引用格式：王孝磊，丁宁，熊定一，2025. TTG 岩石成因与早期板块构造[J]. 地质力学学报，31（5）：1044−1062. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025150

Citation: WANG X L，DING N，XIONG D Y，2025. TTG petrogenesis and early plate tectonics[J]. Journal of Geomechanics，31（5）：1044−1062. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025150

TTG 岩石成因与早期板块构造

王孝磊[1,2]，丁　宁[1,2]，熊定一[1,2]

WANG Xiaolei[1,2]，DING Ning[1,2]，XIONG Dingyi[1,2]

1. 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室，江苏 南京 210023；
2. 南京大学地球科学与工程学院，江苏 南京 210023

1. *State Key Laboratory of Critical Earth Material Cycling and Mineral Deposits*, *Nanjing* 210023, *Jiangsu*, *China*;
2. *School of Earth Sciences and Engineering*, *Nanjing University*, *Nanjing* 210023, *Jiangsu*, *China*

TTG petrogenesis and early plate tectonics

Abstract: ［**Objective**］TTG (tonalite-trondhjemite-granodiorite) suites, major constituents of Archean continental crust, serve as key archives for understanding the formation and evolution of the early continental crust and related plate tectonic regimes and mechanisms. ［**Methods**］This work presents a systematic review on the petrological definitions, classification schemes, experimental petrology, source characteristics, and genetic mechanisms of TTGs, with a particular focus on the relationship between TTG petrogenesis and early plate tectonics. Traditionally, high-pressure TTGs have been interpreted as evidence for Archean subduction. However, emerging paradigms, including the "mush model" and geodynamic numerical simulations, suggest that the compositional diversity of TTG can be reasonably explained by late-stage magmatic processes (e.g., crystal-melt separation) and that TTG can also be formed through non-subduction mechanisms (e.g., crustal dripping, mantle plumes). ［**Results**］Recent applications of non-traditional stable isotopes (e.g., B, Si, K, Ca), big data analytics, and machine learning in the early Earth studies provided novel insights into tracing TTG source characteristics (such as the incorporation of supracrustal materials) and early tectonic settings. ［**Conclusion**］This review suggests that future TTG research should further integrate petrology, geochemistry, and numerical modeling, enhance the identification of primary melt compositions, develop more robust geochemical indicators to effectively discriminate between different mechanisms (e.g., subduction vs. mantle plumes), and conduct multi-scale, interdisciplinary studies in key areas. ［**Significance**］These efforts are crucial for deepening our understanding of the tectonic evolution of the early Earth and the mechanisms of continental crust growth.

Keywords: TTG; petrogenesis; early Earth; plate tectonics; continental evolution

摘　要：TTG（英云闪长岩–奥长花岗岩–花岗闪长岩）作为太古宙大陆地壳的主要组成，是揭示早期大陆形成–演化和早期板块构造体制机制的关键载体。文章系统回顾了 TTG 的岩石学定义、分类方案、实验岩石学约束、源区特征及成因机制，重点探讨了 TTG 成因与早期板块构造之间的关系。传统上，高压型 TTG 被视为太古宙俯冲作用的证据，但新兴的“晶粥模型”和地球动力学数值模拟表明，TTG 的成分多样性可能显著受后期岩浆过程（如晶体–熔体分离）改造，且其形成也可通过非俯冲机制（如地壳滴坠、地幔柱）实现。近年来，非传统稳定同位素（如 B、Si、K、Ca）、大数据分析与机器学习在早期地球的应用为示踪 TTG 源区性质（如表壳物质加入）和早期地球的构造环境提供了新的思路。文章指出，未来 TTG 研究应进一步整合岩石学、地球化学与数值模拟，加强对原始岩浆成分的识别，发展能够有效区分

基金项目：国家自然科学基金项目（42025202）

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 42025202).

第一作者：王孝磊（1979—），男，博士，教授，主要从事寒武纪地质与花岗岩研究。Email：wxl@nju.edu.cn

收稿日期：2025−10−10；**修回日期：**2025−10−28；**录用日期：**2025−10−29；**网络出版日期：**2025−10−31；**责任编辑：**吴芳

不同成因机制（如俯冲、地幔柱等）的地球化学指标，并在典型地区开展多尺度、多学科综合研究，以深化对早期地球构造演化和大陆地壳生长机制的认识。

关键词：TTG；岩石成因；早期地球；板块构造；大陆演化
中图分类号：P581; P548　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006−6616(2025)05−1044−19
DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025150

0　引言

TTG(英云闪长岩–奥长花岗岩–花岗闪长岩)是太古宙大陆地壳的主要组成部分，占早期陆壳岩石的 70% 以上(Moyen, 2011)。这类富钠的花岗质岩石主要形成于 38 亿年至 25 亿年前，是理解早期地球由镁铁质原始地壳向长英质陆壳转化的关键载体(Martin, 1994; 翟明国等, 2016; Zhai and Peng, 2020; 赵国春和张国伟, 2021; Cawood et al., 2022)。与现今广泛分布的富钾花岗岩类不同，TTG 独特的岩石学和地球化学特征反映了地球早期特定的构造环境和热状态(张旗和翟明国, 2012; Laurent et al., 2014; Moyen and Laurent, 2018)。研究 TTG 的成因机制不仅能够揭示早期大陆地壳的生长方式，还能为地球早期动力学体制的演变提供关键约束。

TTG 的研究不只是岩石学成因的问题，其独特的成分特征还引发了对源区特征、构造背景和动力学机制的思考，当前这些研究更多地联系到早期板块构造体制和现代板块启动等重要问题上(翟明国等, 2020; 赵国春等, 2023; 龙晓平等, 2024; 郑永飞, 2024)。判定的依据主要围绕着 TTG 的主微量元素与同位素特征展开。从主微量元素上看，传统观点认为高压型 TTG(形成压力>1.5 GPa)的形成需要达到地幔深度，与现代俯冲环境类似，因此其被视为太古宙板块俯冲的证据(Martin et al., 2005; Ge et al., 2018; Hastie et al., 2023)。然而，这一推论建立在 TTG 全岩成分能代表原始母岩浆的前提下，而忽略了后期岩浆分异过程可能造成的成分改变。近年来，越来越多的研究对这一假设提出了挑战，认为 TTG 可能通过非板块构造机制形成，如地幔柱–凹沉模式或晶体–熔体分离作用(Laurent et al., 2020; 赵国春和张国伟, 2021; Ding et al., 2024)。从同位素上看，Si、O、B 同位素可以识别 TTG 源区是否有表壳海水/低温蚀变物质的加入(André et al., 2019; Smit et al., 2019; Wang et al., 2022)，但表壳物质的加入能否指示板块构造的启动仍然存在争议(Kirkland et al., 2025)。地球动力学模拟表明垂向构造(如绿岩滴坠)也可将地表物质带入深部(Sizova et al., 2015; Yu et al., 2022)，而岩石圈局部横向的相对运动也可以产生类似俯冲的环境(Capitanio et al., 2019)，但这种板块的相对运动是短暂的，和现代持续的、全球联动的板块构造有本质的区别(Cawood et al., 2022)。

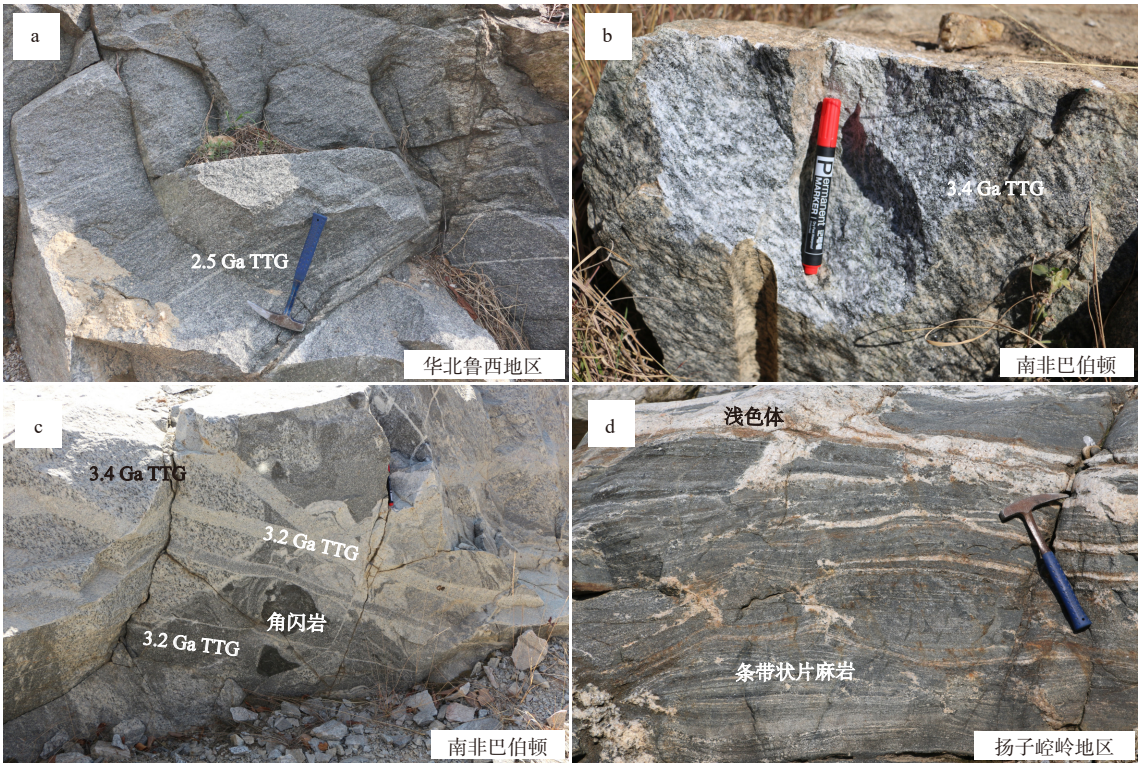
目前 TTG 研究领域面临几个关键问题：首先，TTG 的原始岩浆成分究竟如何准确识别？全岩地球化学成分在多大程度上受到岩浆结晶分异作用的改造？其次，TTG 的源区特征和熔融机制是什么？源区的水从何而来？再者，如何区分不同构造背景(俯冲或地幔柱)在驱动 TTG 形成中的贡献？解决这些问题需要综合岩石学、地球化学、数值模拟和实验研究等多种手段，从而建立更可靠的成因模型。

1　TTG 的定义和分类

1.1　TTG 的岩石学定义与基本特征

TTG 是 3 种富钠花岗质岩石的缩写组合(Jahn et al., 1981)：英云闪长岩(Tonalite)、奥长花岗岩(Trondhjemite)和花岗闪长岩(Granodiorite)。在矿物组成上，通常由富钠斜长石(奥长石)、石英、黑云母与少量钾长石、角闪石等组成，副矿物通常包含锆石、磷灰石、榍石、帘石、独居石和钛铁氧化物等(Moyen and Martin, 2012; Laurent et al., 2024)。在化学组成上，TTG 通常具有高硅(SiO_2 > 64%)、富钠(Na_2O > 3%、K_2O/Na_2O 比值< 0.6)、低镁铁($Fe_2O_3^T$+MgO+MnO+TiO_2 < 5%)、轻—重稀土高度分馏(La/Yb > 15)、弱到无 Eu 异常、较高的 Sr/Y 比值(>15)等特点(Moyen and Martin, 2012)。类似 TTG 的富钠特征在某些后太古宙花岗岩中也有出现，但其几乎都形成于大洋而非大陆环境(Laurent et al., 2024)，如与蛇绿岩套伴生的斜长花岗岩。而后太古宙的大陆地壳几乎都是由富钾花岗岩组成，这一点与太古宙有着根本的不同(Moyen and Laurent, 2018)。

灰色片麻岩(Grey gneiss)这一概念有时被误用作TTG的同义语，但二者有根本上的区别(Moyen and Martin, 2012; Laurent et al., 2024)。前者代表大部分克拉通地壳的主要组成，包含多种、多期次复杂的变质与未变质组分。许多灰色片麻岩成分非常复杂，其野外露头不仅包含TTG，还包含了钾质花岗岩、淡色体(混合岩)、残留体、角闪岩与变泥质岩等(图1)，此时其中仅有钠质的花岗岩组分可以被称为TTG(Moyen and Martin, 2012)。这种情况下的TTG仅是灰色片麻岩的“子集”。有的灰色片麻岩其实是TTG风化剥蚀的沉积物然后再变质的岩石，其虽然具有TTG的成分特征，但其实是碎屑岩。有的TTG因其片麻状的构造特征，在野外直接被定成灰色片麻岩，此时二者是相当的。



a—华北鲁西地区约25亿年的TTG片麻岩；b—南非卡普瓦尔克拉通巴伯顿地区约34亿年的Eerstehoek岩体；c—卡普瓦尔克拉通巴伯顿地区Stolzburg岩体，约34亿年的灰白色片麻状TTG被约32亿年的灰黑色TTG侵入，黑色为斜长角闪岩；d—湖北宜昌崆岭地区约30亿年的条带状片麻岩

图1 TTG与灰色片麻岩的野外露头

Fig. 1 Field outcrops of TTG and grey gneisses

(a) ~2.5 Ga TTG gneisses from western Shandong, North China Craton; (b) ~3.4 Ga Eerstehoek pluton in the Barberton area, Kaapvaal Craton, South Africa; (c) ~3.4 Ga grey–white gneissic TTG intruded by ~3.2 Ga grey–black TTG in the Stolzburg pluton, Barberton area, Kaapvaal Craton, with black amphibolite layers; (d) ~3.0 Ga banded gneiss from the Kongling area, Yichang, Hubei Province

1.2 基于形成压力的分类方案

根据实验岩石学和地球化学特征，TTG大致可按照形成压力分为3类：低压型(1.0~1.2 GPa)、中压型(~1.5 GPa)和高压型(~2.0 GPa)，且高压型TTG更加具有奥长花岗质的特征(表1，图2a)。这种分类方案由Moyen(2011)系统提出，主要依据TTG岩石中Sr/Y、La/Yb等比值对熔融压力的响应。高压型TTG通常具有较高的Sr/Y、La/Yb比值和明显的Nb-Ta负异常，反映了源区中有金红石、石榴子石残留而缺乏斜长石；而低压型TTG则相反，稀土配分曲线也没有那么陡峭(图2b)，指示源区中存在斜长石而缺少石榴子石和金红石；中压型TTG特征则介于两者之间(图2c)。根据Moyen(2011)的统计，高、中、低压3种类型分别占到整体的20%、60%和20%。这种压力分类对推断TTG形成的构造环境具有重要意义。

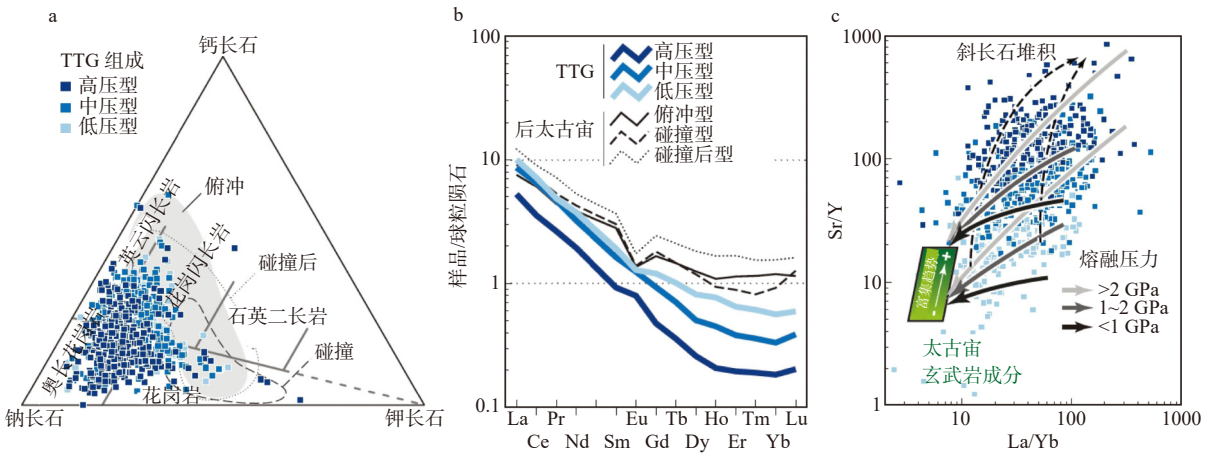
1.3 基于铝含量的分类及其意义

除了压力分类外，TTG还可根据Al_2O_3含量分

表 1　TTG 岩石的主要分类方案及特征

Table 1　Major classification schemes and characteristics of TTG rocks

分类依据	类型	主要特征	可能的形成机制
形成压力	高压型(～2.0 GPa)	高Sr/Y、La/Yb, 重稀土强烈亏损	源区残留相为金红石+石榴子石+辉石, 可能与俯冲有关
	中压型(～1.5 GPa)	中等Sr/Y、La/Yb	源区残留相为石榴子石+辉石/角闪石
	低压型(1.0～1.2 GPa)	低Sr/Y、La/Yb	相对较浅的熔融, 源区残留相为斜长石+角闪石
铝含量	高铝型(Al_2O_3 > 15%)	高铝、高La/Yb、低Yb	高压熔融, 石榴子石、角闪石残留
	低铝型(Al_2O_3 < 15%)	低铝、低La/Yb	相对低压熔融



a—TTG 的岩石分类图解；b—TTG 与不同构造背景花岗岩的稀土元素分异图(横坐标为稀土元素)；c—TTG 的 Sr/Y 与 La/Yb 协变图

图 2　TTG 的分类与稀土分异图解（据 Laurent et al.，2024 修改）

Fig. 2　Classification and REE fractionation diagrams for TTGs (modified from Laurent et al., 2024).

(a) TTG rock classification diagram; (b) REE differentiation diagram of TTG and granites from different tectonic settings; (c) Sr/Y vs. La/Yb covariation diagram of TTG

为高铝型和低铝型，通常以 SiO_2 = 70% 时 15% 的 Al_2O_3 含量为界限(Barker, 1979)。高铝型 TTG (Al_2O_3 > 15%, Yb < 1 ug/g, La/Yb > 30, Na_2O/K_2O > 1)通常被认为是由含水的玄武质岩石在高压条件下部分熔融形成，可能有石榴子石、角闪石作为残留相；而低铝型 TTG 则可能形成于相对较低的压力条件(表 1)。这种分类虽然简单，但能有效反映源岩成分和熔融条件的差异。值得注意的是，同一地区出露的 TTG 往往包含从低压到高压的多种类型，这可能反映了岩浆结晶分异过程而非源区深度的变化(Liou and Guo, 2019; Ding et al., 2024)。

2　TTG 成因的实验岩石学研究

探讨 TTG 成因的实验岩石学研究起源于 20 世纪 90 年代，目的是验证在石榴子石稳定域中基性岩部分熔融是否可以产生 TTG 熔体(Moyen and Stevens, 2006; Moyen and Martin, 2012)。大部分的研究已经由 Moyen and Martin(2012)所总结，不同实验间的条件相差较大。首先，在初始成分上，虽然总体上均为拉斑玄武质，但在矿物组成和全岩化学成分上明显不同。角闪石/斜长石比例在 0.18 到> 4 之间变化，石英含量从 0% 到 24% 不等，某些矿物组合中还包括绿泥石、绿帘石、钛铁氧化物和榍石等矿物。因此，源区 SiO_2 含量为 47%～60%，K_2O 为 0.1%～1.8%，Na_2O 为 1%～4.3%，Mg#($Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+total})$ 摩尔数之比)为 38～71。其次，形成 TTG 熔体的温度变化从 750 ℃ 到 1100 ℃，压力变化从 1.0 GPa 到 3.5 GPa。在水含量上，可分为 3 种模式：①含水熔融，水作为自由相或在变质升温过程中由含水矿物(如绿泥石或绿帘石)分解释放；在此情形下，熔融程度相对较高。②脱水熔融，体系中的水基本赋存于角闪石中，其在高温下不稳定脱水而触发熔融，这也是最常见的实验情况。③无水熔融，体系中完全不含水，且不含任何含水矿物，对应于榴辉岩或麻粒岩

的熔融；在这种条件下无法产生奥长花岗质熔体（Springer and Seck, 1997）。

总的来说，尽管各项实验在初始成分、温压范围、水含量等实验条件上差异较大，但获得的实验熔体在适当的温压条件下是相似的，高度接近富 Na 的 TTG（Moyen and Stevens, 2006; Moyen and Martin, 2012）。在这些温压条件下，影响实验熔体成分的主要因素有：①部分熔融程度（F），随着 F 增加，熔体更加富 Mg 和 Ca，并从英云闪长质向花岗闪长质甚至闪长质演化，因此现在一般认为形成 TTG 的 F 不超过 30%（Moyen and Martin, 2012; Laurent et al., 2024）；②源区成分，主要是 K_2O 的含量，富 K 源区产生的熔体更接近花岗质或花岗闪长质（Martin and Sigmarsson, 2007）。此外，若压力升高，熔体成分将从英云闪长质向奥长花岗质转变，这是由于高压下残留的石榴子石与绿辉石更富 Ca 而贫 Na（Moyen, 2011）。

残余矿物的组成对熔体的微量元素特征有决定性影响（Moyen and Stevens, 2006）。其中，石榴子石的稳定域大约在 0.9～1.0 GPa/700 ℃ 至 1.5 GPa/1100 ℃ 的范围内。角闪石通常在 2.2～2.6 GPa 之间消失，并且在> 1100 ℃ 时不稳定。斜长石的稳定性差异较大，受水含量控制：在无水条件下，可稳定至约 1100 ℃；而在含水条件下，于 1.0 GPa 和不到 950 ℃ 时即完全消失。金红石通常在 1.0 GPa 以上稳定，温度区间为 750～900 ℃，但随压力升高其稳定的温度可以拓展至约 1150 ℃（Xiong et al., 2009）。在这些矿物中，石榴子石对压力最为敏感，其富集重稀土的特性可使熔体具有较高的 La/Yb 比值，但角闪石的存在可在一定程度上降低 La/Yb 比值；金红石的残留则将极大地削减熔体的 Nb、Ta 含量；而较高的熔体 Sr/Y 比值则与石榴子石、角闪石和斜长石的稳定均有关系。对实验熔体的微区分析也表明，TTG 的轻—重稀土分异的确是石榴子石的残留所致（Rapp et al., 2010; Hastie et al., 2023）。

之后有研究认为，800～950 ℃/1.0～1.25 GPa 的温压条件即可形成 TTG 的轻—重稀土分异模式，而不需要过高的温度和压力（Qian and Hermann, 2013）。但该研究得到的实验熔体完全是英云闪长质的，而非奥长花岗质的，且熔体的微量元素组成均由理论计算得出而非实测值。此外还有实验表明，若源区比较亏损，则需要的温度和压力分别为 900～950 ℃ 和 1.6～2.2 GPa，且需要额外的流体交代作用（Hastie et al., 2016）。国内后来有学者对基性岩的高温–超高温变质作用作了深入总结，并据此确定 TTG 形成于角闪石和石榴子石共同稳定域下的角闪石脱水熔融，温压条件为 1.0～2.5 GPa 和 800～1000/1100 ℃，分别对应于角闪高压麻粒岩亚相和角闪榴辉岩亚相，其地温梯度分别为 15～25 ℃/km 和 10～15 ℃/km（魏春景等, 2017）。

3 TTG 的源区岩性与水的来源

3.1 TTG 的源区岩性

关于 TTG 源区的争论在 21 世纪初告一段落，而在此前存在 4 种主要的观点。

（1）富水的玄武质岩浆，其通过结晶分异产生含角闪石、斜长石和黑云母的堆晶，残余熔体演化为 TTG（Arth et al., 1978; Barker, 1979; Smith et al., 1983）。但是，其要求的分离结晶程度至少要达到 75%，势必残留大量的堆晶（Arth, 1979; Martin et al., 2005）。然而在 TTG 中却从未见到过如此显著的分异趋势（Moyen and Martin, 2012）。此外在各克拉通内，TTG 通常侵位于基性岩中，少有与之伴生的同时代的大规模基性岩（Champion and Smithies, 2007; Smithies et al., 2007; Benn and Moyen, 2008; Byerly et al., 2019）。这种观点在 21 世纪初又流行起来，主要是因为当时某些学者将 TTG 与埃达克岩混为一谈（Condie, 2005; Martin et al., 2005; Rollinson and Martin, 2005; Richards and Kerrich, 2007）。然而，TTG 与埃达克岩终究是两类岩石，在构造环境与成因上也没有必然联系（Moyen and Martin, 2012; 张昌振等, 2018）。

（2）交代地幔，其通过极低程度的部分熔融（< 5%）以产生长英质岩浆（Moorbath, 1975; Peterman and Barker, 1976）。但长英质熔体无法与超镁铁质的地幔达到平衡（Moyen and Martin, 2012）。并且熔融程度如此之低也无法导致重稀土的亏损（Jahn et al., 1981, 1984; Martin et al., 1983）。

（3）太古宙杂砂岩，其部分熔融的熔体在微量元素上与 TTG 是比较匹配的（Arth and Hanson, 1975），但在主量元素上表现为钾质而非钠质（Martin, 1994; Moyen and Martin, 2012），且通常认为太古宙没有足量的杂砂岩以产生广泛的 TTG（Moyen and Martin, 2012）。

（4）水化玄武岩，其熔融的温压条件相当于榴

辉岩相或含石榴子石的高压角闪岩相，并要求石榴子石的残留（见上一章）。这一观点久经检验，目前已是关于 TTG 源区的重要共识（Laurent et al., 2024）。

虽然最经典的模型认为 TTG 主要来源于水化玄武岩的部分熔融，但也有不少研究提出源区可能并非单一的水化玄武岩，还可能混入其他物质。首先，不少太古宙 TTG 的 $\delta^{18}O$ 显著高于地幔值（Næraa et al., 2012; Van Kranendonk et al., 2015; Roberts and Santosh, 2018; Smithies et al., 2021; Wang et al., 2022），可能指示了源区中表壳沉积物的加入。Si 同位素的证据则表明这些表壳沉积物可能是燧石（Trail et al., 2018; Deng et al., 2019; Zhang et al., 2023a），而来自 Ca 同位素的证据则指示某些 TTG 的源区中可能存在碳酸盐沉积物（Antonelli et al., 2021）。其次，某些 TTG 具有较高的相容元素（如 Mg、Cr、Ni）含量，被认为源区混入了幔源岩浆（Rapp et al., 2010）。但高 Mg#也可能是由于源区残留富 Fe 的绿辉石（Laurie and Stevens, 2012; Moyen and Martin, 2012），或者由于源区是更富 Mg 的科马提岩或科马提质玄武岩（Tamblyn et al., 2023; Huang et al., 2025）。另外也有学者认为澳大利亚的 Pilbara 和 Yilgarn 克拉通内的 TTG 起源于富集的幔源赞岐质岩浆（Smithies et al., 2009, 2019）。Condie（2005）通过统计发现年轻 TTG 普遍具有更高的相容元素含量，可能反映了地球逐渐冷却所导致的玄武岩熔融深度的增加（Moyen and Martin, 2012）。

3.2　TTG 源区水的来源

TTG 来源于含水玄武岩的部分熔融目前已成共识。然而，在板块构造尚未启动的早期地球，这些水源从何而来，成为了早期陆壳起源研究中的核心难题。近年来，多个研究从不同角度提出了可能的机制，逐步揭示了早期地球中水的多样来源与循环路径。

Roman and Arndt（2020）对“沉陷（sagduction）”模型提出关键质疑。他们通过热力学–力学模拟指出，太古宙大洋地壳具有显著分异特征：上部为含水玄武岩，而下部为无水或贫水的超基性堆晶岩。在岩浆侵入加热的背景下，下地壳温度高于含水矿物的稳定范围，使其在埋藏前已脱水变干。这意味着即便发生沉陷，被带入深部的也主要是“干”的堆晶岩，而非 TTG 形成所必需的“湿”玄武岩。该研究动摇了沉陷模型解释水源问题的可行性，并再次将 TTG 成因引向“需要一种能将表层含水玄武岩有效带入深部”的机制——即类似俯冲的过程。Ge et al.（2023）则从另一角度强化了俯冲作用的重要性。他们基于锆石氧逸度–水含量计的系统分析，揭示全球多数太古宙花岗岩类岩浆具有高水含量（6%～10%）和较高氧逸度，与现代俯冲带岩浆高度相似。该特征难以用沉陷或热管构造等非俯冲模型解释，因而支持 TTG 源区的水主要来源于俯冲板片脱水。将这一方法应用到南非巴伯顿地区时，Ding et al.（2025）发现 TTG 岩石氧逸度和水含量的升高与前人发现的氧同位素变重的时间一致，这强化了前人对此地在 32.3 亿年时发生构造转变的认识。

Hartnady et al.（2022）通过相平衡模拟则支持非俯冲模型。他们发现，太古宙高镁玄武岩和科马提岩等超基性岩可在海底蚀变中储存大量水，并在升温至超过 700 ℃ 后才释放。这一机制意味着，在厚大洋岩石圈或沉陷构造中，富水超基性岩可作为深部水源，通过脱水诱发上覆玄武岩部分熔融形成 TTG，从而挑战了“唯有俯冲才能输送水至深部”的传统观点。Tamblyn et al.（2023）进一步强调科马提岩在 TTG 形成中的关键作用。他们指出，蚀变科马提岩中的含水矿物（如蛇纹石、绿泥石等）在 670～800 ℃ 区间可释放约 5% 的水，正好触发玄武岩部分熔融。这一过程不依赖特定构造背景，为早期地球的非俯冲型水循环与 TTG 生成提供了新路径。

此外，吴忠庆提出“水诱导地幔反转（mantle overturn）”模型，将水的来源推向更深层次（Wu and Zhao, 2022; Wu et al., 2023; 吴忠庆, 2024）。该模型认为，早期地球核幔边界的含水基底岩浆洋因水富集导致密度降低，发生重力失稳而上涌，以地幔柱形式将深源水带至浅部，为 TTG 大规模熔融提供充分的水和热。该机制不依赖地表水循环，巧妙规避了沉陷模型中“下地壳无水”的难题。而在更早的时间尺度上，刘勇胜等（2025）提出“原始地壳增厚驱动水反向富集”模型。他们认为，地球岩浆洋冷却过程中，表层水随固化基性地壳向下迁移，最终富集于地壳底部，形成含水层。这一机制为前板块阶段基性地壳的含水熔融提供了内在水源，并可解释早期 TTG（如>3.9 Ga）形成深度逐渐加深的趋势。

综上，关于 TTG 源区水的来源，研究正从“是否必须依赖俯冲”向“多来源、多机制”深化，逐步构建出从深部地幔到地表蚀变的完整水循环图景。

4 TTG成因的数值模拟

数值模拟是补充和验证地质与地球化学证据的重要工具。关于TTG成因的数值模拟可以分为微观的热力学模拟和宏观的地球动力学模拟，前者主要利用Thermo-Calc、Perple_X、Theriak-Domino、GeoPS等热力学程序/软件来模拟基性岩变质熔融产生TTG熔体的过程，后者主要通过使用已知的物理参数及简化的地质模型来对早期构造体制与大陆地壳的形成过程进行约束。

4.1 热力学模拟基性岩变质熔融

相较于复杂耗时的岩石学实验，热力学模拟可以快速获取不同成分和温压范围下的相平衡结果。这一研究使用的软件主要有Thermo-Calc、Perple_X、Theriak-Domino、GeoPS等。Thermo-Calc主要通过求解非线性方程组来构建变质相图（Powell and Holland, 1988, 2008; Powell et al., 1998），而Theriak-Domino、Perple_X和GeoPS则是使用吉布斯自由能最小化原则来确定给定温压条件下的稳定相组合（De Capitani and Brown, 1987; De Capitani and Petrakakis, 2010; Connolly and Petrini, 2002; Xiang and Connolly, 2022）。目前看来，这些热力学软件在经典模型的计算结果上差异不大，但后者明显拥有更高的效率。在用变质基性岩模拟TTG的形成时，不同学者得到的最佳温压范围基本一致，为800～1000 ℃和1.0～1.8 GPa（Nagel et al., 2012; Johnson et al., 2014, 2017; Palin et al., 2016）。但选择的玄武岩的初始成分不同会极大地影响计算结果。从主量元素上看，低镁的玄武岩会降低石榴子石稳定域的压力下限至0.7～0.8 GPa，使得在较低压力的情况下即可产生类似TTG微量元素特征的熔体（Johnson et al., 2017）。从微量元素上看，玄武岩的富集程度也会影响对TTG形成温压的计算。如亏损的玄武岩（如N-MORB）相较于富集的拉斑玄武岩则需要在更高的压力、更小的熔融分数条件下才能满足TTG富集LILE、亏损Nb-Ta-Ti、轻重稀土分馏的特征（Nagel et al., 2012; Palin et al., 2016）。因此，在用相平衡–地球化学计算来模拟TTG形成的条件时需认真考虑源岩的选取。通常选择同一地区更为古老的玄武岩作为源区更为合理。但有些地区经历了复杂且强烈的构造运动，很难找到与TTG同期或更早基性岩石，这时可以选择太古宙拉斑玄武岩的平均值作为初始成分（图3）。比较特殊的是，对加拿大Acasta片麻杂岩中4.02 Ga的Idiwhaa片麻岩的模拟结果显示，其形成需要的变质温压为800～900 ℃和1 kbar，如此极端低的压力条件被认为是陨石撞击所致（Johnson et al., 2018）。由于Idiwhaa片麻岩具有与太古宙TTG迥异的化学成分，其稀土配分曲线比较平坦，具有明显Eu负异常，且FeO、MgO含量较高（Johnson et al., 2018），因此这样的成因模型对大部分TTG而言并不适用。

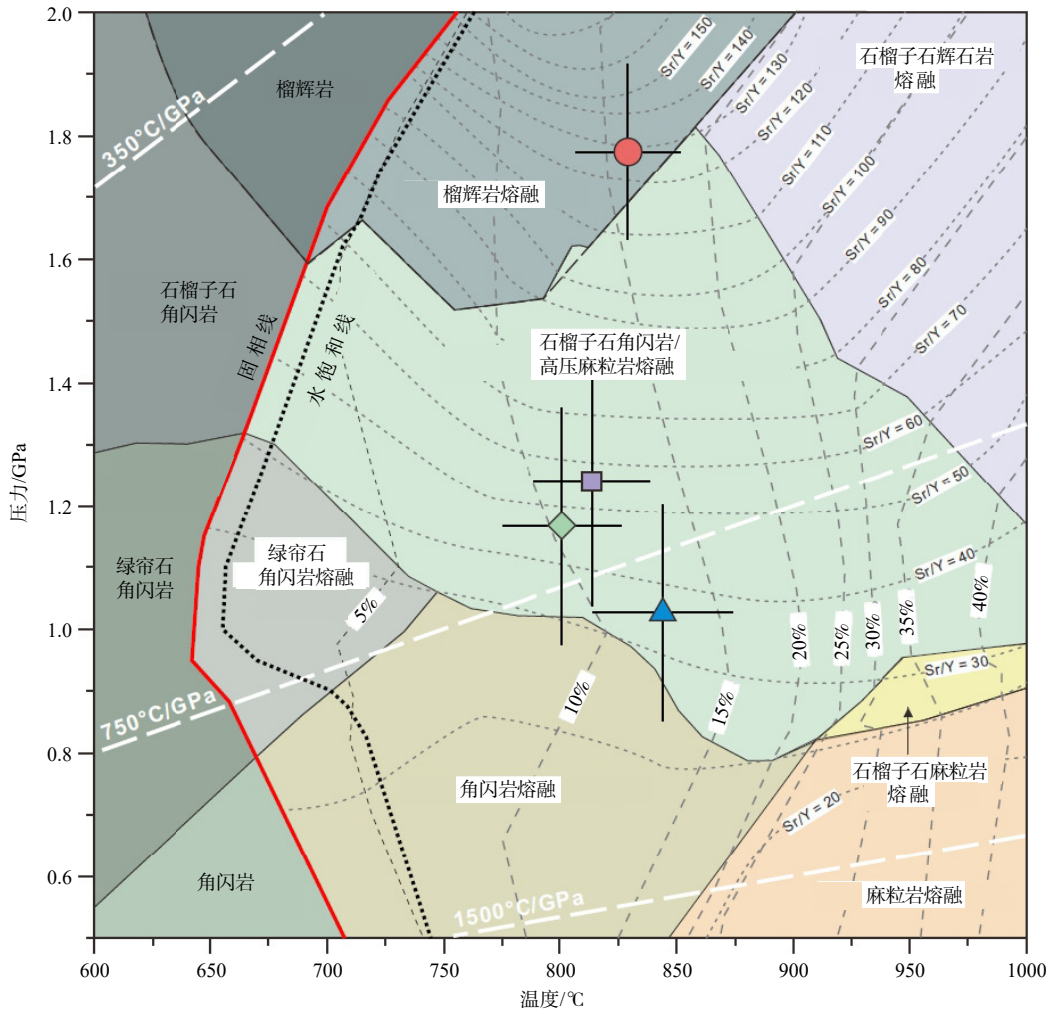
4.2 大陆地壳形成与早期构造体制的数值模拟

动力学的数值模拟主要用于探究长英质陆壳的形成机制，以及约束早期的构造体制。总体上，这些工作强调：在更高地幔温度背景下（Herzberg et al., 2010），早期地球可能经历了多种构造模式，包括缓慢俯冲（Sizova et al., 2015; Foley, 2024）、短期或间歇性俯冲（Moyen and Van Hunen, 2012; Sizova et al., 2015）、滴坠和拆沉（Johnson et al., 2014; Sizova et al., 2015; Capitanio et al., 2019），以及以侵入为主导的岩浆活动（Rozel et al., 2017）等（图4）。这些不同机制能够在特定条件下产生TTG熔体，但在形成深度、微量元素特征及地壳保存机制方面表现出显著差异。

Foley（2024）提出“sluggish subduction（缓慢俯冲）”的构造模式，认为在太古宙较高的地幔潜热条件下，俯冲板片易于升温并在浅部发生部分熔融（图4）。这一模式强调，早期缓慢俯冲作用可能是TTG形成的重要途径。类似地，Moyen and van Hunen (2012) 通过数值模拟与地质记录对比，指出早期地球的俯冲活动难以长期维持，而更可能表现为短期、局部的间歇性事件，这为地质记录中脉冲式的TTG岩浆活动提供了合理解释（图4）。

除俯冲外，地壳重力不稳定与拆沉过程在早期地壳演化中也很重要。Johnson et al. (2014) 的模拟显示，加厚镁铁质地壳在高温条件下可能因密度较大而发生拆沉/滴坠（delamination/dripping），其循环至地幔后发生部分熔融，可以作为TTG的源区（图4）。这一模型被大量来自Pilbara克拉通的地球化学、构造地质学证据所支持（Van Kranendonk et al., 2015; Smithies et al, 2021; Vandenburg et al., 2023），成为解释地球早期构造模式的主流模型之一。

在更大尺度上，Sizova et al. (2015) 通过二维动力学模型探讨了不同构造情景下的熔融条件，结果显示浅俯冲、滴坠及加厚地壳底部熔融均能产生



初始玄武岩成分为太古宙富集拉斑玄武岩(平均值)；彩色黑框符号为全球不同克拉通早期 TTG 形成的温度压力限定，其中红色圆形为塔里木克拉通阿克塔什 TTG，紫色方形为北大西洋克拉通 Itsaq TTG，绿色菱形为华北克拉通鞍山 TTG，蓝色三角为苏必利尔克拉通 Acasta TTG

图 3　太古宙玄武岩的相平衡模拟与 TTG 的形成温压限定（据 Ge et al.，2018 修改）

Fig. 3　Phase equilibrium modelling of Archean basalts and *P*–*T* constraints for TTG formation (modified from Ge et al., 2018)

The modelling uses an enriched Archean tholeiitic basalt composition (average) as the starting material. Coloured symbols with black outlines represent *P*–*T* conditions for the formation of early TTGs from various cratons worldwide: red circles for the Aktashi TTG, Tarim Craton; purple squares for the Itsaq TTG, North Atlantic Craton; green diamonds for the Anshan TTG, North China Craton; and blue triangles for the Acasta TTG, Superior Craton.

TTG 质熔体(图 4)，而其微量元素特征则取决于源岩成分与残余矿物组合。Rozel et al. (2017) 则采用全球热化学对流模型，强调岩浆侵入与喷发比例对地壳组成的控制作用，认为侵入主导的岩浆作用更符合实际的 TTG 的形成与地壳的压力–温度分布。这一结论凸显了岩浆侵入过程在大陆地壳长期保存中的关键意义。进一步地，Capitanio et al.（2019）的研究表明早期地球可能不存在单一的主导构造模式，而是多种模式在时间与空间上的并存与转换，强调需将热–动力学模型结果与地质、地球化学证据综合考虑。

综上所述，地球动力学数值模拟研究揭示：早期大陆地壳的形成很可能并非由单一机制主导，而是在高地幔温度背景下，多种构造与岩浆过程协同作用的结果。缓慢或间歇性俯冲、滴坠，以及侵入主导的岩浆作用等机制均可能成为 TTG 形成与大陆地壳长久保存的重要机制。这一认识强调了将全球尺度的热化学对流模型与局部岩石学–熔融模拟相结合的重要性，也提示未来研究应更加注重不同尺度建模之间的耦合与地质记录的对比验证。

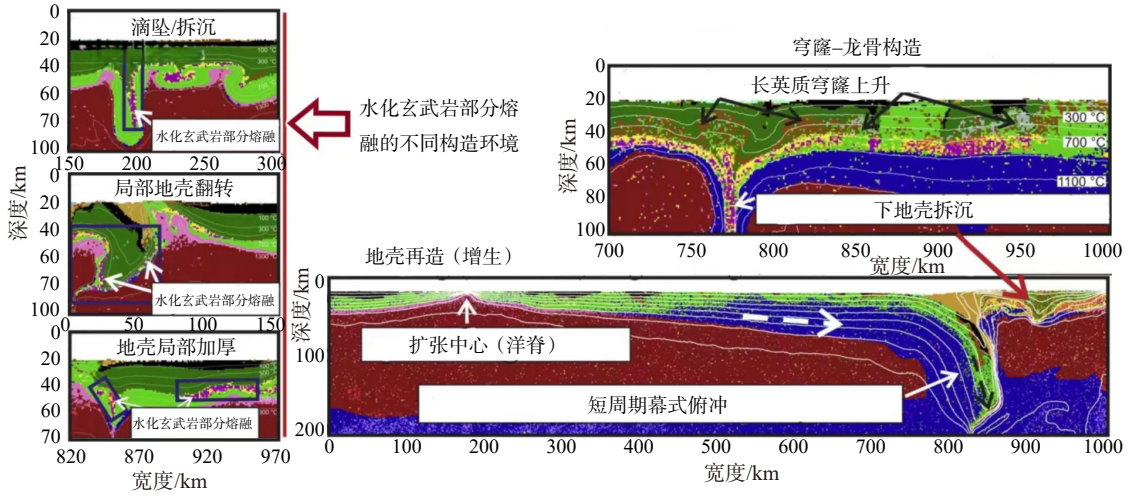


图 4 太古宙地球动力学模型（据 Sizova et al.，2015 修改）

Fig. 4 Archean geodynamic models (modified from Sizova et al., 2015)

5 晶粥模型与 TTG 的成因

5.1 晶粥模型的基本原理与证据

晶粥模型认为，TTG 岩体不是由液态岩浆直接结晶而成，而是经历了晶体–熔体分离过程的晶体富集产物（Bachmann and Huber, 2016; Laurent et al., 2020）。在晶粥模型中，堆积的晶体和少量间隙熔体形成了 TTG 岩体，而抽离熔体喷发出地表形成了火山岩。这一模型得到了岩相学观察的支持，如 TTG 岩石中常见的堆晶结构、矿物成分环带等。目前在世界各地发现了多个支持太古宙晶粥模型的实例（Laurent et al., 2020; Kendrick et al., 2022; Mathieu, 2022）。如对南非巴伯顿花岗绿岩带中 34.5 亿年 TTG 岩体的详细研究表明，其具有典型的堆晶结构，且与酸性火山岩在形成时代和同位素组成上具有同时性和同源性，支持它们来自共同的母岩浆，但经历了不同的晶体–熔体分离过程（图 5; Laurent et al., 2020; Ding et al., 2024）。但同时也需指出的是，巴伯顿地区的这些 TTG 究竟与火山岩之间有何种密切的空间联系，还需要有更多证据。此外，加拿大苏必利尔克拉通的 Abitibi 花岗绿岩带和 Wawa 片麻岩区的研究以及中国华北克拉通冀东地区的实例等均表明结晶分异作用对于 TTG 成分的影响是不可忽视的（Liou and Guo, 2019; Kendrick et al., 2022; Mathieu, 2022）。

5.2 结晶分异对 TTG 地球化学特征的影响

熔体抽离与晶体堆积过程可显著改变 TTG 的全岩地球化学成分，而母岩浆的成分控制着分离矿物的种类与比例。例如，在英云闪长质母岩浆的体系中，斜长石堆晶会导致堆晶体中 Al_2O_3、Sr 和 Eu 含量升高，相应地在演化熔体中造成这些元素的亏损（Laurent et al., 2020）；角闪石的堆晶则会加剧演化熔体中重稀土元素的亏损。由于此类母岩浆通常偏酸性，斜长石堆积往往是其成分演化的主导机制；而在更基性的闪长质母岩浆中，角闪石的分离结晶则对成分变化起主要作用（Liou and Guo, 2019）。这类过程广泛记录于地壳浅部至中部。例如，南非 Stolzburg 岩体（仅指该岩体中的主体即约 3.45 Ga 的部分）作为浅部地壳的晶粥残存，其内部不同岩石类型在传统 TTG 压力判别图中分布于高压、中压、低压及钾质等多个区域，如此显著的成分差异难以仅凭源区深度差异解释（Ding et al., 2024）。类似地，加拿大苏必利尔克拉通 Wawa 片麻岩区中 TTG 的成分变化，则揭示了太古宙中部地壳晶粥过程的影响（Kendrick et al., 2022）。

传统上，TTG 成因研究多聚焦于主要造岩矿物（如斜长石、角闪石）的影响，而副矿物（如磷灰石、榍石、锆石）在微量元素分配中的作用常被忽略。尽管这些副矿物含量较低，但它们对稀土元素和高场强元素等微量元素的分配具有显著控制效应。例如，磷灰石的分离可导致稀土元素的强烈分异；榍石的分离则影响 Ti、Nb、Ta 等元素的含量；锆石则富集 Zr、Hf 及重稀土元素。值得注意的是，Stolzburg 岩体的副矿物含量与全岩的 Sr/Y 和 La/Yb 比值之间呈现良好的相关性（Ding et al., 2024）。因此，副矿物在 TTG 中的不均匀分布也可能是其成

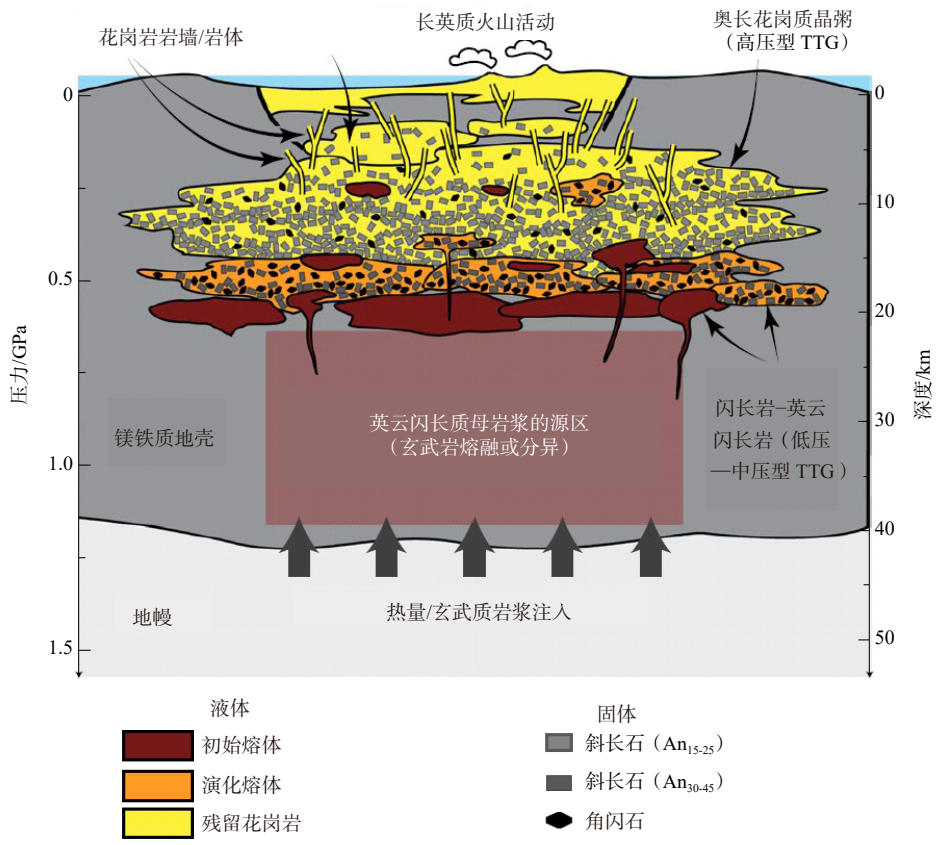


图 5　TTG 形成的晶粥模型（据 Laurent et al.，2020 修改）

Fig. 5　The mush model for TTG formation (modified from Laurent et al., 2020)

分多样性的重要原因之一。

除中上地壳的中酸性晶粥体系外，深部地壳中含水玄武质岩浆的分离结晶也被视为 TTG 成因的重要机制（Kleinhanns et al., 2003）。在含水玄武质岩浆中，角闪石的分离结晶是控制成分演化的关键过程。含水条件是玄武质岩浆分异形成钠质花岗岩的必要前提，该过程在显生宙主要发生于弧环境，并有多个实例支持，如 Washington Cascades 的 Chelan 杂岩和 Kohistan 岩基等（Dessimoz et al., 2012; Jagoutz et al., 2013）。在太古宙研究中虽存在类似观点，但并未强调含水玄武岩必然形成于俯冲背景的弧环境（Kleinhanns et al., 2003）。此外，源自交代地幔的含水赞岐质岩浆也可通过结晶分异形成具有高压特征的 TTG，这对传统的 TTG 压力分类方案提出了挑战（Smithies et al., 2019）。

综上所述，TTG 岩体在形成过程中普遍经历了结晶分异作用，因此在依据全岩地球化学成分推断单个 TTG 岩体形成压力时需格外谨慎。在统计 TTG 化学指标随时间变化的趋势时，亦需仔细甄别哪些数据反映了源区特征，哪些受到后期岩浆分异作用的改造。准确剔除岩浆分异的影响，是合理解释 TTG 成分演化及其地质意义的前提。另一方面，若将研究尺度扩展至地体或克拉通级别，TTG 的压力分类方案仍具参考价值，对于比较不同克拉通之间的异同、理解其形成与演化过程具有重要意义。

6　TTG 研究的新技术手段

6.1　非传统同位素对 TTG 成因的制约

近年来随着质谱技术的进步，一些非传统的稳定同位素如 Fe、Mg、Ti、Si、K、Zn、Cu、Ca 等同位素被逐渐应用到岩石学上来。目前已经有 TTG 的 B、Si、Mg、K、Ca、Fe、Zn、Ti 等同位素的数据，这些新数据为 TTG 的成因提供了新的制约。

（1）B 同位素：Smit et al.（2019）测定了格陵兰 Isua 和 Tartôq 绿岩带、加拿大 Acasta 片麻杂岩以及印度 Bastar 克拉通内 3.8～2.8 Ga TTG 的 B 同位素。由于并未发现较重的 B 同位素和较高的 B 含量，因此他们认为 TTG 的源区并无海水或海水蚀变物质的加入，而俯冲板片熔融并不能解释 TTG 的 B 同位

素组成，从而认为板块构造的启动时间不会早于2.8 Ga（Smit et al., 2019）。Liu et al.（2025）和Goumans et al.（2025）补充了全球其他克拉通如华北克拉通、南非Kaapvaal克拉通、印度Dharwar克拉通的TTG全岩B同位素数据。这些数据加强了Smit等人的结论，均认为板块构造启动于新太古代。

（2）Si同位素：Si同位素由于在部分熔融过程中几乎不发生分馏（Savage et al., 2011），因此可以用来示踪TTG源区的性质。南非Kaapvaal克拉通、加拿大Acasta和Itsaq片麻杂岩、俄罗斯Siberian克拉通和Karelia克拉通的太古宙TTG表现出异常重的Si同位素特征，André et al.（2019）将其解释为源区玄武岩受到了富Si海水的热液蚀变，而Deng et al.（2019）则认为是少量富重Si同位素的燧石随洋壳俯冲导致的。另一项关于锆石Si同位素的研究也支持太古宙乃至冥古宙时期燧石的深部循环（Trail et al., 2018）。近两年的锆石原位Si同位素研究加强了已有报道对TTG的Si同位素特征及其成因的认识（Lei et al., 2023; Zhang et al., 2023a）。

（3）Mg同位素：目前仅有来自华北和扬子克拉通的少量数据报道（Yang et al., 2016），表现为相对地幔值较大的不均一性，但并未排除变质等后期过程对Mg同位素的影响。

（4）K同位素：与Si同位素类似，K同位素在整个岩浆过程中的分馏都很有限，约0.2‰（Tuller-Ross et al., 2019; Huang et al., 2020; Hu et al., 2021），而在地表不同储库中差异较大（Chen et al., 2020; Hu et al., 2020, 2021; Santiago Ramos et al., 2020; Teng et al., 2020; Huang et al., 2020; Liu et al., 2021, 2023; Li et al., 2022），因此可以用来示踪岩浆的源区（Sun et al., 2020; Hu et al., 2021）。两项关于太古宙TTG的研究都发现$\delta^{41}K$和$\delta^{18}O$之间存在负相关（Xiong et al., 2025; Zhang et al., 2025），暗示了其源区是海水热液蚀变的洋壳，指示了汇聚板块的构造环境。

（5）Ca同位素：Antonelli et al.（2021）较为系统地分析了太古宙TTG、埃达克岩和其他花岗岩类的Ca同位素，结合相平衡模拟发现Ca同位素分馏主要受地温梯度的控制。TTG具有偏轻的Ca同位素组成，反映了约500～750 ℃/GPa的地温梯度。这与现代热俯冲带中观察到的埃达克岩相似，但与地幔柱体制下的高地温梯度（> 750 ℃）不一致。部分TTG样品中的Ca同位素显著偏重或偏轻，可能是由斜长石的结晶分异或堆晶导致的。来自加拿大Nuvvuagittuq的2个Ca同位素非常轻的样品可能反映了源区继承的碳酸盐沉积物。因此，Ca同位素可为制约太古宙陆壳形成时地温梯度和俯冲沉积物的循环提供新的启示（Antonelli et al., 2021）。

（6）Fe同位素：主要用于示踪某些含铁矿物的分离结晶。例如，Doucet et al.（2020）观察到，TTG的全岩Fe同位素组成与太古宙镁铁质岩相似，并归因于玄武质岩浆中角闪石和斜长石的分离结晶（Doucet et al., 2020）。对Acasta片麻杂岩4.02～3.6 Ga TTG的Fe同位素研究则强调低Fe^{3+}氧化物的结晶导致了残余岩浆轻微富集重Fe同位素（Aarons et al., 2020）。Liou et al.（2022）根据对华北克拉通晚太古代TTG的Fe同位素研究，提出所谓“高压”TTG的地球化学特征主要受控于角闪石等矿物的分离结晶（Liou et al., 2022）。

（7）Zn同位素：与Fe同位素类似，Doucet et al.（2020）观察到TTG的全岩Zn同位素组成与太古宙镁铁质岩相近，并据此驳斥了部分熔融的TTG成因模式，因为其模拟计算和质量平衡计算表明镁铁质岩石部分熔融会产生较大的Zn同位素分馏，而角闪石与斜长石的分离结晶可以产生与幔源岩浆相同的Zn同位素组成。不过这些同位素的工作目前还处于数据积累阶段，需要有更多的数据来证实。

（8）Ti同位素：Aarons et al.（2020）通过对Acasta片麻杂岩TTG的研究发现其Ti同位素在3.75 Ga之前表现为板内碱性岩浆的特征，而在3.75 Ga之后则更接近现代弧岩浆。这样的转变可能反映了构造体制从地幔柱向板块俯冲的转变。后来又有学者对Itsaq片麻杂岩开展了较为系统的Ti同位素研究（Hoare et al., 2023; Zhang et al., 2023b），同样揭示了该地始太古代TTG与现代钙碱性弧岩浆在Ti同位素组成上的相似性。该研究还同时指出一定程度的分离结晶对于TTG的形成是必要的，单纯的玄武岩部分熔融不足以解释某些TTG中的重Ti同位素信号。

在以上这些稳定同位素工具中，B、Si、K同位素主要用于指示源区性质，而其余的Mg、Ca、Fe、Zn、Ti同位素则侧重于示踪岩浆过程。比较特殊的是，Ca同位素可以指示地温梯度，且异常的Ca同位素组成还可以指示源区中的碳酸盐，而Ti同位素与SiO_2的关系可以用来区分岩浆是钙碱性还是拉斑质的。另外，除Ti同位素比较稳定外，其他同位素体系在后期变质或风化等过程中都会不可避免地

受到改造，因此在应用这些示踪工具时必须十分慎重地剔除后期改造的影响。

6.2　大数据与人工智能的应用

近年来，随着锆石年代学和地球化学全球数据库的积累，应用大数据的方法研究大陆地壳生长和板块构造启动成为 1 个新的研究领域（图 6）。Dhuime et al.（2012）通过对全球岩石与同位素数据库的分析，发现约 3.0 Ga 左右新生地壳由较薄的镁铁质转向更厚的硅铝质，并将这一变化与板块构造的启动联系起来（Dhuime et al., 2012）。进一步的工作通过统计火成岩 Rb/Sr 比值（Dhuime et al., 2015）和沉积物的 Ni/Co 与 Cr/Zn 比值（Tang et al., 2016），强化了 3.0 Ga 为地球动力学转折点的观点。而基于全球火成岩地球化学数据库的统计研究则揭示了约 2.5 Ga 出现的全球性地壳–岩石圈演化转折（Keller and Schoene, 2012），表现为多种元素和元素比值的突变，这可能标志着构造体制的系统性变化，即全球尺度的板块构造在此时启动。

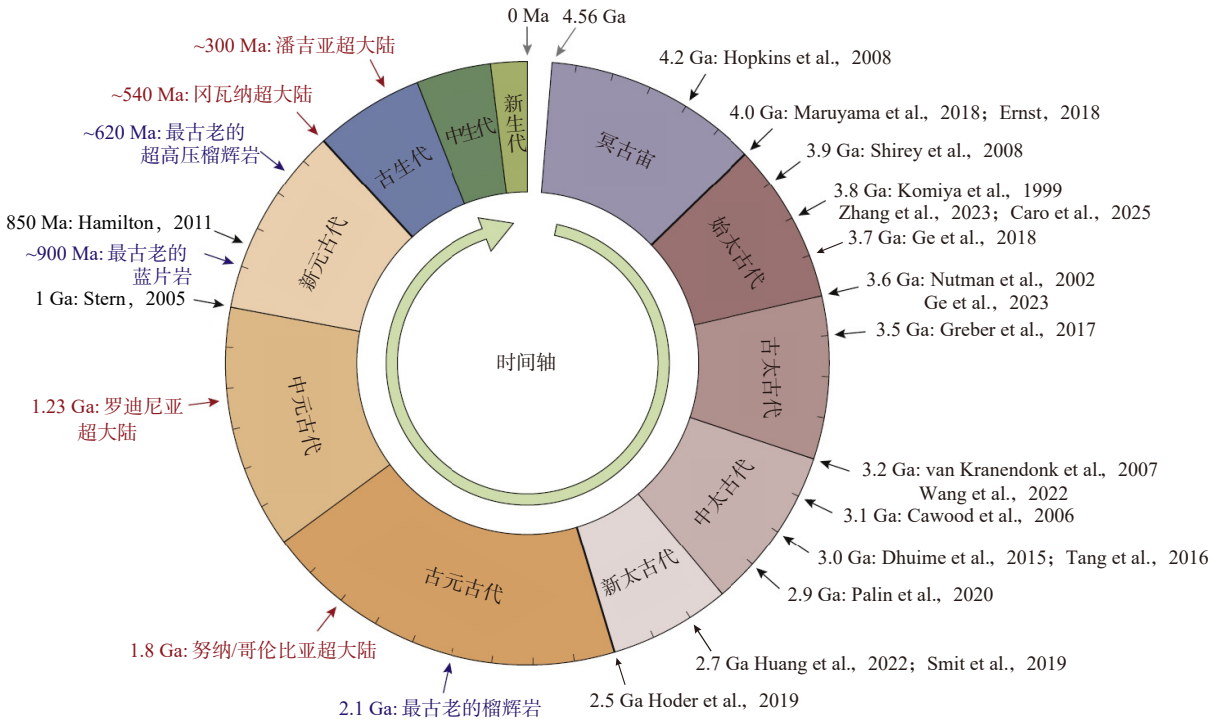


图 6　关于板块构造启动时间的不同认识（据 Palin et al.，2020 修改）

Fig. 6　Different perspectives on the timing of plate tectonic onset (modified from Palin et al., 2020)

在大陆生长节律方面，Garçon（2021）利用碎屑沉积岩 Sm-Nd 同位素数据，提出大陆生长并非持续线性，而是以约 0.5～0.7 Ga 为周期的幕式事件。这种周期性可能与板块速率与俯冲强度的变化相关（Garçon, 2021）。Reimink et al.（2021）基于全球碎屑锆石统计的研究也支持这样的结论。从全岩石圈的角度，Reimink et al.（2023）综合碎屑锆石 Hf 同位素和火成岩主量元素，提出再造作用对陆壳形成至关重要（尤其是早期），且推断陆壳的高速生长从 3.5 Ga 持续至 1.0 Ga（Reimink et al., 2023）。

在冥古宙时期，由于岩石和矿物的记录极其稀少，以机器学习为代表的人工智能手段开始得到应用，为从有限的样本中获取更多关于早期地球的认识。通过对锆石与其寄主岩的大型数据集的训练可以对锆石微量元素与其寄主岩的主微量元素之间的相关性进行定量，进而能够利用 Jack Hills 锆石推测冥古宙大陆地壳的化学成分（Lu et al., 2025）。该研究表明，冥古宙大陆地壳属于长英质，包括 TTG 与 K 质花岗岩，后者代表成熟的大陆地壳。对锆石数据集的训练还可以识别出 I 型和 S 型的锆石（分别对应 I 型和 S 型花岗岩），以推测其形成的构造背景。研究发现冥古宙的 Jack Hills 锆石中有相当一部分属于 S 型锆石，说明与俯冲相关的地表物质和沉积物循环早在冥古宙就已存在（Chen et al., 2023; Jiang et al., 2024）。

综合来看，以上研究通过大数据和人工智能驱

动的方法从不同角度揭示了大陆地壳形成生长与板块构造演化的关键节点。而随着数据集的扩充和技术手段的优化，未来有望获得更多关于早期大陆地壳演化的信息（图6）。

7 TTG成因和板块构造研究的新挑战

7.1 多成因模型并存与划分

毫无疑问，太古宙的花岗质岩石以TTG为特色本身就说明这些岩石的成因与早期特殊的物理化学条件有关。结合实验岩石学资料和地球化学分析和模拟等大量研究来看，TTG的形成有几个方面已形成了共识：①首先需要1个水化的玄武质岩石作为源区，该源区的熔融可以形成钠质的花岗岩，其地球化学特征显著受源区残留矿物相（如石榴子石、角闪石、斜长石）组成的控制；②该镁铁质源区可能在部分熔融之前经历过低温或高温热液蚀变，也即早期的镁铁质岩的蚀变作用可能是造成熔融出来的TTG成分差异的原因之一；③TTG的成分随着时间演进，到新太古代时期越来越多的TTG岩石的锆石$\delta^{18}O$值高于地幔值，即有越来越多的表壳物质加入TTG的源区之中，意味着地壳物质的深循环；④TTG岩浆本身也可以发生一定程度的结晶分异，这个过程会加剧TTG成分的多样性，因此在利用全岩成分反演源区熔融条件时，必须评估并排除分离结晶的影响。

尽管人们都希望能有统一的模型来解释TTG的成因，但就像显生宙的花岗岩也有多种成因一样，TTG的成因也不能一概而论。越来越多的证据表明，TTG并不是单一机制的产物，不同地区的TTG可能来源于不同的源区（即源区水化玄武质岩石的成分有差异）（Huang et al., 2025; Xiong et al., 2025; Zhang et al., 2025; Zhao et al., 2025），形成于不同的构造环境（Cawood et al., 2022）。甚至同一克拉通内部（如华北克拉通的东部地块与横贯华北造山带）也可能存在形成机制各异的TTG（Zhao et al., 2025）。这提示研究中需要放弃“非此即彼”的简单二元思维，转而接受多机制并存的复杂模型，并发展新的判别指标以区分不同成因类型的TTG。在此基础上，如何利用现在积累越来越多的岩石地球化学大数据，结合不同的源区和构造背景来对TTG的成因类型进行新的分类，可能是未来的工作方向之一。

此外，关于TTG的源区性质、源区水的来源、如何准确识别原始岩浆成分、如何限定TTG形成的构造背景等问题仍存争议。这些问题为深入研究TTG指明了未来的主要工作方向，也将对深入理解早期大陆形成和演化具有重要意义。

7.2 地球化学指标的确定与有效性

与前述成因类型的争议相关联的，TTG研究中另1个重要挑战是地球化学指标的有效性问题。传统的地球化学判别图解（如Sr/Y–Y、La/Yb–Yb）建立在岩浆未经历显著分异的前提下，但晶粥理论则表明TTG可能如同显生宙花岗岩浆一样经历了复杂的晶体–熔体分离过程，这使得全岩地球化学成分的构造指示意义变得复杂和不确定。例如，高压型TTG的高Sr/Y特征既可能反映深部熔融（Moyen, 2011），也可能由斜长石堆晶或副矿物的不均匀分布导致（Kendrick et al., 2022; Ding et al., 2024）。解决这一挑战需要发展能够识别岩浆分异作用的新指标，并结合岩石学观察进行综合判断。

另外，TTG同位素地球化学特征的解耦性也值得关注。在利用稳定同位素示踪TTG源区时，性质相近的同位素体系可能出现不一致的行为。例如，遭受海水低温蚀变的玄武岩通常具有重Si、O同位素组成（Trail et al., 2018）。由于部分熔融和结晶分异过程对锆石Si、O同位素分馏影响极小，源区特征可被TTG继承，从而表现出Si-O耦合的现象，例如在Acasta片麻岩中观察到的那样（Zhang et al., 2023a）。然而，南非Barberton花岗绿岩带却出现Si-O解耦的例外情况，这一现象被解释为源区流体性质变化所致（Lei et al., 2023）。放射性同位素体系（如Hf-Nd）的解耦则更为普遍，并不限于早期地球的TTG研究，这通常被归因于元素地球化学行为及其对变质作用响应程度的差异。对于TTG这样的地球早期代表性花岗质岩石，其同位素的解耦很可能反映了地球早期表面环境的变化和早期的壳幔物质循环过程，也可能与板块构造有关。

识别可靠的地球化学指标、解析同位素的解耦，其根本还是在于对原始岩浆成分的识别。花岗质岩浆由于其相对于镁铁质岩浆温度低、黏度大、挥发分多，在地壳中的存留时间长，一是可能本身经历了相对长的岩浆分异过程从而导致不同层位或部位的岩浆成分有变化；二是深部镁铁质或长英质岩浆的底部加热或直接灌入到岩浆体系中，导致

前期刚结晶或待结晶的熔体再活化，从而形成不同熔体的混合而导致成分变化；三是岩浆的上侵过程可能会混染围岩物质，野外也常见到 TTG 中有非常细小的斜长角闪岩的包体。尽管这些因素都使得 TTG 成因的研究更加复杂，但不可否认的是，TTG 区别于其他类型花岗岩的特征还是比较明显的。在此基础上，利用大量已有的数据资料对单一岩体的平均成分进行估计，以岩体为单位统计 TTG 成分随着时间的变化，或许可以对早期构造转换与大陆成分转变等问题提供参考。

7.3　TTG 形成与早期地球环境的协同演变

TTG 成因的研究要回归到研究早期大陆形成–演化及相关的地球早期环境上来。最早的 TTG 形成于 4.02 Ga，此时是否有大陆浮出水面尚不清楚，而生命还未出现，且表层的地球环境也与现今有很大不同。有研究表明，3.2 ～2.8 Ga 这段时间内大陆逐渐浮出水面（Eriksson et al., 1994; Mukhopadhyay et al., 2014; Reimink et al., 2021; Heard et al., 2021; Chowdhury et al., 2025），而板块构造如何在早期环境中启动更是存在很大争议（Zheng and Zhao, 2020; 郑永飞, 2023, 2024; Turner et al., 2025; Zheng, 2025）。TTG 虽然形成于地壳深部，但由于其继承了源区地壳的信息，同时也记录了早期地壳成分的变化和深部幔–壳的物质、能量的交换。地表物质经过俯冲或凹陷等方式进入到深部地壳，可作为 TTG 的部分源区（Deng et al., 2019; Wang et al., 2022）；而 TTG 形成后又在侵位过程中混染地壳物质，并在就位时烘烤围岩和释放流体。目前观察到的 TTG 几乎占到早期陆壳岩石的 70% 甚至更多（Moyen, 2011），这里面有 2 个重要的问题值得关注。①产生大量 TTG 的同时势必在深部地壳产生更大体量的残留体（Moyen and Martin, 2012），这些物质不管是继续留在地壳深部还是拆沉到地幔之中，都会对地壳的分异和壳幔物质循环产生很大影响；②大量 TTG 的形成反映了巨大的岩浆通量，这会对当时的环境产生一定的影响，尤其是当构成火山–侵入杂岩系统时更会如此。从这个角度上来说，寻找早期的酸性火山岩（有些可能会在后期构造过程中变质）（Smithies et al., 2007; Kröner et al., 2013; Laurent et al., 2020）并与 TTG 成分进行对比研究，分析早期 TTG 的碳通量，研究 TTG 形成与早期海水和大气成分变化之间的联系等，也是未来的重要研究方向。

8　结束语

总体而言，地球早期的地幔温度更高、岩石圈更薄、地壳更厚，整体热状态与现今存在显著差异，这种独特性使得直接运用现代板块构造模型解释 TTG 成因面临根本性挑战。在运用“将今论古”原则研究早期地球时，必须审慎考虑这些独特的地球化学背景与构造条件。同时，太古宙历时漫长，地球热状态与构造体制处于演变之中，TTG 可能具有多成因性，不同时期和地区的 TTG 可能形成于不同的动力学机制。因此，有必要发展更符合早期地球条件的动力学模型，充分考虑高地温梯度、幕式构造–岩浆活动、早期地表条件（如海水成分、大气组成）的差异以及多种构造机制（如俯冲、地幔柱凹陷）和复杂岩浆过程可能共存的情形。当前，关于 TTG 的源区性质、源区水的来源、如何准确识别原始岩浆成分、如何限定 TTG 形成的构造背景等问题仍存争议，针对典型地区进行精细解剖和示踪可能是 1 个有效的途径。面向未来，TTG 研究需要更深入的多学科整合，结合野外地质、岩石学、地球化学、数值模拟和实验研究等多种手段。特别需要加强的是将微观尺度上的矿物学研究与宏观尺度上的地球物理和地球动力学模拟相结合，发展能够识别和量化岩浆分异作用的新方法，建立从源区到最终就位的完整模型。总之，TTG 作为早期大陆地壳的主要组成部分，其成因研究直接关系到对地球早期演化历史的理解。通过揭示 TTG 的形成机制，可以更准确地重建早期地球的热状态、构造体制和地表环境演变，更深入地理解早期大陆形成–演化过程和机制，进而回答诸如为什么地球是太阳系中唯一具有发达大陆地壳的行星，以及大陆地壳如何影响行星的宜居性等基本问题。

致谢：本工作得到了国家自然科学基金委“杰出青年科学基金”项目（42025202）的支持。本文的完成过程中得到了邓军院士的鼓励和郑永飞院士的指导与帮助，特致谢意！

References

AARONS S M, REIMINK J R, GREBER N D, et al., 2020. Titanium isotopes constrain a magmatic transition at the Hadean-Archean boundary in the Acasta Gneiss Complex[J]. Science Advances, 6(50): eabc9959.

ANDRÉ L, ABRAHAM K, HOFMANN A, et al., 2019. Early continental crust generated by reworking of basalts variably silicified by seawater[J].

Nature Geoscience, 12(9): 769-773.

ANTONELLI M A, KENDRICK J, YAKYMCHUK C, et al., 2021. Calcium isotope evidence for early Archaean carbonates and subduction of oceanic crust[J]. Nature Communications, 12(1): 2534.

ARTH J G, HANSON G N, 1975. Geochemistry and origin of the early Precambrian crust of northeastern Minnesota[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 39(3): 325-362.

ARTH J G, BARKER F, PETERMAN Z E, et al., 1978. Geochemistry of the gabbro—diorite—tonalite—trondhjemite suite of southwest Finland and its implications for the origin of tonalitic and trondhjemitic magmas[J]. Journal of Petrology, 19(2): 289-316.

ARTH J G, 1979. Chapter 3-Some trace elements in trondhjemites-their implications to magma genesis and paleotectonic setting[J]. Developments in Petrology, 6: 123-132.

BACHMANN O, HUBER C, 2016. Silicic magma reservoirs in the Earth's crust[J]. American Mineralogist, 101(11): 2377-2404.

BARKER F, 1979. Chapter 1-trondhjemite: definition, environment and hypotheses of origin[J]. Developments in Petrology, 6: 1-12.

BENN K, MOYEN J F, 2008. The Late Archean Abitibi-Opatica terrane, Superior Province: A modified oceanic plateau[J]. Geological Society of America Special Papers, 440: 173-197.

BYERLY G R, LOWE D R, HEUBECK C, 2019. Chapter 24-geologic evolution of the Barberton greenstone belt—a unique record of crustal development, surface processes, and early life 3.55-3.20 Ga[M]//VAN KRANENDONK M J, BENNETT V C, HOFFMANN J E. Earth's oldest rocks. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier: 569-613.

CAPITANIO F A, NEBEL O, CAWOOD P A, et al., 2019. Reconciling thermal regimes and tectonics of the early Earth[J]. Geology, 47(10): 923-927.

CAWOOD P A, CHOWDHURY P, MULDER J A, et al., 2022. Secular evolution of continents and the Earth system[J]. Reviews of Geophysics, 60(4): e2022RG000789.

CHAMPION D C, SMITHIES R H, 2007. Chapter 4.3-Geochemistry of paleoarchean granites of the East Pilbara Terrane, Pilbara Craton, Western Australia: implications for early Archean crustal growth[J]. Developments in Precambrian Geology, 15: 369-409.

CHEN G X, KUSKY T, LUO L, et al., 2023. Hadean tectonics: insights from machine learning[J]. Geology, 51(8): 718-722.

CHEN H, LIU X M, WANG K, 2020. Potassium isotope fractionation during chemical weathering of basalts[J]. Earth and Planetary Science Letters, 539: 116192.

CHOWDHURY P, CAWOOD P A, MULDER J A, 2025. Subaerial emergence of continents on Archean Earth[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 53: 443-478.

CONDIE K C, 2005. TTGs and adakites: are they both slab melts?[J]. Lithos, 80(1-4): 33-44.

CONNOLLY J A D, PETRINI K, 2002. An automated strategy for calculation of phase diagram sections and retrieval of rock properties as a function of physical conditions[J]. Journal of Metamorphic Geology, 20(7): 697-708.

DE CAPITANI C, BROWN T H, 1987. The computation of chemical equilibrium in complex systems containing non-ideal solutions[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 51(10): 2639-2652.

DE CAPITANI C, PETRAKAKIS K, 2010. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software[J]. American Mineralogist, 95(7): 1006-1016.

DENG Z B, CHAUSSIDON M, GUITREAU M, et al., 2019. An oceanic subduction origin for Archaean granitoids revealed by silicon isotopes[J]. Nature Geoscience, 12(9): 774-778.

DESSIMOZ M, MÜNTENER O, ULMER P, 2012. A case for hornblende dominated fractionation of arc magmas: the Chelan Complex (Washington Cascades)[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 163(4): 567-589.

DHUIME B, HAWKESWORTH C J, CAWOOD P A, et al., 2012. A change in the geodynamics of continental growth 3 billion years ago[J]. Science, 335(6074): 1334-1336.

DHUIME B, WUESTEFELD A, HAWKESWORTH C J, 2015. Emergence of modern continental crust about 3 billion years ago[J]. Nature Geoscience, 8(7): 552-555.

DING N, HAWKESWORTH C, WANG X L, et al., 2025. Tectonic thickening in stagnant to mobile lid transition facilitated the stabilization of Archean cratons[J]. Chemical Geology, 696: 123093.

DING N, WANG X L, DU D H, et al. , 2024. Compositional diversity of TTGs controlled by heterogeneous accumulation of accessory minerals[J]. Lithos, 482-483: 107718.

DOUCET L S, LAURENT O, IONOV D A, et al., 2020. Archean lithospheric differentiation: insights from Fe and Zn isotopes[J]. Geology, 48(10): 1028-1032.

ERIKSSON K A, KRAPEZ B, FRALICK P W, 1994. Sedimentology of Archean greenstone belts: signatures of tectonic evolution[J]. Earth-Science Reviews, 37(1-2): 1-88.

FOLEY B J, 2024. Generation of Archean TTGs via sluggish subduction[J]. Geology, 52(9): 656-660.

GARÇON M, 2021. Episodic growth of felsic continents in the past 3.7 Ga[J]. Science Advances, 7(39): eabj1807.

GE R F, ZHU W B, WILDE S A, et al., 2018. Remnants of Eoarchean continental crust derived from a subducted proto-arc[J]. Science Advances, 4(2): eaao3159.

GE R F, WILDE S A, ZHU W B, et al., 2023. Earth's early continental crust formed from wet and oxidizing arc magmas[J]. Nature, 623(7986): 334-339.

GOUMANS J, SMIT M A, MUSIYACHENKO K A, et al., 2025. Boron isotopes trace an increase in subduction-driven recycling of fluid-mobile elements in the Neoarchean[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 408: 1-11.

HARTNADY M I H, JOHNSON T E, SCHORN S, et al., 2022. Fluid processes in the early Earth and the growth of continents[J]. Earth and Planetary Science Letters, 594: 117695.

HASTIE A R, FITTON J G, BROMILEY G D, et al., 2016. The origin of Earth's first continents and the onset of plate tectonics[J]. Geology, 44(10): 855-858.

HASTIE A R, LAW S, BROMILEY G D, et al., 2023. Deep formation of Earth's earliest continental crust consistent with subduction[J]. Nature Geoscience, 16(9): 816-821.

HEARD A W, AARONS S M, HOFMANN A, et al., 2021. Anoxic continental surface weathering recorded by the 2.95 Ga Denny Dalton Paleosol (Pongola Supergroup, South Africa)[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 295: 1-23.

HERZBERG C, CONDIE K, KORENAGA J, 2010. Thermal history of the Earth and its petrological expression[J]. Earth and Planetary Science Letters, 292(1-2): 79-88.

HOARE L, RZEHAK L J A, KOMMESCHER S, et al., 2023. Titanium isotope constraints on the mafic sources and geodynamic origins of Archean crust[J]. Geochemical Perspectives Letters, 28: 37-42.

HU Y, TENG F Z, PLANK T, et al., 2020. Potassium isotopic heterogeneity in subducting oceanic plates[J]. Science Advances, 6(49): eabb2472.

HU Y, TENG F Z, HELZ R T, et al., 2021. Potassium isotope fractionation during magmatic differentiation and the composition of the mantle[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(3): e2020JB021543.

HUANG G Y, MITCHELL R N, PALIN R M, et al., 2025. Modelling partial melting in sinking greenstone belts with implications for Archaean continental crust formation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 130(4): e2024JB030204.

HUANG T Y, TENG F Z, RUDNICK R L, et al., 2020. Heterogeneous potassium isotopic composition of the upper continental crust[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 278: 122-136.

JAGOUTZ O, SCHMIDT M W, ENGGIST A, et al., 2013. TTG-type plutonic rocks formed in a modern arc batholith by hydrous fractionation in the lower arc crust[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 166(4): 1099-1118.

JAHN B M, GLIKSON A Y, PEUCAT J J, et al., 1981. REE geochemistry and isotopic data of Archean silicic volcanics and granitoids from the Pilbara Block, Western Australia: implications for the early crustal evolution[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 45(9): 1633-1652.

JAHN B M, VIDAL P, KRÖNER A, 1984. Multi-chronometric ages and origin of Archaean tonalitic gneisses in Finnish Lapland: a case for long crustal residence time[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 86(4): 398-408.

JIANG J L, ZOU X Y, MITCHELL R N, et al., 2024. Sediment subduction in Hadean revealed by machine learning[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 121(30): e2405160121.

JOHNSON T E, BROWN M, KAUS B J P, et al., 2014. Delamination and recycling of Archaean crust caused by gravitational instabilities[J]. Nature Geoscience, 7(1): 47-52.

JOHNSON T E, BROWN M, GARDINER N J, et al., 2017. Earth's first stable continents did not form by subduction[J]. Nature, 543(7644): 239-242.

JOHNSON T E, GARDINER N J, MILJKOVIĆ K, et al., 2018. An impact melt origin for Earth's oldest known evolved rocks[J]. Nature Geoscience, 11(10): 795-799.

KELLER C B, SCHOENE B, 2012. Statistical geochemistry reveals disruption in secular lithospheric evolution about 2.5 Gyr ago[J]. Nature, 485(7399): 490-493.

KENDRICK J, DUGUET M, YAKYMCHUK C, 2022. Diversification of Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite suites in a mushy middle crust[J]. Geology, 50(1): 76-80.

KIRKLAND C L, JOHNSON T E, BROWN M, et al., 2025. The evolution of Earth's early continental crust[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 6(9): 612-625.

KLEINHANNS I C, KRAMERS J D, KAMBER B S, 2003. Importance of water for Archaean granitoid petrology: a comparative study of TTG and potassic granitoids from Barberton Mountain Land, South Africa[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 145(3): 377-389.

KRÖNER A, ELIS HOFFMANN J, XIE H Q, et al., 2013. Generation of early Archaean felsic greenstone volcanic rocks through crustal melting in the Kaapvaal, craton, southern Africa[J]. Earth and Planetary Science Letters, 381: 188-197.

LAURENT O, MARTIN H, MOYEN J F, et al., 2014. The diversity and evolution of late-Archean granitoids: evidence for the onset of "modern-style" plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga[J]. Lithos, 205: 208-235.

LAURENT O, BJÖRNSEN J, WOTZLAW J F, et al., 2020. Earth's earliest granitoids are crystal-rich magma reservoirs tapped by silicic eruptions[J]. Nature Geoscience, 13(2): 163-169.

LAURENT O, GUITREAU M, BRUAND E, et al., 2024. At the dawn of continents: Archean tonalite-trondhjemite-granodiorite suites[J]. Elements, 20(3): 174-179.

LAURIE A, STEVENS G, 2012. Water-present eclogite melting to produce Earth's early felsic crust[J]. Chemical Geology, 314-317: 83-95.

LEI K, WANG H, WANG X L, et al., 2023. Decoupled zircon Si–O isotopes tracing the supracrustal silicification and komatiitic-derived fluids in the source of TTGs[J]. Geophysical Research Letters, 50(16): e2023GL104002.

LI W S, LIU X M, WANG K, et al., 2022. Potassium isotope signatures in modern marine sediments: insights into early diagenesis[J]. Earth and Planetary Science Letters, 599: 117849.

LIOU P, GUO J H, 2019. Generation of Archaean TTG gneisses through amphibole-dominated fractionation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124(4): 3605-3619.

LIOU P, WANG Z C, MITCHELL R N, et al., 2022. Fe isotopic evidence that "high pressure" TTGs formed at low pressure[J]. Earth and Planetary Science Letters, 592: 117645.

LIU B, MA J X, LI P F, et al., 2025. First boron isotopes in the southern Jilin TTG series uncover a Neoarchean oceanic arc in the eastern North China Craton[J]. Gondwana Research, 139: 243-259.

LIU H Y, XUE Y Y, ZHANG G L, et al., 2021. Potassium isotopic composition of low-temperature altered oceanic crust and its impact on the global K cycle[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 311: 59-73.

LIU Y D, GUO Z X, TIAN H C, et al., 2023. Potassium isotopic fractionation during multistage alteration of oceanic crust in the southern Mariana Trench[J]. Chemical Geology, 620: 121350.

LIU Y S, HE D T, CHEN K, et al., 2025. Top-down water enrichment caused by the proto-crust thickening triggered the first TTG formation[J]. Science Bulletin, 70(21): 3557-3565. (in Chinese with English abstract)

LONG X P, ZHAO G C, ZHAI M G, et al., 2024. Research progresses and key scientific issues of pre-plate tectonics and origin of continents[J]. Chinese Science Bulletin, 69(12): 1572-1585. (in Chinese with English abstract)

LU D G, LIU J, XIA Q K, et al., 2025. Earth's Hadean crust formed via operation of convergent tectonics[J]. National Science Review, 12(8): nwaf230.

MARTIN E, SIGMARSSON O, 2007. Low-pressure differentiation of tholeiitic lavas as recorded in segregation veins from Reykjanes (Iceland), Lanzarote (Canary Islands) and Masaya (Nicaragua)[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 154(5): 559-573.

MARTIN H, CHAUVEL C, JAHN B M, 1983. Major and trace element geochemistry and crustal evolution of Archaean granodioritic rocks from eastern Finland[J]. Precambrian Research, 21(3-4): 159-180.

MARTIN H, 1994. Chapter 6-The Archean grey gneisses and the genesis of continental crust[J]. Developments in Precambrian Geology, 11: 205-259.

MARTIN H, SMITHIES R H, RAPP R, et al., 2005. An overview of Adakite, Tonalite–Trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution[J]. Lithos, 79(1-2): 1-24.

MATHIEU L, 2022. Modeling the chemical heterogeneity of tonalite-trondhjemite-granodiorite intrusive suites[J]. Lithos, 422-423: 106744.

MOORBATH S, 1975. Evolution of Precambrian crust from strontium isotopic evidence[J]. Nature, 254(5499): 395-398.

MOYEN J F, STEVENS G, 2006. Experimental constraints on TTG petrogenesis: implications for Archean geodynamics[M]//BENN K, MARESCHAL J C, CONDIE K C. Archean geodynamics and environments. Washington: American Geophysical Union: 149-175.

MOYEN J F, 2011. The composite Archaean grey gneisses: petrological significance, and evidence for a non-unique tectonic setting for Archaean crustal growth[J]. Lithos, 123(1-4): 21-36.

MOYEN J F, MARTIN H, 2012. Forty years of TTG research[J]. Lithos, 148: 312-336.

MOYEN J F, van HUNEN J, 2012. Short-term episodicity of Archaean plate tectonics[J]. Geology, 40(5): 451-454.

MOYEN J F, LAURENT O, 2018. Archaean tectonic systems: a view from igneous rocks[J]. Lithos, 302-303: 99-125.

MUKHOPADHYAY J, CROWLEY Q G, GHOSH S, et al., 2014. Oxygenation of the Archean atmosphere: new paleosol constraints from eastern India[J]. Geology, 42(10): 923-926.

NÆRAA T, SCHERSTÉN A, ROSING M T, et al., 2012. Hafnium isotope evidence for a transition in the dynamics of continental growth 3.2 Gyr ago[J]. Nature, 485(7400): 627-630.

NAGEL T J, HOFFMANN J E, MÜNKER C, 2012. Generation of Eoarchean tonalite-trondhjemite-granodiorite series from thickened mafic arc crust[J]. Geology, 40(4): 375-378.

PALIN R M, WHITE R W, GREEN E C R, 2016. Partial melting of metabasic rocks and the generation of tonalitic–trondhjemitic–granodioritic (TTG) crust in the Archaean: constraints from phase equilibrium modelling[J]. Precambrian Research, 287: 73-90.

PALIN R M, SANTOSH M, CAO W T, et al., 2020. Secular change and the onset of plate tectonics on Earth[J]. Earth-Science Reviews, 207: 103172.

PETERMAN Z E, BARKER F, 1976. Rb-Sr whole-rock age of trondhjemites and related rocks of the southwestern Trondheim region, Norway[R]. Open-File Report 76-670, Washington: U. S. Geological Survey.

POWELL R, HOLLAND T J B, 1988. An internally consistent dataset with uncertainties and correlations: 3. Applications to geobarometry, worked examples and a computer program[J]. Journal of Metamorphic Geology, 6(2): 173-204.

POWELL R, HOLLAND T, WORLEY B, 1998. Calculating phase diagrams involving solid solutions via non-linear equations, with examples using THERMOCALC[J]. Journal of Metamorphic Geology, 16(4): 577-588.

POWELL R, HOLLAND T J B, 2008. On thermobarometry[J]. Journal of Metamorphic Geology, 26(2): 155-179.

QIAN Q, HERMANN J, 2013. Partial melting of lower crust at 10-15 kbar: constraints on adakite and TTG formation[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 165(6): 1195-1224.

RAPP R P, NORMAN M D, LAPORTE D, et al., 2010. Continent formation in the Archean and chemical evolution of the cratonic lithosphere: melt–rock reaction experiments at 3-4 GPa and petrogenesis of Archean Mg-diorites (sanukitoids)[J]. Journal of Petrology, 51(6): 1237-1266.

REIMINK J R, DAVIES J H F L, IELPI A, 2021. Global zircon analysis records a gradual rise of continental crust throughout the Neoarchean[J]. Earth and Planetary Science Letters, 554: 116654.

REIMINK J R, DAVIES J H F L, MOYEN J F, et al., 2023. A whole-lithosphere view of continental growth[J]. Geochemical Perspectives Letters, 26: 45-49.

RICHARDS J P, KERRICH R, 2007. Special Paper: adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis[J]. Economic Geology, 102(4): 537-576.

ROBERTS N M W, SANTOSH M, 2018. Capturing the mesoarchean emergence of continental crust in the Coorg Block, southern India[J]. Geophysical Research Letters, 45(15): 7444-7453.

ROLLINSON H, MARTIN H, 2005. Geodynamic controls on adakite, TTG and sanukitoid genesis: implications for models of crust formation: introduction to the Special Issue[J]. Lithos, 79(1-2): ix-xii.

ROMAN A, ARNDT N, 2020. Differentiated Archean oceanic crust: its thermal structure, mechanical stability and a test of the sagduction hypothesis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 278: 65-77.

ROZEL A B, GOLABEK G J, JAIN C, et al., 2017. Continental crust formation on early Earth controlled by intrusive magmatism[J]. Nature, 545(7654): 332-335.

SANTIAGO RAMOS D P, COOGAN L A, MURPHY J G, et al., 2020. Low-temperature oceanic crust alteration and the isotopic budgets of potassium and magnesium in seawater[J]. Earth and Planetary Science Letters, 541: 116290.

SAVAGE P S, GEORG R B, WILLIAMS H M, et al., 2011. Silicon isotope fractionation during magmatic differentiation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 75(20): 6124-6139.

SIZOVA E, GERYA T, STÜWE K, et al., 2015. Generation of felsic crust in the Archean: a geodynamic modeling perspective[J]. Precambrian Research, 271: 198-224.

SMIT M A, SCHERSTÉN A, NÆRAA T, et al., 2019. Formation of Archean continental crust constrained by boron isotopes[J]. Geochemical Perspectives Letters, 12: 23-26.

SMITH T E, CHOUDHRY A G, HUANG C H, 1983. The geochemistry and petrogenesis of the Archean Gamitagama Lake igneous complex, south-

ern Superior province[J]. Precambrian Research, 22(3-4): 219-244.

SMITHIES R H, CHAMPION D C, VAN KRANENDONK M J, 2007. Chapter 4.2 The oldest well-preserved felsic volcanic rocks on earth: geochemical clues to the early evolution of the Pilbara supergroup and implications for the growth of a Paleoarchean protocontinent[J]. Developments in Precambrian Geology, 15: 339-367.

SMITHIES R H, CHAMPION D C, VAN KRANENDONK M J, 2009. Formation of Paleoarchean continental crust through infracrustal melting of enriched basalt[J]. Earth and Planetary Science Letters, 281(3-4): 298-306.

SMITHIES R H, LU Y J, JOHNSON T E, et al., 2019. No evidence for high-pressure melting of Earth's crust in the Archean[J]. Nature Communications, 10(1): 5559.

SMITHIES R H, LU Y J, KIRKLAND C L, et al., 2021. Oxygen isotopes trace the origins of Earth's earliest continental crust[J]. Nature, 592(7852): 70-75.

SPRINGER W, SECK H A, 1997. Partial fusion of basic granulites at 5 to 15 kbar: implications for the origin of TTG magmas[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 127(1-2): 30-45.

SUN Y, TENG F Z, HU Y, et al., 2020. Tracing subducted oceanic slabs in the mantle by using potassium isotopes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 278: 353-360.

TAMBLYN R, HERMANN J, HASTEROK D, et al., 2023. Hydrated komatiites as a source of water for TTG formation in the Archean[J]. Earth and Planetary Science Letters, 603: 117982.

TANG M, CHEN K, RUDNICK R L, 2016. Archean upper crust transition from mafic to felsic marks the onset of plate tectonics[J]. Science, 351(6271): 372-375.

TENG F Z, HU Y, MA J L, et al., 2020. Potassium isotope fractionation during continental weathering and implications for global K isotopic balance[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 278: 261-271.

TRAIL D, BOEHNKE P, SAVAGE P S, et al., 2018. Origin and significance of Si and O isotope heterogeneities in Phanerozoic, Archean, and Hadean zircon[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 115(41): 10287-10292.

TULLER-ROSS B, SAVAGE P S, CHEN H, et al., 2019. Potassium isotope fractionation during magmatic differentiation of basalt to rhyolite[J]. Chemical Geology, 525: 37-45.

TURNER S, WOOD B, JOHNSON T, et al., 2025. Formation and composition of Earth's Hadean protocrust[J]. Nature, 640(8058): 390-394.

VAN KRANENDONK M J, KIRKLAND C L, CLIFF J, 2015. Oxygen isotopes in Pilbara Craton zircons support a global increase in crustal recycling at 3.2 Ga[J]. Lithos, 228-229: 90-98.

VANDENBURG E D, NEBEL O, SMITHIES R H, et al., 2023. Spatial and temporal control of Archean tectonomagmatic regimes[J]. Earth-Science Reviews, 241: 104417.

WANG X L, TANG M, MOYEN J, et al., 2022. The onset of deep recycling of supracrustal materials at the Paleo-Mesoarchean boundary[J]. National Science Review, 9(3): nwab136.

WEI C J, GUAN X, DONG J, 2017. HT-UHT metamorphism of metabasites and the petrogenesis of TTGs[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(5): 1381-1404. (in Chinese with English abstract)

WU Z Q, ZHAO G C, 2022. Hydrous plumes in the Archean and the origin of continents[J]. Science Bulletin, 67(20): 2023-2025.

WU Z Q, SONG J, ZHAO G C, et al., 2023. Water-induced mantle overturns leading to the origins of Archean continents and subcontinental lithospheric mantle[J]. Geophysical Research Letters, 50(22): e2023GL105178.

WU Z Q, 2024. Water induced mantle overturn and origin of the Archean crust[J]. Advances in Earth Science, 39(6): 551-564. (in Chinese with English abstract)

XIANG H, CONNOLLY J A D, 2022. GeoPS: an interactive visual computing tool for thermodynamic modelling of phase equilibria[J]. Journal of Metamorphic Geology, 40(2): 243-255.

XIONG D Y, WANG X L, LI W, et al., 2025. Potassium isotope evidence for origin of Archean TTG rocks from seawater-hydrothermally altered oceanic crust[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 26(1): e2024GC011892.

XIONG X L, KEPPLER H, AUDÉTAT A, et al., 2009. Experimental constraints on rutile saturation during partial melting of metabasalt at the amphibolite to eclogite transition, with applications to TTG genesis[J]. American Mineralogist, 94(8-9): 1175-1186.

YANG W, TENG F Z, LI W Y, et al., 2016. Magnesium isotopic composition of the deep continental crust[J]. American Mineralogist, 101(2): 243-252.

YU C Y, YANG T, ZHANG J, et al., 2022. Coexisting diverse *P*–*T*–*t* paths during Neoarchean Sagduction: insights from numerical modeling and applications to the eastern North China Craton[J]. Earth and Planetary Science Letters, 586: 117529.

ZHAI M G, ZHANG Q, CHEN G N, et al., 2016. Adventure on the research of continental evolution and related granite geochemistry[J]. Chinese Science Bulletin, 61(13): 1414-1420. (in Chinese with English abstract)

ZHAI M G, PENG P, 2020. Origin of early continents and beginning of plate tectonics[J]. Science Bulletin, 65(12): 970-973.

ZHAI M G, ZHAO L, ZHU X Y, et al., 2020. Review and overview for the frontier hotspot: early continents and start of plate tectonics[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(8): 2249-2275. (in Chinese with English abstract)

ZHANG C Z, ZHANG Q, JIN W J, et al., 2018. Can Archean TTG compare with Adakite? Global data gives results[J]. Chinese Journal of Geology, 53(4): 1254-1266. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Q, ZHAI M G, 2012. What is the Archean TTG?[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(11): 3446-3456. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Q, ZHAO L, ZHOU D W, et al., 2023a. No evidence of supracrustal recycling in Si-O isotopes of Earth's oldest rocks 4 Ga ago[J]. Science Advances, 9(26): eadf0693.

ZHANG S B, ZHANG L, YAO X Y, et al., 2025. Formation of early continental crust by remelting of hydrothermally altered oceanic crust: evidence from potassium and oxygen isotopes[J]. Chemical Geology, 690: 122888.

ZHANG Z J, DAUPHAS N, JOHNSON A C, et al., 2023b. Titanium and iron isotopic records of granitoid crust production in diverse Archean cratons[J]. Earth and Planetary Science Letters, 620: 118342.

ZHAO D Y, CAWOOD P A, TENG F Z, et al., 2025. A two-stage mantle plume-sagduction origin of Archean continental crust revealed by water

and oxygen isotopes of TTGs[J]. Science Advances, 11(24): eadr9513.

ZHAO G C, ZHANG G W, 2021. Origin of continents[J]. Acta Geologica Sinica, 95(1): 1-19. (in Chinese with English abstract)

ZHAO G C, ZHANG J, YIN C Q, et al., 2023. Pre-plate tectonics and origin of continents[J]. Chinese Science Bulletin, 68(18): 2312-2323. (in Chinese with English abstract)

ZHENG Y F, ZHAO G C, 2020. Two styles of plate tectonics in Earth's history[J]. Science Bulletin, 65(4): 329-334.

ZHENG Y F, 2023. Plate tectonics in the twenty-first century[J]. Science China Earth Sciences, 66(1): 1-40.

ZHENG Y F, 2024. Plate tectonics in the Archean: observations versus interpretations[J]. Science China Earth Sciences, 67(1): 1-30.

ZHENG Y F, 2025. Origin of continental crust on early Earth[J]. National Science Review, 12(9): nwaf341.

附中文参考文献

刘勇胜，何德涛，陈康，等，2025. 原始地壳增厚驱动水反向富集与早期TTG形成[J]. 科学通报，70(21)：3557-3565.

龙晓平，赵国春，翟明国，等，2024. 前板块构造与大陆起源研究进展及关键科学问题[J]. 科学通报，69(12)：1572-1585.

魏春景，关晓，董杰，2017. 基性岩高温-超高温变质作用与TTG质岩成因[J]. 岩石学报，33(5)：1381-1404.

吴忠庆，2024. 水诱导的地幔反转与大陆起源[J]. 地球科学进展，39(6)：551-564.

翟明国，张旗，陈国能，等，2016. 大陆演化与花岗岩研究的变革[J]. 科学通报，61(13)：1414-1420.

翟明国，赵磊，祝禧艳，等，2020. 早期大陆与板块构造启动：前沿热点介绍与展望[J]. 岩石学报，36(8)：2249-2275.

张昌振，张旗，金维浚，等，2018. 太古宙TTG能否与埃达克岩对比?：全球数据给出的结果[J]. 地质科学，53(4)：1254-1266.

张旗，翟明国，2012. 太古宙TTG岩石是什么含义?[J]. 岩石学报，28(11)：3446-3456.

赵国春，张国伟，2021. 大陆的起源[J]. 地质学报，95(1)：1-19.

赵国春，张健，尹常青，等，2023. 前板块构造与大陆起源[J]. 科学通报，68(18)：2312-2323.

郑永飞，2023. 21世纪板块构造[J]. 中国科学：地球科学，53(1)：1-40.

郑永飞，2024. 太古宙地质与板块构造：观察与解释[J]. 中国科学：地球科学，54(1)：1-30.

第一作者简介：

王孝磊，南京大学教授、博士生导师，中国矿物岩石地球化学学会理事、岩浆岩专业委员会主任，《岩石学报》副主编，《地质力学学报》等期刊编委。获国家自然科学基金委杰出青年和优秀青年基金、中国矿物岩石地球化学学会侯德封奖。主要从事岩石学和前寒武纪地质学研究，在*Nature*、*Science Advances*、*Nature Communications*、*National Science Review*、*Geology*等发表学术论文140余篇，参与出版教材2部，部分成果获教育部自然科学奖一等奖（排名第1）和二等奖（排名第2），2021—2024连续四年入选爱思唯尔“中国高被引学者”榜单。