地球演化冷热波动周期与重大地质事件

唐春安^{1,2*}, 陈甜甜³, 龚斌¹

1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024;

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;

3. 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110819

* 通讯作者, E-mail: tca@mail.neu.edu.cn

收稿日期: 2021-04-25; 收修改稿日期: 2021-05-23; 接受日期: 2021-06-16; 网络版发表日期: 2021-07-27

国家自然科学基金原创探索项目(批准号: 42050201)和地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金项目(编号: GPMR202002)资助

从20世纪80年代开始的全球变化研究中, 诞生了“地球系统科学”的新领域(汪品先等, 2019)。但是, 相对地球科学技术手段突飞猛进的发展和丰富的成果, 人们对于地球科学核心问题认知的进展和突破并未如预料般乐观。20世纪50年代, 基于魏格纳这样一位个体科学家的大陆漂移假说, 以及美国海军一次简陋的海沟探险所形成的海底扩张假说, 就建立了被称为地球科学革命的板块构造学说。之后, 尽管有了技术方面的重大进步、全世界大量人力物力投入与无数地球科学家团队和国际合作大计划的实施, 数十年的大地构造科学发展更多的还只是在板块构造学说基础上的“小心求证”。对于大陆地质学的多数研究依然是验证前人提出的模型与假说, 以局部的、区域性地质为主, 缺乏高层次的、普适性的理论创新和提出重大导向性的科学问题(任建国等, 2021)。尽管新技术武装下的地球科学试图转向更深层次基本问题的探索——地球起源、生命诞生、冰期形成与消融、气候变化以及生命、气候与地球内部的联系等等。但是, 过度注重细节使我们容易迷失在地球科学的汪洋大海, 成果丰富却是只见树木不见森林。一方面, 地球科学期待向深度和广度进军; 另一方面, 我们目前仍然面临许多地球科学的最基本问题, 没有给出很好的回答: 地球究竟是如何形成的? 地球诞生初期的“黑暗时期”究竟发生

了什么? 板块构造是如何启动的? 地球内部如何运行及其如何影响地表? 地球为什么时而“冷若冰霜”、时而“热如炼狱”? 生物演化与灭绝的真正驱动因素是什么? 是否只有地球拥有板块运动? 究竟是什么原因引起气候变化?

自地球诞生以来, 其演化历史上多次出现过地球内部冷-热交替的现象。与此同时, 地质活动的静止期与活跃期也交替出现。尽管板块构造理论已经发展了半个多世纪, 但对地球本身内部冷-热周期波动与地质事件之间的关系, 却一直没有很好的解释。

探索地球内部冷热循环与主要地质事件之间的相关性, 有助于从根本上回答地球科学的诸多重大问题。张祖还(1986)曾指出, 地热积累和释放与地壳运动和地球演化的关系, 是自然界矛盾统一的一个重要表现。他认为, 在地球内部热“积累时期”, 地热积累速度比较均衡和缓慢, 延续的时间也比较长, 属于量变过程, 地球处于相对稳定时期。当热积累达到一定阶段, 原来相对平衡状态遭到破坏, 就会引起质变而发生矛盾转化从而进入热“释放时期”, 释放往往剧烈而迅速, 表现为火山活动、岩浆活动、地壳运动和地震活动等, 延续时间则比较短, 地球处于相对活动时期。地热的积累和释放这对矛盾相互斗争, 推动着地球历史不断发展。由于地热积累速度比较稳定, 达到矛盾转化所需

中文引用格式: 唐春安, 陈甜甜, 龚斌. 2021. 地球演化冷热波动周期与重大地质事件. 中国科学: 地球科学, 51(10): 1813–1816, doi: 10.1360/SSTe-2021-0111
英文引用格式: Tang C, Chen T, Gong B. 2021. Earth's thermal cycles and major geological events. Science China Earth Sciences, 64(10): 1821–1824, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9805-0>

的时间基本上相等, 就可以对全球性地壳运动在时间上的周期性作出合理解释。

我们收集、汇编和绘制了一幅主要地质事件与地球演化热循环的关系图, 如图1所示。其中的温度波动曲线是在唐春安(2015)提出的热演化波动曲线基础上, 结合Frakes(1979)的信息再次矫正后的结果。需要注意的是, 全球变化概念应该包括地球内部变化与地表气候变化两个部分。本文研究的地球变化, 主要是指地球内部的冷热波动及其对地表的影响。作者认为, 这种地球内部的冷热波动会对地表气候(特别是深时古气候)变化产生影响, 反之却不亦然。即地球内部冷热波动可以影响气候的冷热波动, 气候的冷热波动却不可能影响地球内部的冷热波动。

图1中显示的数据表明, 超大陆旋回、造山运动、冰期、生物灭绝等重大地质事件基本都具有周期性或韵律性特征。并且, 几乎所有的重要地质活动(例如, 大火成岩省、超大陆、造山运动、雪球地球与大冰期以及大氧化事件), 基本上与地球演化过程中的冷热波动周期相关。我们由此推测, 地球演化过程中内部的冷热波动可能是许多重大地质事件的同源驱动力。这一认识对于研究地球的演化过程及相关重大地质事件的诱发机制具有重要意义。

实际上, 早期地球的岩浆海逐渐冷却结晶, 形成坚硬的地球的外壳, 即岩石圈板块。在始太古代的40~38亿年前, 单板块的停滞层盖构造发生裂解(Tang等, 2020), 启动了多板块的活动层盖构造。在新太古代末期的25亿年前, 地球从太古宙转变为元古宙, 标志着板块构造体制上的重大变化。大约在古元古代早期的24~23亿年前, 炙热的地球经历了第一次有记录的全球冰期, 即雪球事件。随着新生岩浆活动的恢复, 雪球地球在大约22亿年前结束。在中元古代的14~13亿年期间, 劳伦大陆发生了大量的火山活动(Erickson, 2001), 形成了大规模流纹岩和花岗岩带, 同时岩浆在地球表面凝固。劳伦大陆流纹岩和花岗岩以规模大而闻名, 表明该大陆的伸展和减薄几乎达到了其极限(Erickson, 2001)。根据Macdonald等(2010)的研究, 第二次雪球地球事件发生在新元古代中晚期的大约7.1~6.35亿年前, 此时的冰川作用甚至延伸至热带地区。另一个全球尺度的极热事件发生在二叠纪末的大约2.5亿年前(Sun等, 2012), 当时海洋温度高达40℃, 陆地温度高达50℃, 这是地球演化过程中罕见的高温事件。其后, 第

二次寒潮发生在晚奥陶世(Saltzman和Young, 2005)。白垩纪变暖可能是地球演化到今天的最新的一次极热事件。Tarduno等(1998)指出, 晚白垩世极地的年平均温度高于14℃, 而不是接近冰点的温度。近1.5亿年的古温度曲线表现为1.5~1.0亿年期间地球温度明显上升, 然后稳定下降直到现在(Condie, 2011)。

伴随着地球演化历史中的冷热波动交替, 地球上地质活动的活跃期和静止期也交替出现。Sutton(1963)提出了全球构造演化的巨旋回概念, 包括造盾旋回和凝固旋回。Leonov和Khain(1987)也认为全球构造表现出一定的韵律性和旋回性。他们发现, 世界上许多地区同时发生强烈的构造活动或造山运动。进一步说, 全球构造活动在某些时期相对较强, 而在另一些时期则相对较弱。事实上, 地球上几乎所有的地质过程及其相关活动都具有周期性(Khain, 2010)。

图1表明, 地球演化过程中的板块构造和地质活动具有与热演化相关的韵律性和周期性。当地球内部变得更热时, 会有更广泛的地质活动, 如大陆张裂(rifting)和大火成岩省(LIPs)。而在地球内部较冷的阶段, 它变得相对不活跃, 岩浆活动减弱甚至停止。近几十年来, 人们提出了许多模型来解释这些事件的原因(Zheng和Zhao, 2020), 但是对板块俯冲导致地球内部冷却与岩浆喷发导致地球表面加热之间在时间和空间上的耦合关系还缺乏明确认识。此外, 对于地球内部冷热循环与幕式地质过程之间的基本关系, 还没有一个主流共识(McKenzie等, 2016)。冰川作用等温度波动与超大陆旋回、LIPs、大氧化事件、物种大灭绝等重大地质事件之间的内在联系及其驱动机制尚不清楚。

虽然还没有一个统一的模型可以解释所有观测到的地球冷热波动周期的原因(McKenzie等, 2016), 但我们现在已经知道, 地球有许多方式可以释放内部热量, 以此来触发全球降温事件。Moore和Webb(2013)提出的“地球热管”模型, 就是一种通过火山作用放热导致早期地球冷却的机制。这个机制自太古宙以来可能一直出现在板块边缘, 也许是岩石圈张裂的有效驱动机制。一些零星的过程, 如增强的羽流活动和造山运动, 被认为是特定升温或降温间隔的驱动因素。我们认为, 与火山喷发相比, 大规模岩石圈张裂事件导致降压熔融的吸热现象, 必然造成降温作用更加显著(唐春安, 2015)。最近, Stern和Miller(2018)假设新元古代雪球地球气候危机可能反映了地球构造模式从停滞层盖向活

图 1 地球演化过程重大地质事件与冷热波动周期的关系

据Frakes(1979)、Leeman(1999)、Condie(2011)、Grotzinger和Jordan(2010)、唐春安(2015)

动层盖构造(冷俯冲)的转变. 他们提出, 新元古代气候危机是地质活动长期向现代板块构造过渡引起的. 显然, 在现代板块构造之前, 地球经历了长达20亿年的古代板块构造(Zheng和Zhao, 2020), 其中高的地幔温度对岩石圈破裂和俯冲的影响是深远的. 此外, 地外触发因素并不能与Stern和Miller(2018)的这一假设相协调. 我们最近完成的有关地球大龟裂的数值模拟工作, 不仅为早期板块起源找到了一种新的解释, 而且为通过岩石圈大尺度破裂释放热量找到了一种新的地球制冷机制(唐春安, 2015; Tang等, 2020).

根据Zheng(2021)对板块构造研究的成果, 地球内部过程对外部冷热的影响, 有两个一级过程需要考虑: (1) 自上而下引起地幔冷却的板块俯冲过程; (2) 自下而上岩浆上涌引起的大陆张裂乃至裂解过程. 其中, 后一过程促使软流圈热量散失到岩石圈乃至地表大气中. 板块俯冲引起软流圈地幔冷却, 促进超大陆聚合, 阻碍热散失. 热量积累造成俯冲板片之上出现超级地幔上涌(或地幔柱), 直至超大陆裂解, 诱发大规模岩浆活动乃至形成大火成岩省, 同时释放大热量, 致使岩

石圈冷却, 并慢慢波及到地表, 使之出现寒冷气候. 俯冲通过换热冷却软流圈, 而大陆张裂和裂解则通过放热冷却岩石圈, 即大规模岩浆作用之后必然会冷却地壳. 超大陆裂解、漂移、碰撞和俯冲, 是地球冷热波动循环的重要机制.

有关重大地质事件与地球内部冷热循环之间的相关性的争论, 只有通过对地质过程和地球内部温度演化机制的深入探索才能取得进展, 从而更好地理解地球演化动力学. 地球演化过程中热异常事件的规模、持续时间和详细分布等问题至关重要, 需要在未来的研究中得到解答.

致谢 郑永飞院士对本文初稿提出了诸多宝贵意见, 并进行了关键修改; 同时, Michael Heap教授、徐涛教授、张华研究员、秦占杰副研究员等均对本文写作有贡献, 作者在此一并表示感谢.

参考文献

任建国, 初航, 吕大伟. 2021. 国家自然科学基金地质学学科布局及

- 展望. 科学通报, 66: 162–168
- 唐春安. 2015. 地球大龟裂——地球演化动力学新思考. 前沿科学, 9: 4–24
- 汪品先, 田军, 黄恩清, 马文涛. 2019. 地球系统与演化. 北京: 科学出版社
- 张祖还. 1986. 地热积累和释放与地壳运动和地球演化的关系——自然界矛盾统一的一个重要表现. 矿物岩石地球化学通讯, 2: 61–62
- Condie K C. 2011. The supercontinent cycle. In: Condie K C, ed. Earth as an Evolving System. 2nd ed. London: Academic Press. 317–355
- Erickson J. 2001. Plate Tectonics: Unraveling the Mysteries of the Earth (revised ed). New York: Facts On File Inc
- Frakes L A. 1979. Climates Throughout Geologic Time. Amsterdam: Elsevier Scientific
- Grotzinger J, Jordan T. 2010. Understanding Earth. San Francisco: W H Freeman and Company
- Khain V E. 2010. Constructing a truly global model of Earth's dynamics: basic principles. *Rus Geol Geophys*, 51: 587–591
- Leeman P. 1999. <http://www.ruf.rice.edu/~leeman/GeoColumn.gif>
- Leonov Y G, Khain V E. 1987. Global Correlation of Tectonic Movements. Hoboken: John Wiley and Sons
- Macdonald F A, Schmitz M D, Crowley J L, Roots C F, Jones D S, Maloof A C, Strauss J V, Cohen P A, Johnston D T, Schrag D P. 2010. Calibrating the Cryogenian. *Science*, 327: 1241–1243
- McKenzie N R, Horton B K, Loomis S E, Stockli D F, Planavsky N J, Lee C T A. 2016. Continental arc volcanism as the principal driver of icehouse-greenhouse variability. *Science*, 352: 444–447
- Moore W B, Webb A A G. 2013. Heat-pipe Earth. *Nature*, 501: 501–505
- Saltzman M R, Young S A. 2005. Long-lived glaciation in the Late Ordovician? Isotopic and sequence-stratigraphic evidence from western Laurentia. *Geology*, 33: 109–112
- Stern R J, Miller N R. 2018. Did the transition to plate tectonics cause Neoproterozoic Snowball Earth? *Terra Nova*, 30: 87–94
- Sun Y, Joachimski M M, Wignall P B, Yan C, Chen Y, Jiang H, Wang L, Lai X. 2012. Lethally hot temperatures during the early Triassic greenhouse. *Science*, 338: 366–370
- Sutton J. 1963. Long-term cycles in the evolution of the continents. *Nature*, 198: 731–735
- Tang C A, Webb A A G, Moore W B, Wang Y Y, Ma T H, Chen T T. 2020. Breaking Earth's shell into a global plate network. *Nat Commun*, 11: 3621
- Tarduno J A, Brinkman D B, Renne P R, Cottrell R D, Scher H, Castillo P. 1998. Evidence for extreme climatic warmth from Late Cretaceous Arctic vertebrates. *Science*, 282: 2241–2243
- Zheng Y F, Zhao G. 2020. Two styles of plate tectonics in Earth's history. *Sci Bull*, 65: 329–334
- Zheng Y F. 2021. Plate tectonics. In: Alderton D, Scott S, eds. Encyclopedia of Geology. 2nd ed. London: Academic Press. 744–758

(责任编辑: 郑永飞)