地球动力学以及两者之间耦合

的重要性。但是，这种耦合的性质及其演化方式仍存在争议，导致对超大陆的形成方式存在不同的认识，而这可以通过定量地球动力学建模和地球化学指标进行验证。具体来说，哪些大洋关闭以形成超大陆，以及形成超大陆的方式如何与地幔对流相关联，是未来研究的方向。

中国科学院地质与地球物理研究所焦淑娟副研究员针对“超高温变质作用与地球早期构造过程”展开论述。热是地球演化及其构造体制转变根本性的制约因素。超高温(UHT)变质作用是温度大于 900°C (压力 7~13 kbar) 的麻粒岩相变质作用，代表各个地质时期固相条件下最热的地壳状态。重建各个地质时期(造山带)深部地壳的热状态及其随时间的演化，是详细解读大陆地壳生长分异、壳-幔相互作用和地球动力学过程的重要内涵。大规模的 UHT 麻粒岩地体常出现在前寒武纪时期，并与几个超大陆的形成有关。前寒武纪时期，地球具有比现代地球更高的地温梯度，岩石圈强度更弱。重建前寒武纪造山带下地壳热状态和时间演化直接关系到我们对早期地球动力学过程的认识。对前寒武纪时期 UHT 变质作用产出的规模、P-T 轨迹、时间尺度系统性的总结研究，发现 UHT 变质作用普遍发育峰期后近等压冷却的 P-T 轨迹，并记录了漫长的时间尺度。研究还发现 UHT 变质作用之前大都存在一期高压麻粒岩相变质作用。这些共同的特征指示 UHT 变质作用可能形成于相似的构造背景，是加厚地壳放射性元素的积累和随后岩石圈伸展-软流圈上涌共同作用的结果。重建前寒武纪造山带下地壳热状态和时间演化直接关系到我们对早期地球动力学过程的认识。

中国地质科学院地质研究所朱祥坤研究员针对“前寒武纪地球表生环境演化”相关的学科进展与前沿问题展开论述。地球宜居环境的形成和演化，不仅是 21 世纪地球科学的核心问题之一，也是人类社会共同关心的重大问题。初始地球大气以 CH₄ 和 N₂ 为主，无自由氧。地球大气是太阳系中唯一含自由氧的行星，大气氧浓度的升高是地球

宜居环境形成的关键。一系列证据表明，在太古宙与元古宙之交地球的表层环境发生了从无氧到有氧状态的转化，称为大氧化事件（The Great Oxidation Event, GOE）。大氧化事件的发生实现了地球大气从无氧到有氧的质变，为真核生物的出现提供了前提，并对岩石圈和水圈产生了深刻影响，标志着宜居地球雏形的基本形成。大氧化事件的研究成为 21 世纪以来的地学重大前沿之一。人们对前寒武纪地球表层环境的氧化还原状态演化已经建立了框架性认识，但增氧过程的基本特征和形成机制仍未解决，如大氧化事件的强度、过程、机制和起始时间仍不清晰。

北京大学陈衍景教授作了关于“23 亿年大氧化事件与成矿大爆发”的报告。古元古代大氧化事件是前寒武纪重大地质事件之一，它处于地球演化的构造静寂期，涉及 26~18 亿年期间超大陆聚合-裂解、全球冰期、生命爆发、成矿爆发、地球演化、环境变化等一系列问题，是地球各圈层演化处于关键转变期的集中体现，是目前国际早前寒武纪研究热点和前沿。早在 1987 年陈衍景教授就立足华北克拉通开展这项“Catastrophe（突变）”研究，并取得了系统性成果，如：通过全球对比建立了以条带状铁建造→冰碛岩→火山岩+多类富氧标志为主线的事件谱系，提出了先水圈后气圈的两阶段氧化模式，厘定休伦冰期为 22.9~22.5 亿年，重建了大氧化事件谱系；在华北克拉通发现古元古代碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 正异常，揭示华北克拉通对大氧化事件的响应；运用软硬酸碱理论推定氧化环境沉积物稀土总量高、铈亏损，还原环境则相反，提出了沉积物稀土地球化学变化的氧化还原模式；发现华北南缘沉积物铈亏损始于 23 亿年前，缘于还原环境突变为氧化性，即大氧化事件；论证了大氧化事件与铁镁硼等成矿大爆发之间的联系。

中国科学院南京地质古生物研究所朱茂炎研究员重点关注了“雪球地球与复杂生命大爆发”。“雪球地球”（Snowball Earth）假说认为，距今大约 7.2~6.3 亿年之间地球曾经发生过从两极到赤道地区都被冰

川覆盖的极端冰室气候事件。雪球冰期结束之后，地球大气氧大幅度增加至接近现代大气氧的水平，复杂多细胞生物发生大爆发式的快速演化。前寒武纪末期地球表层系统发生的这一系列事件是地球宜居性演化史上的一次革命，相关研究是 21 世纪以来地球科学领域备受关注的学科交叉研究前沿。当前，有关雪球地球假说的研究存在着大量未解之谜。例如，什么导致了雪球冰期的发生和结束？为什么短期内发生两次雪球冰期，两次冰期之间差异如何？为什么雪球冰期在显生宙没有再次发生？而对于雪球冰期结束之后的复杂生命大爆发研究，目前也存在一系列亟待解决的谜题。首先，复杂生命主要类群起源的化石记录和分子钟之间存在明显的时间差异；第二，真核多细胞生物和动物在前寒武纪末期的辐射演化是否同步？是否具有阶段性演化的过程？一般认为大气和海洋的氧化程度在前寒武纪末期快速增加控制着复杂生命的起源和演化。但是，受到研究手段的限制，目前前寒武纪末期大气和海洋的氧化程度存在不同模型，而什么是导致大气和海洋氧化的机制也是悬而未决的科学问题。

中国科学院地质与地球物理研究所范宏瑞研究员探讨了前寒武纪矿产资源时空分布规律研究现状及意义。前寒武纪矿产资源的时空分布具有不均一性，它反映了地球演化过程中构造体制和表生环境的变化。地球演化过程导致矿产资源的形成和保存随时间的推移逐渐解耦，其时空分布被限制在地球历史的特定时期和特定构造背景中。与地球冷却相关的矿产资源，为岩浆型硫化物矿和层状铬铁矿；与板块构造体制演化相关的矿产资源，主要为造山型金矿、火山岩容矿块状硫化物矿、铁氧化物型和斑岩型铜金矿、碳酸岩-碱性岩型稀土矿、伟晶岩锂矿等；与表生环境演化相关的矿产资源主要为沉积岩容矿的氧化还原敏感金属元素矿产，如条带状铁建造及其伴生的锰矿、古砾岩型和沉积不整合型铀矿、沉积岩容矿铜钴矿等，以及与水圈和生物圈演化密切相关的非金属矿，如硼-菱镁矿-磷块岩矿和石墨矿等。加强

矿产资源的时空分布规律的研究有助于理解宜居地球的形成与演化。

五、论坛达成的共识

本次论坛取得了丰硕成果，达成如下共识：

(1) 前寒武纪地质学的一系列重要科学主题（如圈层分异机制、大陆形成和演化机制，以及早期环境和早期生命演化过程）对于理解地球的历史、现在和未来具有重要意义。近年来，中国地学界取得可喜进展，但仍要进一步加强各学科的交流合作，从系统科学角度审视早期地球演化的系列过程。

(2) 中国在前寒武纪地质研究中有独特优势，华北克拉通在大陆早期演化等方面的研究成果得到国际同行的高度关注和评价。在以后的研究中，应该具备前瞻性和国际性的视野，加强华北克拉通与全球其他典型克拉通的对比研究，加强前寒武纪地质学与比较行星学的对比研究。

(3) 前寒武纪地质学学科应加强与关键性金属矿产研究的交叉融合，夯实我国战略性关键金属矿产资源的保障基础和储备体系。

参会专家分别对早期地球的动力学机制和地壳生长方式、板块和地幔柱构造体制的判别、早期古地磁记录与板块构造的联系、TTG 岩系的形成方式等问题展开热烈讨论。

六、我国在本领域的优势和特色

我国政府对基础学科领域的研究具有持续的资金和政策支持，使得前寒武纪地质学等基础学科得以不断发展和完善。此外，我国幅员辽阔，与前寒武纪地质学相关的地质记录众多，具有得天独厚的优势，使得形成各个分支学科百家争鸣、百花齐放的局面成为可能。

我国前寒武纪地质研究的学科优势和特点体现在：

(1) 具有一系列独特的地质记录。华北克拉通是中国面积最大、形成演化时代最长、地质记录最为丰富的稳定陆块，也是世界上最具

代表性的克拉通之一。中国学者通过多年努力，在华北克拉通早期陆壳的生长、克拉通的形成和早期演化等方面有重要发现和系统性成果，成为中国地质科学在世界上为数不多的领先研究领域之一，受到国际学术界的高度关注。

(2) 具有一批优秀的前寒武纪地质和变质地质学的专业人才，形成了一支年龄结构合理的人才队伍，是进一步深化研究，推动学科跨越式发展的基础。希望这次学科发展战略研讨，能够推动该领域的研究发展。

(作者：赵国春，中国科学院院士，香港大学讲座教授，西北大学长江学者讲座教授；郭敬辉，中国科学院地质与地球物理研究所研究员，中国科学院大学地球与行星科学学院教授)

联系方式：中国科学院学部工作局学术与文化处，010-59358366