

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020050301

# 太古宙多岩浆通道与穹脊构造的动力学关联

董昊<sup>1,2</sup>, 戴黎明<sup>1,2</sup>, 李三忠<sup>1,2</sup>, 胡泽明<sup>1,2</sup>

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 深海圈层与地球系统前沿科学中心, 青岛 266100

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237

**摘要:** 太古宙时期岩石圈的主要散热方式是岩浆活动, 岩浆活动既为岩石圈提供了新的物质, 也为岩石圈变形提供了动力条件。目前已发现残留的太古宙构造变形记录显示, 那时“大陆”内部广泛发育与垂向运动过程有关的穹脊构造。但对于这种垂向构造是如何与太古宙岩浆活动联系起来的, 目前还不清楚。为了研究岩浆的动力作用与穹脊构造间的关系, 基于有限差分数值模拟方法设置了大小为 879 km×400 km 的二维数值模型, 通过设置多岩浆通道条件模拟太古宙岩浆的侵入过程。实验结果显示岩浆活动弱化了岩石圈并造成岩石圈的强烈变形。其中, 岩浆通道的正上方呈现出正地形, 并形成 TTG 穹窿。密集排布的岩浆通道之间呈现负地形, 形成绿岩带拗陷。穹窿在演化过程中发生水平扩张, 导致绿岩带不断收窄形成“钱袋子”构造样式, 二者共同组成穹脊构造。本研究认为将岩浆活动作为调节岩石圈变形的条件符合太古宙地质背景。岩浆通道条件能为穹脊构造的产生提供驱动力, 是造成太古宙岩石圈变形的重要因素。

**关键词:** 岩浆通道; 太古宙; 穹脊构造; 数值模拟

中图分类号: P547

文献标识码: A

## Dynamic connection between Archean magma vents and Dome-and-Keel Structures

DONG Hao<sup>1,2</sup>, DAI Liming<sup>1,2</sup>, LI Sanzhong<sup>1,2</sup>, HU Zeming<sup>1,2</sup>

1. *Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE, Institute for Advanced Ocean Study, College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*

2. *Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China*

**Abstract:** Magmatism is the main method for lithospheric cooling in Archean. It not only produces new materials, but also provides power for lithospheric deformation. The records of Archean deformation remained up to present suggest that the dome-and keel-structure related to the vertical movement are widely developed in the interiors of continental cratons at that time. However, it is not clear how the vertical structures work with the Archean magmatic activity. In order to make the study more intuitively, we made a two-dimensional numerical model in size of 879 × 400 km<sup>2</sup> based on the finite difference numerical simulation method and then tried to work out the intrusion process by setting magma conditions. The experimental results show that the magma vent array weakens the lithosphere and causes strong deformation of the lithosphere. The TTG domes are formed on the top of the magma vents. There is a negative topography between the magma channels. There is a negative topography, a depression, between the dense magma vents. During the evolution of the dome, it will expand horizontally resulting in the narrowing of the greenstone belt and the appearance of "bag" style. They constitute the dome-and keel-structure. In our study, considering magmatism as a condition of lithosphere deformation is consistent with the facts from the Archean geological background. The magma vent array, as an important factor for lithosphere deformation, provides driving force for the formation of the dome-and-keel structure.

**Key words:** magma vent; Archean; dome-and-keel structure; numerical modeling

**资助项目:** 国家重点研发计划项目“华北古陆中新元古代原型盆地及差异改造”(2016YFC0601002); 国家自然科学基金重大研究计划“基于流体地球物理表征的新几内亚-所罗门弧俯冲起始动力学机制”(91958214, 91958215); 青岛海洋科学与技术试点国家实验室鳌山科技创新计划项目(2017ASKJ02); 青岛市创新领军人才计划(19-3-2-19-zhc)

**作者简介:** 董昊(1995—), 男, 硕士研究生, 从事构造地质学及其数值模拟研究, E-mail: donghao10000@stu.ouc.edu.cn

**通讯作者:** 戴黎明(1980—), 男, 副教授, 从事构造地质学及其数值模拟研究, E-mail: dlming@ouc.edu.cn

李三忠(1968—), 男, 教授, 从事构造地质学与海洋地质学研究, E-mail: sanzong@ouc.edu.cn

收稿日期: 2020-05-03; 改回日期: 2020-05-19. 周立君编辑

高温状态的早期地球经历了岩浆海与地幔反转等特殊地质过程<sup>[1-3]</sup>, 随后太古宙发生了大规模的岩浆活动<sup>[4-10]</sup>。该时期水平地应力较弱, 构造运动以垂向运动为主, 这与现今的板块构造体制有较大差异<sup>[8, 11-15]</sup>。太古宙的岩浆活动及同时期的垂向构造运动不仅反映了该时期地球的热力学状态, 还与诸多矿产资源的形成有着密切关联, 如 BIF 型铁矿<sup>[16-22]</sup>、钻石矿<sup>[23-29]</sup>、硫化物矿床等<sup>[30]</sup>。前人认为太古宙地球主要通过热管(Heat-Pipe)释放热量, 其表现形式为岩石圈内部分布有多个岩浆通道与软流圈地幔相互沟通<sup>[31-32]</sup>。因此, 岩浆通道不但是物质垂向增生和热量释放的通道, 也是太古宙壳-幔间相互作用的关键纽带, 具有重要的研究意义。岩浆活动是太古宙时期的重要地质过程, 当前研究缺乏对岩浆活动所引发岩石圈变形的关注, 未能将其与地表资料充分联系。一般调查手段主要着力于浅部构造变形样式和形成过程的分析<sup>[33-36]</sup>, 而难以恢复岩浆的侵入过程以及岩石圈的深浅部耦合过程。为了解决这一问题, Fischer 与 Gerya<sup>[35]</sup> 构建了以超级地幔柱为主导的单岩浆通道模型, 并以此模拟了玄武质岩浆的地表扩散过程和中、下地壳熔融的湿盖子构造。Sizova 等<sup>[37-38]</sup> 则模拟了 TTG 岩浆的演化过程, 但该研究简化了熔体的运动过程, 并没有考虑热管作用。因此, 在大规模岩浆活动背景下, 多个岩浆通道所产生的动力学效应还尚未明确。

为了充分研究太古宙岩浆活动, 特别是在多岩浆通道背景下所引发的动力学过程, 本文将基于二维有限差分方法, 通过对太古宙多通道岩浆条件的设置, 来模拟岩浆的侵入过程与岩石圈构造变形响应, 并进一步结合前人研究成果, 讨论岩浆作用与穹脊构造之间的密切联系。

## 1 实验原理

本研究基于 I2VIS 代码开展实验<sup>[39-48]</sup>。该代码基于有限差分方法, 将模拟区域按照网格进行划分, 通过“以直代曲的方法”化微分方程组为差分方程组并利用计算机求解, 并在此基础上结合了标记点-网格方法(Marker-in-cell Method)。它将岩石信息存储在均匀随机分布的标记点中, 随后通过插值的方式, 实现与差分网格的信息交换, 是一种欧拉点与拉格朗日点结合的方法。

数值模型受连续性方程、N-S 方程(纳维叶-斯托克斯方程)、热守恒方程共同约束。三种约束条件组成的方程组如下所示:

$$\begin{cases} \nabla v = 0 \\ \eta \Delta v_i = \frac{\partial P}{\partial x_i} - \rho g_i \\ \rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla q + H_r + H_s + H_L + H_a \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\nabla$  为散度,  $v$  为速度矢量,  $\eta$  为有效黏度,  $\Delta$  为拉普拉斯算子,  $v_i$  为速度矢量的方向分量,  $P$  为压力,  $\rho$  为岩石密度,  $g_i$  为重力加速度的方向分量, 其在垂直方向上为  $9.8 \text{ m/s}^2$ , 在其他方向为零,  $C_p$  为热容,  $T$  为温度,  $t$  表示地质时间,  $q$  代表热通量,  $H_r+H_s+H_L+H_a$  代表放射热、摩擦热、相变生热和绝热产热之和。二维模型中,  $i$  包括水平方向  $x$  和垂直方向  $z$ 。连续性方程的右侧为零, 代表模型为不可压缩模型。有效粘度的计算方法如下:

$$\eta = \frac{1}{\frac{1}{\eta_{\text{diff}}} + \frac{1}{\eta_{\text{disl}}}} \quad (2)$$

式中,  $\eta_{\text{diff}}$  为扩散蠕变的等效黏度,  $\eta_{\text{disl}}$  为位错蠕变的等效黏度。

当前应力  $\sigma$  若达到屈服应力  $\sigma_{\text{yield}}$  时, 则有效粘度为:

$$\eta = \frac{\sigma_{\text{yield}}}{2\dot{\epsilon}_{II}} \quad (3)$$

式中,  $\dot{\epsilon}_{II}$  是应变率第二不变量, 屈服应力  $\sigma_{\text{yield}}$  与压力线性相关。

岩石在固相线之下时为固态, 熔融比例  $M$  为 0; 在液相线之上时为液态, 熔融比例  $M$  为 100%。而在固液相线之间时, 岩石的部分熔融程度用下列式表示:

$$M = \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} \times 100\% \quad (4)$$

其中,  $M$  为熔融比例,  $T$  为岩石所处的温度,  $T_{\text{solidus}}$  是实验测得的固相线,  $T_{\text{liquidus}}$  则为液相线。

## 2 实验条件设置

本研究的模拟区域为  $879 \text{ km} \times 400 \text{ km}$ 。欧拉网格为不均匀网格, 模型中部的横向网格分辨率可达  $0.4 \text{ km}$ , 模型顶部的垂向分辨率可达  $1 \text{ km}$ 。模拟材料的性质参考了前人的研究结果<sup>[49]</sup>, 主要包括固态和熔融状态下的参考密度、热容、固液相线和流变学性质等, 具体所采用的流变学参数见表 1 与表 2。初始模型的圈层结构设置如下: 顶部具有  $10 \text{ km}$  厚的自由空气层, 绿岩带及沉积盖层厚  $3 \text{ km}$ , 地壳厚  $35 \text{ km}$ (上下地壳的厚度比例为  $3:4$ ), 剩余部分为地幔(图 1)。前人<sup>[4-10]</sup> 相关研究揭示太古宙发育了

表1 材料参数设置 (据 Ranalli and Donald<sup>[49]</sup>)

Table 1 Material properties setting

物质	状态	$\rho_0/$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$C_p/$ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$K^a/$ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$T_{\text{solidus}}^b/\text{K}$	$T_{\text{liquidus}}^b/\text{K}$	$H_l/$ $\mu\cdot\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$	$\alpha/$ $\text{K}^{-1}$	$\beta/$ $\text{MPa}$	粘滞性流变 参数 <sup>c</sup>	塑性性质 $\sin(\varphi_{\text{eff}})$
空气	—	1	100	20	—	—	0	0	0	A*	0
水	—	1000	3330	20	—	—	0	0	0	A*	0
沉积物	固态	2700	1000	K1	TS1	TL1	2	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	B*	0.15
	熔融	2500	1000	K1	TS1	TL1	2	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	G*	0.06
上陆壳	固态	2700	1000	K1	TS1	TL1	2	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	B*	0.15
	熔融	2500	1000	K1	TS1	TL1	2	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	G*	0.06
下陆壳	固态	3000	1000	K2	TS2	TL2	0.5	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	C*	0.15
	熔融	2500	1000	K2	TS2	TL2	0.5	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	G*	0.06
绿岩带	固态	3300	1000	K2	TS2	TL2	0.25	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	D*	0.15
	熔融	2900	1000	K2	TS2	TL2	0.25	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	H*	0.06
地幔	固态	3300	1000	K3	—	—	0.022	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	E*	0.6
	熔融	2700	1000	K3	—	—	0.022	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	E*	0.06

a.  $K1 = [0.64+807/(TK+77)]\exp(0.00004P)$ ;  $K2 = [1.18+474/(TK+77)]\exp(0.00004P)$ ;  $K3 = [0.73+1293/(TK+77)]\exp(0.00004P)$

b.  $P < 1200 \text{ MPa}$ ,  $TS1=889+17900/(P+54)+20200/(P+54)^2$ ;  $P > 1200 \text{ MPa}$ ,  $TS1=831+0.06P$ ,  $TL1=1262+0.09P$

$P < 1600 \text{ MPa}$ ,  $TS2=973-70400/(P+354)+778 \times 10^5/(P+354)^2$ ;  $P > 1600 \text{ MPa}$ ,  $TS2=935+0.0035P+0.0000062P^2$ ,  $TL2=1423+0.105P$

c. 类型A-H的具体参数详见表2。

表2 流变学参数设置 (据 Ranalli and Donald<sup>[49]</sup>)

Table 2 Rheological parameter setting

类别	流变性质	$E/\text{KJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	$V/\text{J}\cdot\text{MPa}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$	$n$	$A_D/\text{MPa}^{-n}\cdot\text{s}^{-1}$	$\eta_0^a/\text{Pa}\cdot\text{s}$
A*	空气/水	0	0	1.0	$1.0 \times 10^{-12}$	$1 \times 10^{18}$
B*	湿石英	154	0	2.3	$3.2 \times 10^{-6}$	$1.97 \times 10^{19}$
C*	An75	238	0	3.2	$3.3 \times 10^{-6}$	$4.80 \times 10^{24}$
D*	An75	238	0	3.2	$3.3 \times 10^{-4}$	$4.80 \times 10^{22}$
E*	无水橄榄岩	532	8	3.5	$2.5 \times 10^4$	$3.98 \times 10^{16}$
F <sup>tb</sup>	湿橄榄岩	470	8	4.0	$2.0 \times 10^3$	$5.01 \times 10^{20}$
G <sup>tb</sup>	长英质熔体	0	0	1.0	$2.0 \times 10^{-9}$	$5.00 \times 10^{14}$
H	铁镁质熔体	0	0	1.0	$1.0 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^{13}$

<sup>a</sup>  $\eta_0$ 表示为有效粘滞系数, 计算公式为:  $\eta_0 = (1/A_D) \times 10^{6n}$ ;

<sup>b</sup> 熔融的长英质熔体, F\*表示熔融的沉积物和地壳。

大规模的岩浆活动, 因此, 本文在圈层结构的基础上, 增设了数个岩浆通道作为岩浆侵入条件和热量释放条件。依据地幔柱的相关研究<sup>[50-52]</sup>, 岩石圈的岩浆活动乃至 TTG 的形成都可能与之相关, 因此, 岩浆通道的正下方设置有地幔柱。实验假定岩浆通道横向排列呈等间距分布。岩浆通道模型分为密集排布和稀疏排布两种, 用于对比岩浆通道间距及岩浆活动规模对岩石圈变形的影响。前者岩浆通道的间距约 50 km, 后者的间距为前者的一倍。岩浆通道内充满花岗质岩浆, 初始状态下熔融比例为 100%, 其材料性质等同于上地壳。

前人相关研究<sup>[33]</sup>表明, 太古宙岩石圈的平均温度要比现今状态高约 200 °C, 因此, 本模型的岩石圈底部温度被设置为近 1500 °C, 初始莫霍面温度

被设置为 900 °C, 地表温度恒为 0 °C。此外, 假设岩浆通道与地幔柱的温度比背景温度高 200 °C, 模型不与外界发生物质交换和动量交换。各边界均为自由滑移边界, 以此来减少模型的边界效应。左右热边界维持热平衡, 顶底部热边界温度恒定。

## 3 实验结果

### 3.1 物质场及地形演化过程

在多个岩浆通道作用下的岩石圈变形结果如图 2 所示。初始时刻时, 岩石圈尚未发生变形, 地形线水平。上地壳下部温度为 500 °C, 莫霍面温度为 900 °C。密集多岩浆通道的初始状态见图 2a。

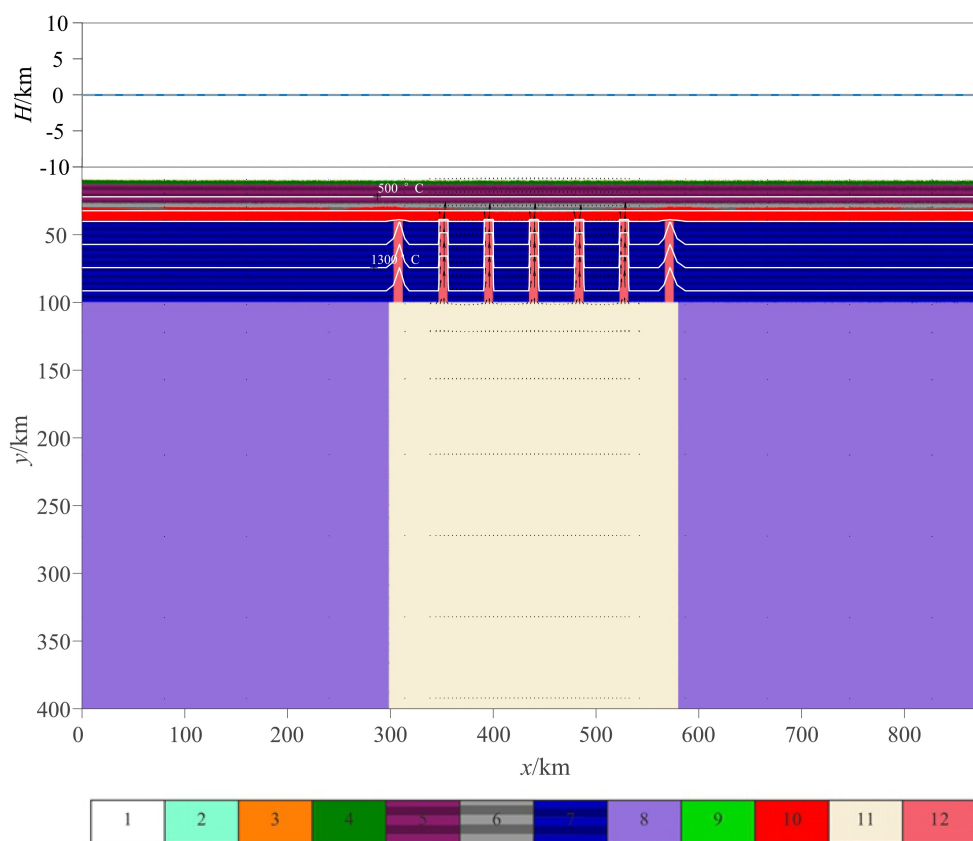


图1 初始模型

1. 空气, 2. 水, 3. 沉积物, 4. 绿岩带, 5. 上地壳, 6. 下地壳, 7. 岩石圈地幔, 8. 软流圈地幔, 9. 绿岩带熔体, 10. 地壳熔体, 11. 地幔柱, 12. 岩石圈的热管。

Fig.1 The initial model

1. Air, 2. Water, 3. Sediment, 4. Greenstone, 5. Upper Crust, 6. Lower Crust, 7. Lithospheric Mantle, 8. Asthenosphere Mantle, 9. Melt Greenstone, 10. Melt Crust, 11. Mantle Plume, 12. Heat Pipe.

由于温度较高, 岩浆通道内的岩浆均发生了部分熔融, 且表现出低密度和低黏度特征, 因此具有明显的向上侵入的趋势。随后岩浆沿岩浆通道向上侵入, 地壳受岩浆驱动而产生弯曲。岩浆通道上方的地壳减薄剧烈, 岩浆通道之间的地壳发生水平挤压, 从而形成拗陷, 岩浆通道上方产生正地形, 如图 2b 所示, 岩浆受阻后聚集, 形成近半球状岩浆房。岩浆的侵入导致局部地温梯度显著上升, 这加剧了热传导效应。与此同时, 少量的地幔柱物质可沿着岩浆通道快速向上侵入, 并最终保留在岩石圈地壳之中。如果考虑岩石圈的拆沉过程和地幔柱对流过程, 这一模拟结果很可能解释了太古宙钻石的形成机制。

图 2c 至图 2d 显示了岩浆穿透地表并逐渐冷却结晶的过程。岩浆逐步向上侵入, 最终穿透地表形成穹窿, 穹窿与正地形一一对应。绿岩带与古老地壳产生显著变形, 在穹窿之间形成拗陷。由于存在水平密度差, 较轻的岩浆向四周延伸, 随后逐渐冷

却。较重的地壳则向下拆沉, 这些拆沉物质伴随温度的升高, 最终发生熔融。该过程导致绿岩带不断下沉, 并在剖面图上呈现出马蹄状的特征。由此, 岩浆穹窿与绿岩带共同组成穹脊构造。最后, 岩浆结晶完毕, 地表不断冷却并逐渐稳定。值得注意的是, 在该段时期内, 地幔柱沿岩石圈底部发生水平扩张, 能够造成岩石圈地幔失稳, 并最终导致其发生拆离。从地形演化上看, 在穹窿形成之初地形起伏最为剧烈, 绿岩带拗陷中心产生了明显的沟谷, 随后沟谷的面积随着时间演化而不断缩小, 最终收缩成线状, 见图 3d。

图 2 右侧为稀疏的多岩浆通道的模拟结果, 该模型共包含 3 个岩浆通道, 岩浆通道的间距是左侧结果的两倍。模拟结果显示, 岩浆通道的间隔较大, 岩石圈变形作用并不显著, 岩浆在穿透地表时引发变形的范围较为局限。绿岩带的剪切变形不明显且不发生拆离。在岩浆冷却结晶过程中, 虽然穹窿的出露面积变大并导致绿岩带水平缩短, 但未

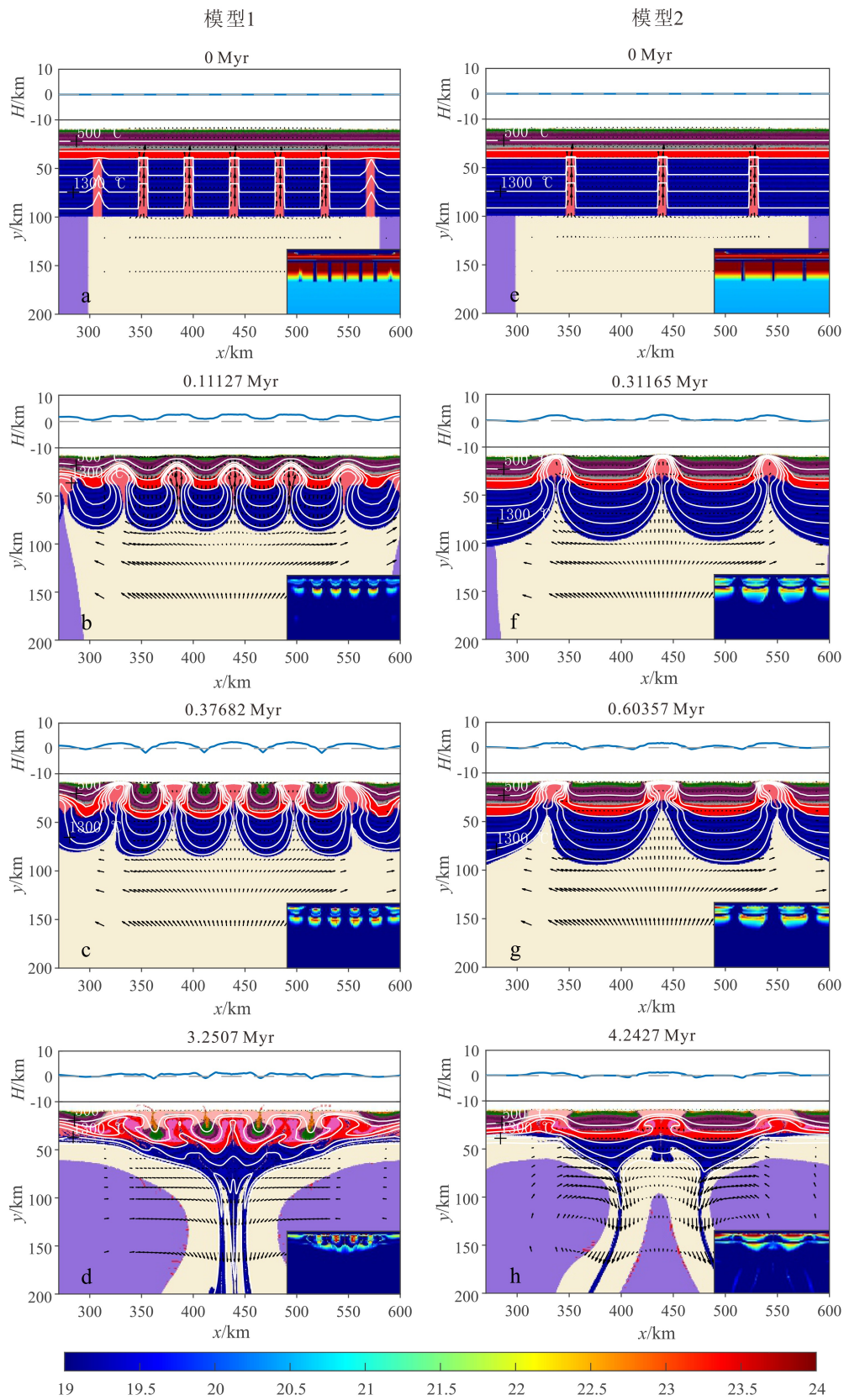


图2 岩石圈演化结果

初始莫霍面温度为900 °C。图a至d为密集多岩浆通道的演化结果，e至h为稀疏多岩浆通道的演化结果。子图显示了粘度的对数。

Fig.2 Lithosphere evolution results

The initial temperature in Moho is 900 °C. (a)-(d) A series of time-dependent results of dense magmatic vents. (e)-(h) A series of time-dependent results of sparse magmatic vents. The sub figures show viscosity which has been processed by log10.

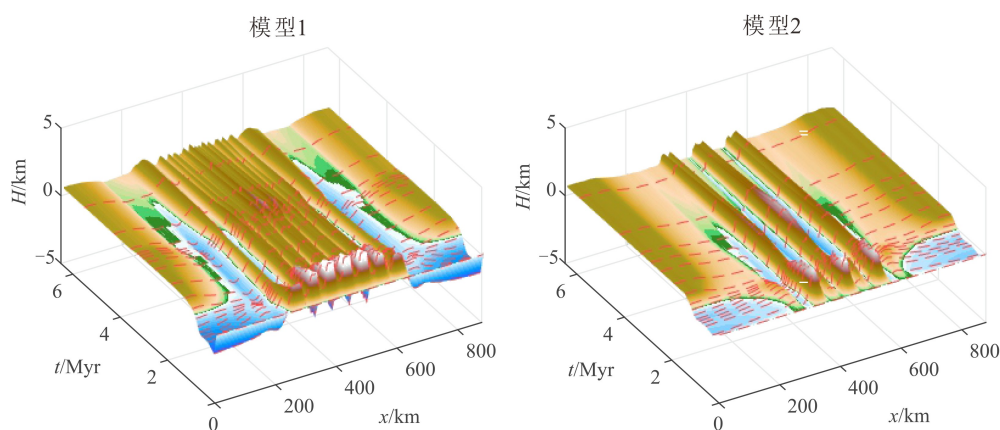


图3 地形的连续时空演化

水平范围为整个模拟区域,红色虚线代表实验数据连线。

Fig.3 Spatio-temporal evolution of topography

The horizontal display range is the entire modeling area, red dotted lines indicate the data.

能使绿岩带形成“钱袋子”构造。从地形上看,岩浆侵入区形成构造地形的高正值区。而在岩浆通道之间亦表现出构造地形的正值,但明显小于岩浆侵入区。这是由于远距离岩浆侵入过程中水平挤压作用只能导致地壳水平缩短抬升,并不能形成拗陷。与密集的多岩浆通道模型类似,该模型的岩石圈地幔在岩浆通道和地幔柱联合作用下,同样能够发生失稳并拆沉。

从地形演化过程的对比结果来看(图3),两种模型的不同之处在于密集模型中岩浆通道周围地区的负地形持续存在约5百万年,而在稀疏模型中负地形持续时间较短,约3百万年。此外,稀疏模型的周围地形变化比密集模型地形变化平缓,影响范围更广。密集模型中负地形所占面积要明显大于稀疏模型。

### 3.2 偏应变率第二不变量的演化过程

第二应变率不变量代表了剪切应变的强度,它主要取决于应力与有效粘度。该值在模型中的变化范围较大,因此对模拟结果取对数进行展示。地壳乃至岩石圈的第二应变率在岩浆侵入时显著升高,在岩浆结晶后逐渐降低。这意味着岩浆作用为构造变形提供直接驱动力,也意味着变形过程随岩浆侵入事件的结束而消失,地壳表层不发生失稳。

在密集岩浆通道模型中,剪切变形最为剧烈的区域是岩浆通道及其四周,该区域在图4a至图4c呈红色至橘红色,代表了在岩浆沿着岩浆通道快速侵入过程中所产生的高剪切应变环境。通道内岩浆的粘度显著低于围岩,岩浆的侵入还提升了地温梯度,两种因素共同造成了岩石圈的局部弱化,并

明显降低岩石圈强度,增大了岩石圈的剪切。因此,该区域变形最为剧烈。在各岩浆通道之间的绿岩带的第二应变率相比其周缘来说明显偏低,代表其处于低剪切应变状态。对比图4b与图4c可知,在侵入过程岩浆未穿透地表时,初期绿岩带变形更为剧烈。而在岩浆穿透地表阶段,穹脊构造已经产生,此时绿岩带相对稳定。

对深部而言,软流圈地幔的第二应变率值维持较高水平,这一结果的产生原因是密度相对较低的地幔柱物质引发了垂向运动。在地幔柱活动减弱后,软流圈的剪切应变有所减小。随着岩石圈地幔受地幔柱扰动最终发生重力失稳,软流圈的第二应变率不变量再一次升高。这表明重力失稳重新加剧了软流圈的垂向运动,但对地壳的影响较小。

稀疏模型的初期演化结果与密集模型结果相似。应变主要集中在岩浆通道处。在岩浆通道间,第二应变率不变量的过渡较为平缓,水平方向的空间变化相对于密集模型来说要小很多。在模型演化末期,绿岩带不再发生明显应变,图中呈大面积的深蓝色表明地壳整体处于稳定状态。

对比两种模型可知,虽然模型材料设置与背景温度结构均相同,但应变程度却不相同。除初始时刻以外,稀疏模型的第二应变率不变量要显著低于密集模型。这充分地反映了稀疏模型不能有效地产生剪切应变,亦不能为穹脊构造的产生提供良好的条件。

## 4 讨论

岩浆通道的形成源于大规模的岩浆作用,前人

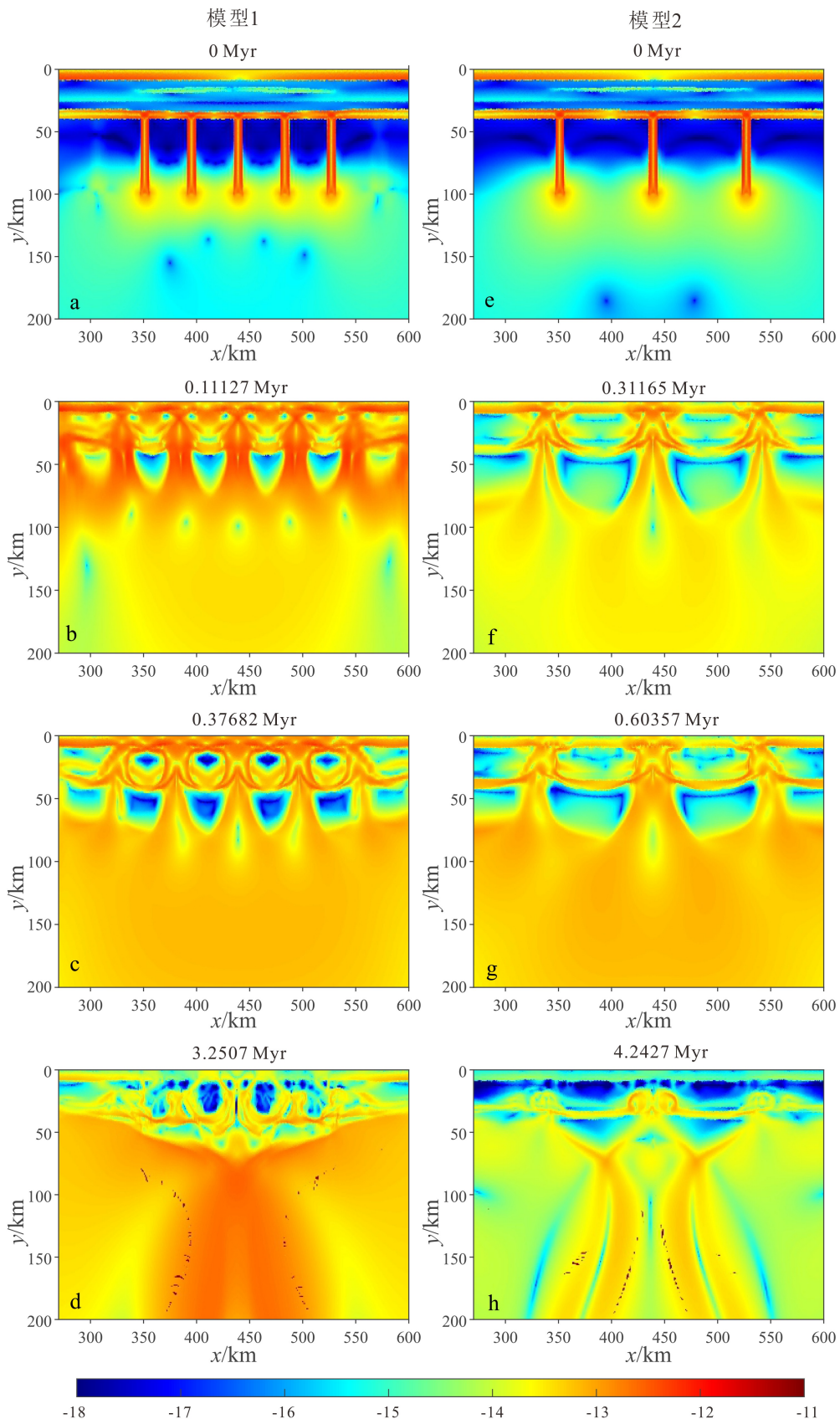


图4 第二应变率不变量结果

为了更加直观, 本文在显示时将其取以10为底的对数。

Fig.4 Results of the second strain rate invariant

It has been processed by log10 in order to be more intuitive.

研究表明太古宙时期的岩浆活动十分频繁<sup>[4-10]</sup>。前人认为岩浆的形成与超级地幔柱作用密切相关<sup>[50-52]</sup>, 也有人认为岩浆由含水玄武岩产生<sup>[7, 53-56]</sup>。而 Moore 等人<sup>[31-32]</sup> 利用行星比较学与数值模拟的方法解释了频繁的岩浆活动并提出太古宙地球主要通过“热管”状的岩浆活动来释放热量。虽然岩浆的具体成因尚未明确, 但岩浆通道实际存在并对岩石圈造成了实质性的影响。地幔柱无法直接作用于地壳, 其主要作用是对岩石圈底部的活化与扰动。地幔柱的动力学过程打破了岩石圈平衡, 最终导致地幔物质坠离。这一过程在岩浆过程结束之后出现, 这表明地幔物质的坠离不是由岩浆直接驱动的。

数值模拟结果显示岩浆作用与岩石圈构造变形的产生存在着紧密的联系。岩浆提供了形成穹窿的物质条件。岩浆活动弱化了岩石圈强度, 提供了地壳形变的驱动力。岩浆通道是岩浆向上运动的重要途径, 岩浆的密度显著低于围岩, 使岩石圈形成了较强的水平不均一性。多个岩浆通道导致地表及岩石圈处于高应变状态。这一响应过程揭示了多个岩浆通道对岩石圈构造变形起到了重要的驱动作用。多个岩浆通道的存在为绿岩带的对称弯曲提供了可能。

岩浆在穿透地表后冷却结晶, 经过散热与水平扩张后固结成 TTG 穹窿。岩浆过程对绿岩带变形的影响随岩浆通道的间距而变化。密集排布的岩浆通道能够引发绿岩带乃至上下地壳的拗沉, 使绿岩带在岩浆侵入过程中逐渐收缩为线状并在剖面上呈现出“钱袋子”构造样式。地形变化则更加直观地证明了密集的岩浆通道能够产生一系列的高低起伏的穹窿及拗陷。稀疏模型则只能产生穹窿, 无法产生绿岩带拗沉, 也就无法产生穹脊构造。因此, 密集排布的岩浆通道与分布于在加拿大 Superior 克拉通<sup>[50]</sup>、印度南部的 Dharwar 克拉通<sup>[57]</sup>、澳大利亚西部的 Pilbala 克拉通<sup>[58]</sup> 和华北克拉通中东部内的花岗-绿岩带<sup>[48]</sup> 内的穹脊构造相对应。

由模拟结果可知, 穹窿和拗陷的面积并非一成不变的。对于密集岩浆通道条件来说, 侵入之初时的穹窿面积较小, 拗陷的面积较大, 拗陷的弯曲弧度较小。随着穹窿的横向扩张, 拗陷变得更加弯曲, 其面积也不断缩小, 最终绿岩带只出露一小部分。由此可见, 穹脊构造经过了从初期的不稳定状态到后期较为稳定直至固化的动力学演化。这一演化的本质是水平不均一物质在重力作用下的再平衡过程。

岩浆通道底部的第二应变率不变量显著高于

周围区域, 这表示岩浆通道能够促使地幔物质向上运动。同样地, 图 2 也显示出地幔物质能够通过岩浆通道穿过岩石圈地幔, 最终能够到达浅部。本文认为这一过程与钻石矿以及贵金属矿产的形成密切相关。绿岩带的第二应变率不变量极低, 这表明此时该处结构相对稳定。未设置岩浆通道的区域的绿岩带也未产生穹脊构造, 这表明穹脊构造的产生并非受绿岩带的重力作用驱动。稀疏模型的第二应变率不变量要显著低于密集模型, 也无法产生穹脊构造。该结果指示出岩浆通道的密集程度对岩石圈变形具有重要指示意义。密集程度与岩浆活动规模相对应, 这意味着大规模的岩浆活动是穹脊构造产生的必要条件之一, 也揭示了太古宙构造体制与现今板块构造体制的实质性差别。

## 5 结论

(1) 岩浆通道条件是太古宙岩石圈构造变形的重要控制条件, 并且与穹脊构造的产生有着密不可分的联系。岩浆活动弱化了岩石圈, 并为岩石圈演化提供了物质基础与驱动力。

(2) 密集的岩浆通道能够引发结构对称的绿岩带拗沉, 从而形成“钱袋子”样式。穹脊构造的形成过程受岩浆侵入及穹窿水平扩张控制, 并非由绿岩带下沉所主导。在穹脊构造形成过程中, 穹窿在水平方向上扩张并导致绿岩带收窄。

(3) 岩浆通道能够使地幔物质到达岩石圈浅部, 这为成矿作用提供了有利条件。岩浆活动的规模与岩石圈构造变形密切相关, 大规模的岩浆活动是穹脊构造的出现前提。

## 参考文献 (References)

- [1] Debaille V, Brandon A D, O'Neill C, et al. Early martian mantle overturn inferred from isotopic composition of nakhlite meteorites [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(8): 548-552.
- [2] Dhuime B, Hawkesworth C J, Cawood P A, et al. A change in the geodynamics of continental growth 3 billion years ago [J]. *Science*, 2012, 335(6074): 1334-1336.
- [3] 李三忠, 王光增, 索艳慧, 等. 板块驱动力: 问题本源与本质 [J]. *大地构造与成矿学*, 2019, 43(4): 605-643. [LI Sanzhong, WANG Guangzeng, SUO Yanhui, et al. Driving force of plate tectonics: Origin and nature [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2019, 43(4): 605-643.]
- [4] 刘大瞻, 刘跃文. 三道溜河地区太古宙岩浆-构造事件 [J]. *吉林地质*, 1994, 13(3): 46-54. [LIU Dazhan, LIU Yuewen. The archaic magma tectonic event of the sandaoliuhe area [J]. *Jilin Geology*, 1994, 13(3): 46-54.]



- [5] 赵国春, 孙敏, Wilde S A. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合[J]. 中国科学 D辑: 地球科学, 2002, 32(7): 538-549. [ZHAO Guochun, SUN Min, Wilde S A. Characteristics of Proterozoic tectonic units of the basement of the North China Craton and Proterozoic amalgamation [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2002, 32(7): 538-549.]
- [6] 翟明国. 华北克拉通的形成以及早期板块构造[J]. 地质学报, 2012, 86(9): 1335-1349. [ZHAI Mingguo. Evolution of the North China craton and early Plate Tectonics [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(9): 1335-1349.]
- [7] 吴鸣谦, 左梦璐, 张德会, 等. TTG岩套的成因及其形成环境[J]. 地质论评, 2014, 60(3): 503-514. [WU Mingqian, ZUO Menglu, ZHANG Dehui, et al. Genesis and diagenetic environment of TTG suite [J]. Geological Review, 2014, 60(3): 503-514.]
- [8] 李三忠, 戴黎明, 张臻, 等. 前寒武纪地球动力学(IV): 前板块体制[J]. 地学前沿, 2015, 22(6): 46-64. [LI Sanzhong, DAI Liming, ZHANG Zhen, et al. Precambrian geodynamics (IV): pre-plate regime [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(6): 46-64.]
- [9] 万渝生, 董春艳, 任鹏, 等. 华北克拉通太古宙TTG岩石的时空分布、组成特征及形成演化: 综述[J]. 岩石学报, 2017, 33(5): 1405-1419. [WAN Yusheng, DONG Chunyan, REN Peng, et al. Spatial and temporal distribution, compositional characteristics and formation and evolution of Archean TTG rocks in the North China Craton: a synthesis [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(5): 1405-1419.]
- [10] Kaur P, Chaudhri N, Eliyas N. Origin of trondhjemite and albitite at the expense of A-type granite, Aravalli orogen, India: evidence from new metasomatic replacement fronts [J]. Geoscience Frontiers, 2019, 10(5): 1891-1913.
- [11] Johnson T, Brown M, VanTongeren J. Sink or swim? The fate of Archean primary crust and the generation of TTG magmas[C]//EGU General Assembly 2013. Vienna, Austria: EGU, 2013: 2112.
- [12] Lana C, Tohver E, Cawood P. Quantifying rates of dome-and-keel formation in the Barberton granitoid-greenstone belt, South Africa [J]. Precambrian Research, 2010, 177(1-2): 199-211.
- [13] Li S Z, Zhao G C, Santosh M, et al. Paleoproterozoic structural evolution of the southern segment of the Jiao-Liao-Ji Belt, North China Craton [J]. Precambrian Research, 2012, 200-203: 59-73.
- [14] Gerya T. Precambrian geodynamics: concepts and models [J]. Gondwana Research, 2014, 25(2): 442-463.
- [15] 王伟, 翟明国, Santosh M. 鲁西太古宙表壳岩的成因及其对地壳演化的制约[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 59(8): 1583-1596. [WANG Wei, ZHAI Mingguo, Santosh M. The genesis of Archean supracrustal rocks in the western Shandong Province of North China Craton: Constraints on regional crustal evolution [J]. Science China Earth Sciences, 2016, 59(8): 1583-1596.]
- [16] 韩宁, 江思宏, 白大明, 等. 西澳大利亚伊尔岗克拉通铁矿床研究进展[J]. 地质通报, 2015, 34(6): 1086-1099. [HAN Ning, JIANG Sihong, BAI Daming, et al. The progress in the study of the iron ore deposits in Yilgarn Craton, Western Australia [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(6): 1086-1099.]
- [17] 彭俊, 袁杨森, 司建涛, 等. 坦桑尼亚维多利亚湖绿岩带变质火山岩地球化学特征及成岩机制[J]. 矿场勘查, 2018, 9(3): 485-494. [PENG Jun, YUAN Yangsen, SI Jiantao, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of the metavolcanics rocks in Victoria Lake greenstone belt, Tanzania [J]. Mineral Exploration, 2018, 9(3): 485-494.]
- [18] 翟明国. 华北克拉通构造演化[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 722-725. [ZHAI Mingguo. Tectonic evolution of the North China Craton [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 722-725.]
- [19] 张连昌, 翟明国, 万渝生, 等. 华北克拉通前寒武纪BIF铁矿研究: 进展与问题[J]. 岩石学报, 2012, 28(11): 3431-3445. [ZHANG Lianchang, ZHAI Mingguo, WAN Yusheng, et al. Study of the Precambrian BIF-iron deposits in the North China Craton: progresses and questions [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(11): 3431-3445.]
- [20] 南景博, 黄华, 王长乐, 等. 内蒙古固阳绿岩带条带状铁建造地球化学特征与沉积环境讨论[J]. 中国地质, 2017, 44(2): 331-345. [NAN Jingbo, HUANG Hua, WANG Changle, et al. Geochemistry and depositional setting of Banded Iron Formations in Guyang greenstone belt, Inner Mongolia [J]. Geology in China, 2017, 44(2): 331-345.]
- [21] 彭自栋, 张连昌, 王长乐, 等. 新太古代清原绿岩带下甸子BIF铁矿地质特征及含黄铁矿条带BIF的成因探讨[J]. 岩石学报, 2018, 34(2): 398-426. [PENG Zidong, ZHANG Lianchang, WANG Changle, et al. Geological features and genesis of the Neoproterozoic pyrite-bearing Xiadianzi BIF, Qingyuan greenstone belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(2): 398-426.]
- [22] 张连昌, 彭自栋, 翟明国, 等. 华北克拉通北缘新太古代清原绿岩带BIF与VMS共生矿床的构造背景及成因联系[J]. 地球科学, 2020, 45(1): 1-16. [ZHANG Lianchang, PENG Zidong, ZHAI Mingguo, et al. Tectonic setting and genetic relationship between BIF and VMS in the Qingyuan Neoproterozoic greenstone belt, Northern North China Craton [J]. Earth Science, 2020, 45(1): 1-16.]
- [23] Joly A, Miller J, McCuaig T C. Archean polyphase deformation in the Lake Johnston Greenstone Belt area: implications for the understanding of ore systems of the Yilgarn Craton [J]. Precambrian Research, 2010, 177(1-2): 181-198.
- [24] 罗迪柯, 陈靖, 姚仲友, 等. 南美洲圭亚那地盾北部绿岩带地质特征、典型金矿床及金成矿作用[J]. 地学通报, 2017, 36(12): 2197-2207. [LUO Dike, CHEN Jing, YAO Zhongyou, et al. Geological features of greenstone belt, typical gold deposits and gold mineralization in northern Guiana shield, South America [J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(12): 2197-2207.]
- [25] 孙武国, 廉涛, 刘冰. 中非共和国Bambari绿岩带地质特征及找矿意义[J]. 地质与资源, 2016, 25(2): 208-212. [SUN Wuguo, LIAN Tao, LIU Bing. Geological characteristics and prospecting significance of the Bambari greenstone belt in the Central African Republic [J]. Geology and Resources, 2016, 25(2): 208-212.]
- [26] 王建光, 彭俊, 袁杨森, 等. 坦桑尼亚西北部苏库马绿岩带含金石英脉成矿特征[J]. 世界地质, 2016, 35(4): 982-992. [WANG Jianguang, PENG Jun, YUAN Yangsen, et al. Mineralization characteristics of gold-bearing quartz veins in Sukumaland greenstone belt of northwestern Tanzania [J]. Global Geology, 2016, 35(4): 982-992.]
- [27] 张德成. 坦桑尼亚绿岩带型金矿[J]. 华北国土资源, 2016(3): 60-

61. [ZHANG Decheng. Greenstone belt type gold deposit in Tanzania [J]. *Huabei Land and Resources*, 2016(3): 60-61.]
- [28] 张克川, 爰文, 杨继兵, 等. 坦桑尼亚芒果金矿成矿地质特征及金赋存状态研究 [J]. *矿产勘查*, 2018, 9(4): 761-765. [ZHANG Kechuan, YI Aiwen, YANG Jibing, et al. Study on geological characteristics and gold occurrence of Manangu gold mine in Tanzania [J]. *Mineral Exploration*, 2018, 9(4): 761-765.]
- [29] 李俊生, 白德胜, 卫建征, 等. 坦桑尼亚马拉绿岩带金矿床地质特征 [J]. *矿产勘查*, 2018, 9(5): 977-984. [LI Junsheng, BAI Desheng, WEI Jianzheng, et al. Characteristics of gold deposits in Mara greenstone belt, Tanzania [J]. *Mineral Exploration*, 2018, 9(5): 977-984.]
- [30] 宋建潮, 王恩德, 贾三石, 等. 辽北-吉南地区太古宙矿产形成特点分析 [J]. *地质调查与研究*, 2008, 31(2): 125-129. [SONG Jianchao, WANG Ende, JIA Sanshi, et al. Archean characteristics of mineral formation in the region of Northern Liaoning Province and Southern Jilin Province [J]. *Geological Survey and Research*, 2008, 31(2): 125-129.]
- [31] Moore W B, Webb A A G. Heat-pipe earth [J]. *Nature*, 2013, 501(7468): 501-505.
- [32] Moore W B, Simon J I, Webb A A G. Heat-pipe planets [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 474: 13-19.
- [33] Henson P A, Blewett R S, Roy I G, et al. 4D architecture and tectonic evolution of the Laverton region, eastern Yilgarn Craton, Western Australia [J]. *Precambrian Research*, 2010, 183(2): 338-355.
- [34] Thébaud N, Rey P F. Archean gravity-driven tectonics on hot and flooded continents: controls on long-lived mineralised hydrothermal systems away from continental margins [J]. *Precambrian Research*, 2013, 229: 93-104.
- [35] Lin S F, Parks J, Heaman L M, et al. Diapirism and sagduction as a mechanism for deposition and burial of "Timiskaming-type" sedimentary sequences, Superior Province: evidence from detrital zircon geochronology and implications for the Borden Lake conglomerate in the exposed middle to lower crust in the Kapuskasing uplift [J]. *Precambrian Research*, 2013, 238: 148-157.
- [36] Fischer R, Gerya T. Early earth plume-lid tectonics: a high-resolution 3D numerical modelling approach [J]. *Journal of Geodynamics*, 2016, 100: 198-214.
- [37] Sizova E, Gerya T, Brown M, et al. What drives metamorphism in early Archean greenstone belts? Insights from numerical modeling [J]. *Tectonophysics*, 2018, 746: 587-601.
- [38] Sizova E, Gerya T, Stüwe K, et al. Generation of felsic crust in the Archean: a geodynamic modeling perspective [J]. *Precambrian Research*, 2015, 271: 198-224.
- [39] Gerya T V, Yuen D A. Characteristics-based marker-in-cell method with conservative finite-differences schemes for modeling geological flows with strongly variable transport properties [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2003, 140(4): 293-318.
- [40] Li Z H, Xu Z Q, Gerya T, et al. Collision of continental corner from 3-D numerical modeling [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 380: 98-111.
- [41] Liao J, Gerya T. Influence of lithospheric mantle stratification on craton extension: insight from two-dimensional thermo-mechanical modeling [J]. *Tectonophysics*, 2014, 631: 50-64.
- [42] Li Z H. A review on the numerical geodynamic modeling of continental subduction, collision and exhumation [J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(1): 47-69.
- [43] 刘泽, 戴黎明, 李三忠, 等. 东海陆架盆地南部中生代成盆过程的数值模拟 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(4): 167-180. [LIU Ze, DAI Liming, LI Sanzhong, et al. Numerical simulation of mesozoic tectonic processes in the southern part of East China Sea continental shelf basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(4): 167-180.]
- [44] Huangfu P, Li Z H, Gerya T, et al. Multi-terrane structure controls the contrasting lithospheric evolution beneath the western and central-eastern Tibetan plateau [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3780.
- [45] Dai L M, Li S Z, Li Z H, et al. Dynamics of exhumation and deformation of HP-UHP orogens in double subduction-collision systems: numerical modeling and implications for the Western Dabie Orogen [J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 182: 68-84.
- [46] 马芳芳, 楼达, 戴黎明, 等. 俯冲板片熔融柱的数值模拟: 上覆板块破坏及动力地形效应 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(5): 186-196. [MA Fangfang, LOU Da, DAI Liming, et al. Numerical simulation of subduction-induced molten plume: Destruction of overriding plate and its dynamic topographic responses [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(5): 186-196.]
- [47] 陶建丽, 楼达, 戴黎明, 等. 中国东部大陆边缘中生代晚期增生过程的数值模拟: 以那丹哈达为例 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(5): 174-185. [TAO Jianli, LOU Da, DAI Liming, et al. Numerical simulation of Late Mesozoic accretion process along the continental margin of East China: A case study of the Nadanhada Terrane [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(5): 174-185.]
- [48] 刘昕悦, 李伟民, 刘永江, 等. 辽东鞍山地区太古代构造样式及其数值模拟 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(4): 1071-1084. [LIU Xinyue, LI Weimin, LIU Yongjiang, et al. Archean tectonic pattern and its numerical simulation in Anshan area, eastern Liaoning Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(4): 1071-1084.]
- [49] Ranalli G, Murphy D C. Rheological stratification of the lithosphere [J]. *Tectonophysics*, 1987, 132(4): 281-295.
- [50] Bédard J H. A catalytic delamination-driven model for coupled genesis of Archean crust and sub-continental lithospheric mantle [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(5): 1188-1214.
- [51] Taylor J, Stevens G, Armstrong R, et al. Granulite facies anatexis in the Ancient Gneiss Complex, Swaziland, at 2.73 Ga: mid-crustal metamorphic evidence for mantle heating of the Kaapvaal craton during Ventersdorp magmatism [J]. *Precambrian Research*, 2010, 177(1-2): 88-102.
- [52] Smithies R H, Lu Y J, Johnson T E, et al. No evidence for high-pressure melting of Earth's crust in the Archean [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 5559.
- [53] Manikyamba C, Kerrich R, Polat A, et al. Arc picrite-potassic adakitic-shoshonitic volcanic association of the Neoproterozoic Sigegudda greenstone terrane, western Dharwar craton: transition from arc wedge

- to lithosphere melting [J]. *Precambrian Research*, 2012, 212-213: 207-224.
- [54] Liu F, Guo J H, Peng P, et al. Zircon U-Pb ages and geochemistry of the Huai'an TTG gneisses terrane: petrogenesis and implications for ~2.5 Ga crustal growth in the North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2012, 212-213: 225-244.
- [55] Wang Y F, Li X H, Jin W, et al. Eoarchean ultra-depleted mantle domains inferred from ca. 3.81 Ga Anshan trondhjemitic gneisses, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2015, 263: 88-107.
- [56] Gao L, Liu S W, Hu Y L, et al. Late Neoproterozoic geodynamic evolution: evidence from the metavolcanic rocks of the Western Shandong Terrane, North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 2020, 80: 303-320.
- [57] Van Kranendonk M J, Collins W J, Hickman A, et al. Critical tests of vertical vs. horizontal tectonic models for the Archaean East Pilbara Granite-Greenstone Terrane, Pilbara Craton, Western Australia [J]. *Precambrian Research*, 2004, 131 (3-4): 173-211.
- [58] Bouhallier H, Chardon D, Choukroune P. Strain patterns in Archaean dome-and-basin structures: the Dharwar craton (Karnataka, South India) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 135 (1-4): 57-75.