

· 学术讨论 ·

太古宙与现代的巨大差异:太古宙可能有板块构造吗?

张旗^{1,2}, 焦守涛^{3,4}

ZHANG Qi^{1,2}, JIAO Shoutao^{3,4}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029;

3. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037;

4. 自然资源部地质信息工程技术创新中心, 北京 100037

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

4. Technology Innovation Center of Geological Information, MNR, Beijing 100037, China

摘要:太古宙出露的岩石(如TTG、科马提岩、绿岩带)大多与现代不同,故“将今论古”的思想不适合推演到太古宙,也不能把太古宙TTG对比为现今的埃达克岩。TTG与俯冲无关,也不是地壳加厚形成的,而可能是在停滞盖层构造背景下初始地壳内富钠玄武岩部分熔融形成的。地球演化是一个不断散热的过程,太古宙属于热球阶段,元古宙以后可能才进入冷球阶段。因此,太古宙可能主要表现为停滞盖层构造,元古宙以后可能才出现板块构造。板块热俯冲的可能性很小,只有当岩石圈足够冷且具有一定的刚性和浮力时,板块才可能俯冲;而查明板块构造的地质记录(如蛇绿岩、蓝片岩、混杂堆积、深海沉积等)才能知道板块构造启动的时间。

关键词:太古宙;TTG;板块构造;停滞盖层构造;“将今论古”思想

中图分类号:P534.2;P541 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)09-1403-07

Zhang Q, Jiao S T. The great differences between the Archean and modern times: Could there have been plate tectonics in the Archean? *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(9): 1403-1409

Abstract: Most outcropped Archean rocks (such as TTG, komatiite and greenstone belt) are different from the modern ones. Therefore, the idea of “the present is the key to the past” is not suitable to be extended to the Archean Eon, nor can the Archean TTG be compared to the present adakites. TTG had nothing to do with subduction, and might be formed by partial melting of sodium-rich basalts in the initial crust under the tectonic setting of the stagnant lid instead of by crustal thickening. The earth is a process of continuous heat dissipation. The Archean Eon belongs to the hot sphere stage, and the earth might enter the cold sphere stage after the Proterozoic Eon. Therefore, the Archean might be mainly characterized by stagnant lid tectonics, and plate tectonics might have appeared after the Proterozoic. As possibility of plate thermal subduction is small, only when the lithosphere is cold enough and has certain rigidity

收稿日期:2020-10-13;修订日期:2021-04-22

资助项目:中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室项目《镁铁-超镁铁岩大数据研究》(编号:81300001)、国家重点研发计划项目《基于地质云的地质灾害基础信息提取与大数据分析挖掘》(编号:2018YFC1505501)、《基于“地质云”平台的深部找矿知识挖掘》(编号:2016YFC0600510)、国家自然科学基金项目《大数据环境下的滑坡危险性评估模型构建方法研究》(批准号:41872253)和中国地质调查局项目《国家地质大数据汇聚与管理》(编号:DD20190318)

作者简介:张旗(1937-),男,研究员,岩石学和地球化学专业。E-mail: zq1937@126.com

and buoyancy, can the plate subduction occur. Only by establishing the geological record of plate tectonics (such as ophiolite, blueschist, melanges, deep-sea deposits, etc.) can we know when plate tectonics began.

Key words: Archean Eon; TTG; plate tectonics; stagnant lid structure; the idea of “the present is the key to the past”

太古宙地质是学术界历来关注的一个问题,该问题与板块构造起源联系到一起,成为近年学术界关注的焦点^[1-2]。关于太古宙问题,学术界争论很多,关键是如何看待太古宙问题,用什么方法研究太古宙问题。因为,不同的视角会产生不同的认识,不同的方法会得出不同的结论。笔者认为,“将今论古”的方法不适用于太古宙,“将今论古”最多只可能应用于元古宙,可能是对太古宙研究有不同认识的关键。此外,如何看待 TTG 可能也是太古宙研究的核心问题,目前学术界对 TTG 有不同的认识^[3-13]。TTG 是太古宙地壳的主要组成部分,其在太古宙之后几乎绝迹。笔者认为,解决了 TTG 的问题,就可能了解太古宙与后太古宙(元古宙至今)之间的差异,也有助于解决太古宙有无板块构造的问题及太古宙的其他许多问题。

1 太古宙的奇特之处

现在的知识,大概只能解释元古宙以来的地质现象,对于太古宙,了解甚少。

关于太古宙的奇特之处,简单举例:①现在全球花岗岩主要是富钾的,富钠的花岗岩很少,类似 TTG 的花岗岩更罕见;而在太古宙,花岗岩主要是富钠的 TTG,富钾的花岗岩很少。②现在的超镁铁质火山岩是苦橄岩,分布很少;太古宙则是科马提岩,普遍分布。③现在地球上的热点数量有限,几十个甚至几百个;而太古宙几乎遍地皆是。④现在

的埃达克岩是富 Sr 贫 Y 的;太古宙的埃达克岩 Sr 更高 Y 更贫。⑤现在的赞岐岩主要是火山岩,贫 Sr;太古宙的赞岐岩主要是侵入岩(高镁闪长岩),富 Sr。⑥现在的板块边界的变质作用是蓝片岩,太古宙则没有蓝片岩。⑦现在有超高压变质作用榴辉岩,太古宙则没有。⑧太古宙普遍发育绿岩带,现在没有。太古宙绿岩带的下部是基性-超基性岩,上部是中酸性岩;现在的基性-超基性岩与中酸性岩二者是分开的,不存在二者彼此相依且具有上下先后关系的情况。⑨现在的构造格局是长条形的造山带围绕地台或地块分布,太古宙恰恰相反(图 1)。⑩太古宙的早期是岩浆海,显生宙之前是元古宙。⑪现在是板块构造,太古宙是“停滞盖层构造”(stagnant lid tectonics,也有译为“静止盖层构造”的)^[1]。

2 学术界目前的解释

太古宙地质与现代地质的差异很多,学术界现在大多是用解释现代地质的思路解释太古宙发生的事情。例如对于 TTG,有 2 种解释:一种认为 TTG 相当于现在的岛弧岩浆岩,产于板块消减带^[3-9](图 2);另一种解释,由于认识到 TTG 与埃达克岩(O 型)存在差距,遂认为 TTG 可能代表加厚地壳的产物^[10-11]。那么,上述 2 种解释哪种可信呢?笔者认为皆不可信。现在的花岗岩主要是富钾的,说明现代地壳是相对成熟的;太古宙以 TTG 为主,代表初始的地壳(juvenile crust)。现代地壳可

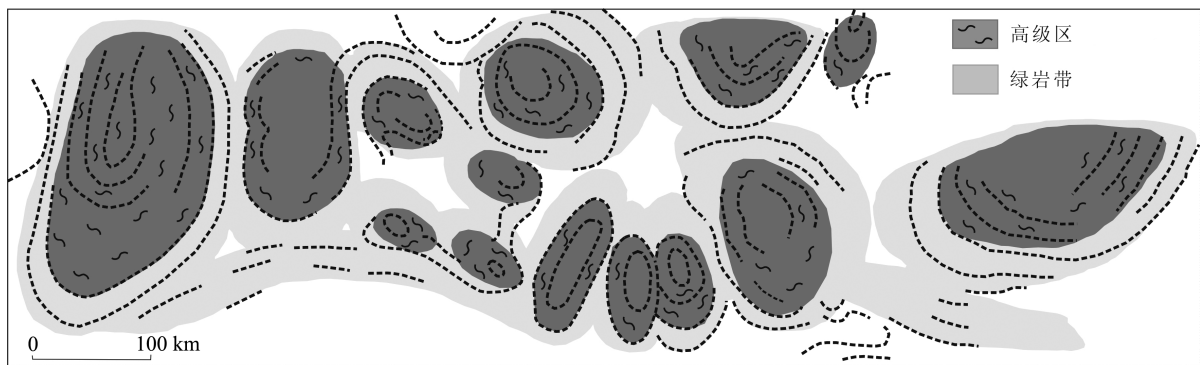


图 1 俄罗斯 Aldan 地盾的高级区与绿岩带分布图^[1-2]

Fig. 1 Distribution of high-grade regions and greenstone belt in Aldan Shield

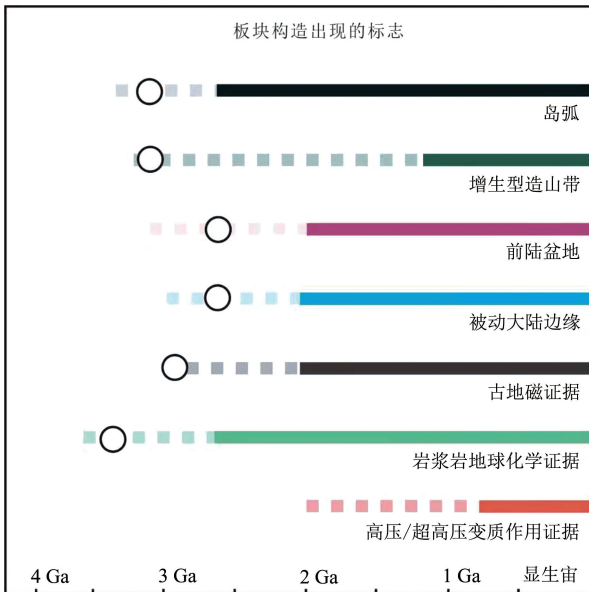
图 2 地质演化时代与板块构造判别标志^[2, 14]

Fig. 2 Indicators of plate tectonics with geological time

分为上、中、下 3 层,平均厚度约为 40 km;太古宙初始地壳很薄,主要由玄武质岩石组成,不可能有明显的地壳分异现象^[12-13]。

实验研究是地质学研究中一个非常重要的手段,许多地质学理论是根据实验研究与地质研究结合提出来的。实际上地质的实验研究相当多,给地质研究带来新见解的同时,也带来了一些负面影响(对实验研究的评论本文不讨论)。需要强调的是,对 TTG 的实验研究结果有很多存疑。许多研究者认为,笔者的这个结论太匪夷所思,实际上问题可能非常严重。现在的 TTG 实验基本上是与埃达克岩的实验研究划等号的,一个实验的结果,既可以解释现代埃达克岩的成因,也可以解释太古宙 TTG 的成因^[15-19],并认为太古宙 TTG 可以和现代埃达克岩形成于同样的条件下,而不顾太古宙地温梯度与现代的巨大差异。因此,在没有了解太古宙温压条件的情况下,目前全球所有关于 TTG 的实验结果均不可信。上述结果如果适合埃达克岩,则不适合太古宙 TTG,反之亦然。

关键是 TTG 不能与埃达克岩相提并论,而现在关于 TTG 的解释大多是二者对比得出的,尤其是太古宙地壳加厚的结论。人们对埃达克岩的解释是与残留石榴辉岩处于平衡^[20]的产物,TTG 也与石榴辉岩平衡吗?太古宙有石榴辉岩吗?

太古宙 TTG 是太古宙初始地壳部分熔融形成的,由于 TTG 占优势,说明太古宙这种地壳是太古宙地壳的主要组成。现在的岛弧花岗岩不同于具有全球意义的富钾花岗岩,岛弧花岗岩与俯冲有关,产于板块俯冲带。如果太古宙存在板块构造和板块消减作用,形成的太古宙岛弧花岗岩应不同于 TTG。那么,太古宙的岛弧花岗岩是什么特征?为了解决这个问题,不能用现在的标志去解释。现在的岛弧花岗岩的标志是从对现在的岛弧(例如日本、阿留申、安第斯)研究发现总结出来的。太古宙岛弧是什么特征,应首先去寻找太古宙的岛弧在哪里,是什么特征。先找实体,找地质现象,而不是套用现在的岛弧标准去界定太古宙的岛弧。

套用现在的标准,也不能自相矛盾。认为 TTG 代表太古宙的主体,又认为 TTG 是岛弧,那么太古宙就全是岛弧了,岛弧与非岛弧就没有区别了。另一种说法认为 TTG 代表加厚地壳^[8, 10, 21],于是太古宙地壳都是加厚的。加厚是相对于正常地壳厚度而言的,都加厚还是加厚吗?属于正常,于是正常与加厚无法区分。

那么,TTG 究竟是怎么形成的?笔者推测,太古宙 TTG 可能是在停滞盖层构造的背景下,初始地壳的壳内玄武岩在高温低压条件下部分熔融形成的。有 TTG,表明太古宙已经出现初始地壳。“壳内(within the juvenile crust)”的概念大体相当于板块构造的“板内(within the plate)”。因此,如果一定要对比,TTG 可能相当于板块构造的板内环境。

3 太古宙的“板块构造”

太古宙有没有板块构造争论很大,很多学者支持有板块构造^[22-33]。目前的现状是,大多数学者用板块构造理论解释太古宙构造,那么太古宙板块构造的证据是什么?

现在支持太古宙存在板块构造的证据主要有两类:一类文献是给出大量数据和旁证材料(包括微量元素及其比值、同位素数据等)支持的设想或模式,却没有提供板块构造的实体位置和蛇绿岩位置。另一类是把板块构造区分为现代板块构造(从今天向前推到约 8 亿年前)、早期板块构造(8~2.2 亿年)、前板块构造(2.2~4.0 亿年,还包括一个过渡阶段)等^[33-36]。总之,从一些文献的表述看,板块构

造的术语不能丢掉,而板块构造的内涵可以改变。例如,有学者根据锆石 Hf 同位素推测,陆壳的大量出现指示存在板块构造,还有冷板块俯冲、热板块俯冲等的说法^[22-26,33]。而笔者认为,上述证据都不足以说明太古宙存在板块构造。因此,所谓太古宙“板块构造”即是子虚乌有的。

研究表明,元古宙以后的地质现象与现今的地质现象可类比的可能性很大,而太古宙不同。太古宙与现今不同主要表现在:太古宙普遍发育的地质现象,现在几乎很少;在太古宙普遍存在的现象,现在却是局部的;太古宙有的,现在没有。如 TTG、科马提岩、绿岩带等。具体原因尚不清楚,目前只知道太古宙地温梯度应比现在高,估计至少高 3 倍,地幔温度可能比现今高 150~200℃^[37-38]。在那样的情况下,估计岩浆结晶、分离、演化的规模和样式均不同于现在。例如,现在的花岗岩,分离结晶的可能性很小;而太古宙的花岗岩由于温度很高,分离结晶可能发生。在现在的地幔温度条件下产生科马提岩的可能性很小,而在太古宙非常正常;相反,在太古宙地幔条件下,不产生科马提岩可能才令人奇怪。

Moyen 等^[39]对比了现代与太古宙岩浆岩的差别,指出太古宙地幔中明显亏损或富集的部分较少,真正与俯冲有关的岩浆岩记录很少,洋底高原玄武岩与洋中脊玄武岩之间的区别不明显。他们还指出,中酸性岩浆岩与地幔很少相关,现代花岗岩主要分为 2 类:一类是与弧玄武岩有岩石学联系的弧花岗岩,另一类是与碰撞有关的花岗岩类(笔者注:不一定要强调碰撞,其实碰撞与花岗岩没什么关系^[40])。相反,太古宙的 TTG 主要来自富碱质的(笔者注:应当是富钠质的)镁铁质岩浆岩,具有幔源的特征。

另外,凡是出露在显生宙的岩浆岩几乎都可以用板块构造解释。例如,洋中脊玄武岩(MORB)、岛弧玄武岩(IAB)、洋岛型玄武岩(OIB)、洋底玄武岩、洋底高原玄武岩、大陆溢流玄武岩、橄榄岩、麦美奇岩、方辉橄榄岩、异剥橄榄岩、橄长岩、夏威夷岩、玻安岩、赞岐岩、埃达克岩(O型和C型的)、安山岩、富钠花岗岩、富钾花岗岩、淡色花岗岩、A型花岗岩、碱流岩、霞石岩等,甚至阿拉斯加型超镁铁岩、造山橄榄岩等。它们或出露于板块构造的某一部位,或在不同的情况下出现在板块构造的若干不

同部位,均可予以合理解释。太古宙 TTG、高钾花岗岩、科马提岩、高镁闪长岩、绿岩带等,出露在板块构造的哪个部位,什么环境?如何解释?此外,如果要让大家相信太古宙有板块构造,至少应当查明,太古宙的俯冲带在哪里,岛弧在哪里,海沟在哪里,残存的洋中脊碎块在哪里,洋岛在哪里^[36,41]。如果这些资料都无法提供,很难相信太古宙有板块构造。Kusky^[24]也承认寻找太古宙板块边界是徒劳的,既然连板块的痕迹都找不到,何谈板块构造模式。

4 太古宙地质面貌

太古宙地质环境完全不同于现在,因此,解释现在的理论不能一成不变地应用于太古宙。为此,必须用太古宙的常态解释太古宙的地质现象,而用现在的常态解释现代的现象。在太古宙看起来很正常的事情,现在可能是异常的。用现在的正常解释太古宙的正常不合适。必须抛弃现在的解释,重塑太古宙的知识。这方面本文不可能给出答案,需要进一步探索。但是,这不等于陷入不可知论。笔者推测,根据目前得到的一些基本现象,至少可以肯定的是:

(1)太古宙与现代的许多岩石不同,如本文第一节提出的差别。它说明,现代地球是成熟的,岩石各种各样,非常复杂;而太古宙岩石较单调,且绝大多数是幔源的或初始的。

(2)统治现在地球的总体构造是板块构造,现代的岩石圈是冷的、轻的,由于冷,板块才具有一定的刚性;由于轻,板块才具有一定的浮力,板块才可能俯冲。太古宙很热,岩石圈不够冷,不够刚性,就不可能有现代型式的板块构造^[42-46]。这时即使存在热俯冲,也仅限于地壳层次,且无论在方式和内涵上都与现代板块构造存在巨大的差异^[47]。研究表明,地幔温度每降低 100 K,其脆弱性增加一个数量级,而板块脆弱性幅度也很可能增加 2~3 个数量级^[48]。由于太古宙比现在热很多,存在板块热俯冲的可能性很小,于是,一个垂直的、停滞的盖层、软盖层或热管构造模式可能在太古宙占主导地位^[45-46,49]。Van Hunen^[46]强调指出,现今,板块构造控制着地球的大规模动力学。大量的观测表明,现代地球的构造与太古宙明显不同,太古宙时,地球内部的温度比现今高 150~250 K,这将影响板块的

密度和强度。模拟研究也表明,现今的构造与早先显著不同。从理论上考虑,大约 40 亿年前保存最久远的岩石记录表明,垂直的、停滞的盖层、软盖层或热管构造(stagnant-lid, squishy-lid 或 heat-pipe tectonics)可能在太古宙占主导地位。而现代板块构造的几个关键特征(如蛇绿岩、高压变质岩和冷的地温梯度)在太古宙很少或不存在^[46]。因此,板块模式是随时间演化到一定阶段才出现的现象。从太古宙的热的“停滞盖层”模式到今天的冷的板块构造模式,是一个从量变到质变的过程,是必须满足一定条件才能出现的^[12, 42-50]。学术界目前探索的板块构造启动时间就是在寻找这个质变的拐点或转折点。

5 如何创建“太古宙理论”?

创建“太古宙理论”,有许多问题需要探讨。

(1)“太古宙理论”的基础,应当建立在太古宙当时的状况下,应当面对太古宙所有出露的岩石和构造,构建一个完全新型式的、不同于现今的板块构造的太古宙构造模式。例如,应当有一个理论,能够完美、系统地解释太古宙全部 TTG、科马提岩、绿岩带及其之间的关系,而不是仅仅能够用这个理论解释这个,用另外的理论解释另一个。

(2)应当抛弃现在学术界流行的以“将今论古”思想为指导的思路、认识、方法、见解,应当将太古宙地质与现代地质作彻底的切割,应当确立一个概念:适合今天的不一定适合昨天。把 TTG 比作埃达克岩是一个明显的错误。

(3)强调太古宙不同地质体之间的对比,太古宙不同岩石之间的对比,太古宙的地质模拟研究。从研究和对比中查明它们之间的关系,创新适合太古宙地质的理论。例如 TTG 的研究,不是急于与现代对比,而是应当从一个地方的 TTG 的自身研究做起,研究 TTG 的组成、岩体的变化情况、围岩的组成、与围岩的关系、围岩经历的地质过程、一个地方的 TTG 与另外一个地方的 TTG 对比,发现它们之间的共同点和差异。研究 TTG 别忘了科马提岩,应当对科马提岩进行逐个研究与对比,发现它们之间的不同,及其与其他岩石(尤其 TTG)的关系,从中查明它们的成因及变化原因。许多学者非常青睐太古宙俯冲模式,不论低缓或陡峻的,冷的或热的俯冲模式。建议是否去太古宙地区进行填

图,查明俯冲的地质产物的位置、岩石性质、特征及物质组成。亦即,太古宙研究应当从填图做起,而不是泛泛地使用一些模式。

(4)板块构造的启动时间是当今学术界关注的焦点,翟明国等^[51]对此有精辟的分析。研究表明,地球的历史是一个不断散热的过程,早期地球属于热球阶段,现在为冷球阶段^[12]。地球的初期如同一锅“沸腾的粥”,由于有来自地幔的大量无处不在的热上升,粥在锅中上、下翻滚,如同岩浆海的样式。随温度降低,翻滚的强度和密度逐渐降低。温度继续降低,从地幔上来的热从全球性规模缩减为局部性规模,地球不是到处都有地幔在上涌。于是,在长期没有地幔热上涌的部位逐渐冷却“结痂”(可能相当于岩石圈地幔+薄的地壳),演变为相对稳定的块体,块体之间仍然以地幔物质的上、下对流运动为主,这时的构造样式大体相当于“停滞盖层”模式(及软盖层或热管构造等)。可能当地球降温到一定程度,能够满足 3 个条件时才会导致板块构造出现:①地幔持续分异,轻的 MgO 向上部转移,直至分出亏损的上地幔和富集的下地幔;②上地幔部分熔融形成的岩石圈达到一定的厚度,足够冷且达到一定的浮力和刚性,同时陆壳相对成熟并发生分异^[43, 52];③地幔运动从上下对流为主转变为水平对流为主。只有满足上述 3 个条件,才可能引发海底扩张、大陆漂移、板块俯冲。与其相伴的地质记录则是蛇绿岩、蓝片岩、超高压变质带、榴辉岩、被动大陆边缘、转换断层、岛弧、活动大陆边缘等。查明上述要素发生的初始时间,才是板块构造启动的时间^[2, 45, 51, 53]。以蛇绿岩为例,这是最重要的板块构造的证据,目前学术界认可的最古老的蛇绿岩是芬兰的 Jormua 蛇绿岩(1.95 Ga^[54])和加拿大的 Purtniq 蛇绿岩(2.0 Ga^[55])。看来,板块构造至少是在这个期间之前启动的,是否还能够更早,取决于今后研究的进展。

6 结 论

(1)太古宙出露的岩石(如 TTG、科马提岩、绿岩带)大多与现代不同,故“将今论古”的思想不适合推演到太古宙,也不能把太古宙 TTG 对比为现今的埃达克岩。TTG 与俯冲无关,也不是地壳加厚形成的,而可能是在停滞盖层构造背景下初始地壳的壳内富钠玄武岩部分熔融的产物。

(2)地球的历史是一个不断散热的过程。太古宙属于热球阶段,元古宙以后可能才进入冷球阶段,而板块构造应是冷球阶段的产物。太古宙的许多不同于现代的特殊性质表明,在太古宙时,垂直的、停滞的盖层、软盖层或热管构造可能占主导地位。

(3)研究表明,只有当岩石圈足够冷且具有一定的刚性和浮力时,板块才可能俯冲;板块热俯冲的可能性很小。而查明板块构造的地质记录(如蛇绿岩、蓝片岩、混杂堆积、深海沉积等)才能知道板块构造启动的时间。

后记: 本文是探索,笔者不可能给出答案。答案依靠今后的实践,需要在一个新的思路下重新实践。地质研究不容易,由于地质现象揭露的不完整,地质研究仍然处于“盲人摸象”阶段,因此会犯很多错误。目前对于“太古宙理论”还知之甚少,研究空间还很大,尤其对于年轻人来说。必须改换思路,否则没有出路。必须努力学习,从书本中学习,从实践中学习。学有所思,即成智慧;学而不思,即成教条。看文献是学习的重要方法,鉴于文献中的问题太多,对于有一定实践经验的学者,建议从自身的实践中学习和领悟,得出自己的结论。建议有兴趣于太古宙的年轻人,从填图开始,十年磨一剑,这样得出的结果更令人信服。笔者在撰写本文时,恰逢五四运动101周年。在微信上看到一个“致敬十大五四人物”的帖子,开篇第一位即陈寅恪先生,上书:民国十八年(1929年),陈寅恪先生提出的“独立之精神,自由之思想”,完整地体现了“五四精神”。对照陈寅恪先生91年前的题词,不免感慨万分。

最后,感谢翟明国院士的建议,感谢与张成立教授的讨论。

参考文献

- [1] Salop L I. Two types of Precambrian structures: Gneisses, folded ovals and gneiss domes[J]. *Int. Geol. Rev.*, 1972, 14: 1209-1228.
- [2] 翟明国. 华北前寒武纪成矿系统与重大地质事件的联系[J]. *岩石学报*, 2013, 29(5): 1759-1773.
- [3] Martin H. Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas[J]. *Geology*, 1986, 14: 753-756.
- [4] Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids[J]. *Lithos*, 1999, 46: 411-429.
- [5] Drummond M S, Defant M J. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparison[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 21503-21521.
- [6] Foley S, Tiepolo M, Vanucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones[J]. *Nature*, 2002, 417: 837-840.
- [7] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite[J]. *Nature*, 2003, 425: 605-609.
- [8] Smithies R H, Champion D C. Adakite, TTG and Archean crustal evolution[C]// *Geophysical Research Abstracts*, 2003, 5: 01630.
- [9] Steenfelt A, Garde A A, Moyen J F. Mantle wedge involvement in the petrogenesis of Archean grey gneisses in West Greenland[J]. *Lithos*, 2005, 79: 207-228.
- [10] Smithies R H, Champion D C. The Archean high-Mg diorite suite: Links to tonalite-trondhjemite-granodiorite magmatism and implications for Early Archean crustal growth[J]. *Journal of Petrology*, 2000, 41: 1653-1671.
- [11] Condie K C. TTGs and adakites: are they both slab melts? [J]. *Lithos*, 2005, 80: 33-44.
- [12] 张旗, 翟明国. 太古宙 TTG 岩石是什么含义? [J]. *岩石学报*, 2012, 28(11): 3446-3456.
- [13] Palin R M, Santosh M, Cao W, et al. Secular metamorphic change and the onset of plate tectonics[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103172>.
- [14] Condie K C, Kröner A. When did plate tectonics begin? Evidence from the geologic record[J]. *Geological Society of America, Special Paper*, 2008, 440: 281-294.
- [15] Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites[J]. *Precamb. Res.*, 1991, 51: 1-25.
- [16] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36: 891-931.
- [17] Schmidt M W, Dardon A, Chazot G, et al. The dependence of Nb and Ta rutile-melt composition and Nb/Ta fractionation during subduction processes[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, 226: 415-432.
- [18] Klemme S, Prowatke S, Hametner K, et al. Partitioning of trace elements between rutile and silicate melts: implications for subduction zones[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, 49: 2361-2371.
- [19] Xiong X L, Xia B, Xu J F, et al. Na depletion in modern adakites via melt/rock reaction within the sub-arc mantle[J]. *Chemical Geology*, 2006, 229: 273-292.
- [20] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere[J]. *Nature*, 1990, 347: 662-665.
- [21] Smithies R H, Champion D C, van Kranendonk M J. Formation of Paleoproterozoic continental crust through infracrustal melting of enriched basalt[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 281: 298-306.
- [22] Kusky T M. Accretion of the Archean Slave Province[J]. *Geology*, 1989, 17: 63-67.
- [23] Kusky T M, Polat A. Growth of granite-greenstone terranes at convergent margins, and stabilization of Archean cratons[J]. *Tectonophysics*, 1999, 305: 43-73.
- [24] Kusky T M. 板块构造与地幔温度和变质属性之间的关系[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50: 635-644.
- [25] Komiya T. Material circulation through time: Chemical differentiation within the mantle and secular variation of temperature and

- composition of the mantle [C]//Yuen D, Maruyama S, Karoto S, et al. *Superplumes: Beyond Plate Tectonics*. Springer, 2007: 187–234.
- [26] Greber N D, Dauphas N, Bekker A, et al. Titanium isotopic evidence for felsic crust and plate tectonics 3.5 billion years ago [J]. *Science*, 2017, 357: 1271–1274.
- [27] Ge R, Zhu W, Wilde S A, et al. Remnants of Eoarchean continental crust derived from a subducted proto-arc [J]. *Science Advances*, 2018, 4(2): eaao3159.
- [28] Deng Z, Chaussidon M, Savage P, et al. Titanium isotopes as a tracer for the plume or island arc affinity of felsic rocks [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 01809164.
- [29] Dhuime B, Wuestefeld A, Hawkesworth C J. Emergence of modern continental crust about 3 billion years ago [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 552–555.
- [30] Næraa T, Schersten A, Rosing M T, et al. Hafnium isotope evidence for a transition in the dynamics of continental growth 3.2 Gyr ago [J]. *Nature*, 2012, 485: 627–630.
- [31] Tang M, Chen K, Rudnick R L. Archean upper crust transition from mafic to felsic marks the onset of plate tectonics [J]. *Science*, 2016, 351: 372–375.
- [32] Smit K V, Shirey S B, Hauri E H, et al. Sulfur isotopes in diamonds reveal differences in continent construction [J]. *Science*, 2019, 364: 383–385.
- [33] Zheng Y F, Zhao G. Two Styles of plate tectonics in Earth's history [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65: 329–334.
- [34] Condie K C, O' Neill C, Aster R C. Evidence and implications for a widespread magmatic shutdown for 250 My on Earth [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 282: 294–298.
- [35] Brown M. Metamorphic conditions in orogenic belts: A record of secular change [J]. *Int. Geol. Rev.*, 2007, 49: 193–234.
- [36] Brown M, Johnson T, Gardiner N J. Plate tectonics and the Archean Earth [J]. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 2020, 48: 12.1–12.30.
- [37] Herzberg C, Condie K, Korenaga J. Thermal history of the Earth and its petrological expression [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 292: 79–88.
- [38] Korenaga J. Initiation and evolution of plate tectonics on Earth: theories and observations [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2013, 41: 117–151.
- [39] Moyen J F, Laurent O. Archaean tectonic systems: A view from igneous rocks [J]. *Lithos*, 2018, 302/303: 99–125.
- [40] 张旗, 王焰, 熊小林, 等. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [41] Lenardic A. The diversity of tectonic modes and thoughts about transitions between them [J]. *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 2018, 376: 20170416.
- [42] Hamilton W B. Archean magmatism and deformation were not products of plate tectonics [J]. *Precambrian Research*, 1998, 91: 143–179.
- [43] Davies G F. On the emergence of plate tectonics [J]. *Geology*, 1992, 20: 963–966.
- [44] Arndt N T. Formation and evolution of the continental crust [J]. *Geochemical Perspectives*, 2014, 2(3): 436–504.
- [45] Stern R J. 板块构造启动的时间和机制: 理论和经验探索 [J]. *科学通报*, 2007, 52(5): 489–501.
- [46] Van Hunen J. Onset and evolution of plate tectonics: Geodynamical constraints [J]. *Earth Systems and Environmental Sciences*, 2019, <https://doi.org/10.1016/13978-0-12-409548-9>. 10861–9.
- [47] Zhai M G, Peng P. Origin of early continents and beginning of plate tectonics [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65: 970–973.
- [48] Moyen J F, van Hunen J. Short term episodicity of Archaean subduction [J]. *Geology*, 2012, 40: 451–454.
- [49] Sleep N H. Evolution of the mode of convection within terrestrial planets [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets (1991–2012)*, 2000, 105(E7): 17563–17578.
- [50] Frisch W, Meschede M, Blakey R. *Plate tectonics* [M]. Springer, 2011.
- [51] 翟明国, 赵磊, 祝禧艳, 等. 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*, 2020, 36(8): 2249–2275.
- [52] Peacock S M. Thermal structure and metamorphic evolution of subducting slabs [J]. *American Geophysical Union*, 2003, 138: 7–22.
- [53] 赵振华. 地质历史中板块构造启动时间 [J]. *大地构造与成矿学*, 2017, 41(1): 1–22.
- [54] Peltonen P, Kontinen A, Huhma H. Petrology and geochemistry of metabasalts from the 1.95 Ga Jorjua ophiolite, northeastern Finland [J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37: 1359–1383.
- [55] Scott D J, Helmstaedt H, Bickle M J. Purtunioq ophiolite, Cape Smith belt, northern Quebec, Canada: A reconstructed section of early Proterozoic oceanic crust [J]. *Geology*, 1992, 20: 173–176.