

# 海底地形对不同时间尺度岩浆供给变化的响应

贡晓瑞<sup>1,2</sup> 李江海<sup>1,2,†</sup> 吴桐雯<sup>1,2</sup> 宋珏琛<sup>1,2</sup>

1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871; † 通信作者, E-mail: jhli@pku.edu.cn

**摘要** 利用有限差分数值模拟方法, 恢复洋中脊地形的形成过程, 模型中岩浆供给按一定的时间周期和幅度规律性地变化。结果表明: 只有当岩浆供给变化周期的时间尺度大于在洋中脊同一侧形成两条断层的时间间隔时, 才能影响海底地形的形成过程并被记录。结合数值模拟实验结果和不同类型洋中脊的地形特征, 认为快速扩张洋中脊是唯一可能在地形上记录到米兰科维奇气候周期(偏心率(100 ka)、倾斜度(41 ka)和岁差(23 ka)) 3个时间尺度岩浆变化周期的洋中脊类型, 中速扩张洋中脊和部分岩浆供给充足慢速扩张洋中脊的地形可能与100 ka尺度的岩浆供给变化周期有关, 大部分慢速扩张洋中脊海底地形不受100 ka及以下的岩浆供给变化周期影响。

**关键词** 洋中脊; 断层; 岩浆供给; 气候变化周期

## Seafloor Bathymetry Response to Different Time Scale of Magmatic Supply Fluctuation

YUN Xiaorui<sup>1,2</sup>, LI Jianghai<sup>1,2,†</sup>, WU Tongwen<sup>1,2</sup>, SONG Juechen<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: jhli@pku.edu.cn

**Abstract** The finite-difference numerical simulation is used to reproduce the seafloor bathymetry near mid-ocean ridges. The magma supply in the model changes regularly with fluctuation period and amplitude. The results indicate that only when the magmatic supply fluctuation period is greater than the time interval between the formation of two faults on the same side of mid-ocean ridge, the formation process of the seafloor bathymetry can be influenced and recorded. Combined with numerical simulation results and different types of ocean ridge topography, this paper considers that the fast spreading mid-ocean ridge is the only ridges type that can record three magmatic supply fluctuation period of Milankovich cycles (eccentricity (100 ka), obliquity (41 ka) and precession (23 ka)) on the bathymetry. Bathymetry in mid-speed mid-ocean ridges and part of slow spreading mid-ocean ridges with sufficient magmatic supply may be related to the magmatic supply fluctuation period on the 100 ka time scale. seafloor bathymetry in most of the slow-spreading mid-ocean ridges is not affected by magmatic supply fluctuation period of 100 ka or less.

**Key words** mid-ocean ridge; fault; magmatic supply; climate change

以全球变化为核心的地球系统科学是当前研究热点<sup>[1]</sup>, 作为板块边界的大洋中脊是研究地球系统相互作用的重要场所。渐新世以来, 冰川周期引起的全球海平面变化幅度最大可以达到上百米<sup>[2]</sup>, 如此大幅度的海平面变化通过影响海底压强来影响洋

中脊岩浆的熔融速率和CO<sub>2</sub>等气体的释放量<sup>[3]</sup>。在冰期, 海平面降低导致洋中脊压力减小、岩浆熔融加剧以及岩浆供给增加, 并且释放更多的CO<sub>2</sub>等温室气体, 导致温度升高, 并加快冰期向间冰期的转换<sup>[4]</sup>。这一涉及岩浆供给变化与全球气候变化相互

反馈作用的过程是否能够在深海地形中得以记录,是近来研究中颇具争议性的问题<sup>[2-3,5-6]</sup>,其核心内容是多长时间尺度的岩浆变化周期能够影响海底地形的形成过程。

按照一定间距、平行于洋中脊走向排布的深海山脊是扩张中心最主要的海底构造特征,一般认为这种深海山脊是洋中脊附近正断层活动形成的<sup>[7-10]</sup>,这些深海山脊在平行洋中脊走向上的连续性整体上随着洋中脊扩张速率的增加而加强<sup>[11]</sup>。对快速扩张洋中脊(扩张速率>120 mm/a)——南太平洋洋中脊的研究表明,横穿洋中脊的地形剖面上具有100 ka的频谱峰值,并与全球海平面变化以及南极冰芯记录的CO<sub>2</sub>随时间变化频谱特征吻合<sup>[3]</sup>。Katz等<sup>[2]</sup>通过对中速扩张洋中脊——智利洋中脊(扩张速率为50~60 mm/a)和南极洲-澳大利亚洋中脊(扩张速率为60~80 mm/a)的穿轴地形剖面分析,甚至发现100, 41和23 ka 3个频谱峰值,并认为这与3个稳定的米兰科维奇气候周期(偏心率(100 ka)、倾斜度(41 ka)和岁差(23 ka))相对应,从而指出深海地形能够记录全球气候的变化。但是,Goff<sup>[12]</sup>和Olive等<sup>[13]</sup>指出,横穿中速扩张洋中脊(60 mm/a)的地形频谱峰值100 ka代表的是3 km左右的平均断层间距,而不是岩浆供给变化周期。Olive等<sup>[13]</sup>通过地球动力学数值模拟,恢复了深海山脊的形成过程,发现在没有气候周期引起的岩浆供给波动条件下,模拟结果也能与全球洋中脊地形较好地吻合。也有人指出Olive等建立的模型没有考虑岩浆喷出对海底地形的影响,从而有一定的局限性<sup>[14]</sup>。

本文通过二维黏-弹-塑性动力学数值模拟,探讨洋中脊附近地形的形成过程。与前人模型<sup>[13,15-16]</sup>不同的是,本文模型中不仅考虑洋中脊附近正断层的形成和发育过程,也模拟岩浆喷出对地形的影响。通过将模型结果与不同构造背景下的洋中脊地形特征进行对比,探讨岩浆供给变化对不同类型洋中脊地形的影响。

## 1 洋中脊扩张过程的数值模拟方法

Cannat等<sup>[17]</sup>认为,洋中脊附近的构造特征是岩浆-构造相互作用的结果。文献[15,18-20]中基于M值理论,成功地恢复洋中脊不同类型的海底构造特征。M值代表岩浆作用占板块扩张影响因素的权重,若M=1,表示板块扩张完全取决于岩浆作用;若M=0,表示板块扩张全部由断层作用驱动完成,

没有岩墙的增生过程。

本文建立的模型基于M值理论。M是瞬时值,而不是某个时段的平均值。考虑到由海平面周期变化引起的岩浆供给速率的变化,本文模型中M值呈周期性的变化:

$$M = M_0 + \Delta M \times \sin 2\pi Pt,$$

其中,ΔM为岩浆供给变化幅度,由海平面变化引起的ΔM值约为0.1<sup>[2]</sup>;P为岩浆供给的周期,可以在10~500 ka范围内变化;t表示时间(模型参数见图1)。M值随时间周期性地变化,当M<1时,断层作用和岩墙增生同时发生;当M>1时,板块的扩张全部由岩墙的增生作用完成。对冰岛和东非两个陆表扩张中心的观测结果也证明,只有当M>1时才会有岩浆喷出<sup>[21]</sup>。本文模型中定义M=1时,岩墙增生的速率和板块扩张速率相等。为了保证物质的体积守恒,在本文模型中设置岩浆喷出的速度为

$$V_{\text{ext}} = ((M - 1) \times H \times V) / W_{\text{ext}},$$

其中,H是洋中脊处的岩石圈厚度(km),V是全扩张速率(cm/a),W<sub>ext</sub>是岩浆喷发的范围(km<sup>2</sup>)。

本文利用FLAC (fast Lagrangian analysis of continua)有限差分法来解二维黏-弹-塑性连续性物质的物质和动量守恒公式<sup>[22-24]</sup>。在模型的左右边界施加25 mm/a的水平速度,上边界是自由边界,下边界施加静岩压力;物质遵守无水辉绿岩的流变学性质<sup>[25]</sup>,在600℃以上表现为弹-塑性变形,600℃以下表现为黏性变形;从地表往下,温度场随着深度线性地增加,在洋中脊处增加的速率最快,从而模拟洋中脊三角形状的岩石圈结构(图1)。对模型最中央的单元施加一定的应力,使其以2M×V的速度加宽,从而模拟岩墙的扩张过程;为了模拟断层的形成过程,物质的内聚力随着应变值的增加而减小<sup>[24,26]</sup>。其他边界条件的设置和物质的物理参数见图1,其中M=0.95,H=5 km,裂谷深度d表示裂谷最深处与平均深度(局部均衡面)之间的距离;岩墙增生的速率 $U_{\text{dike}} = M(M_0, d, t) \times V$ 。

## 2 数值模拟结果

为了探讨岩浆供给变化对喷出岩层的影响,本文在模型中用标记层<sup>[27]</sup>来追踪喷发物质的分布,结果如下。1)在保持岩浆供给变化周期一致的情况下,随着岩浆供给变化幅度增大(图2(a1)~(a3)),喷出岩层的厚度逐渐增大。Sinton等<sup>[28]</sup>的研究表明,

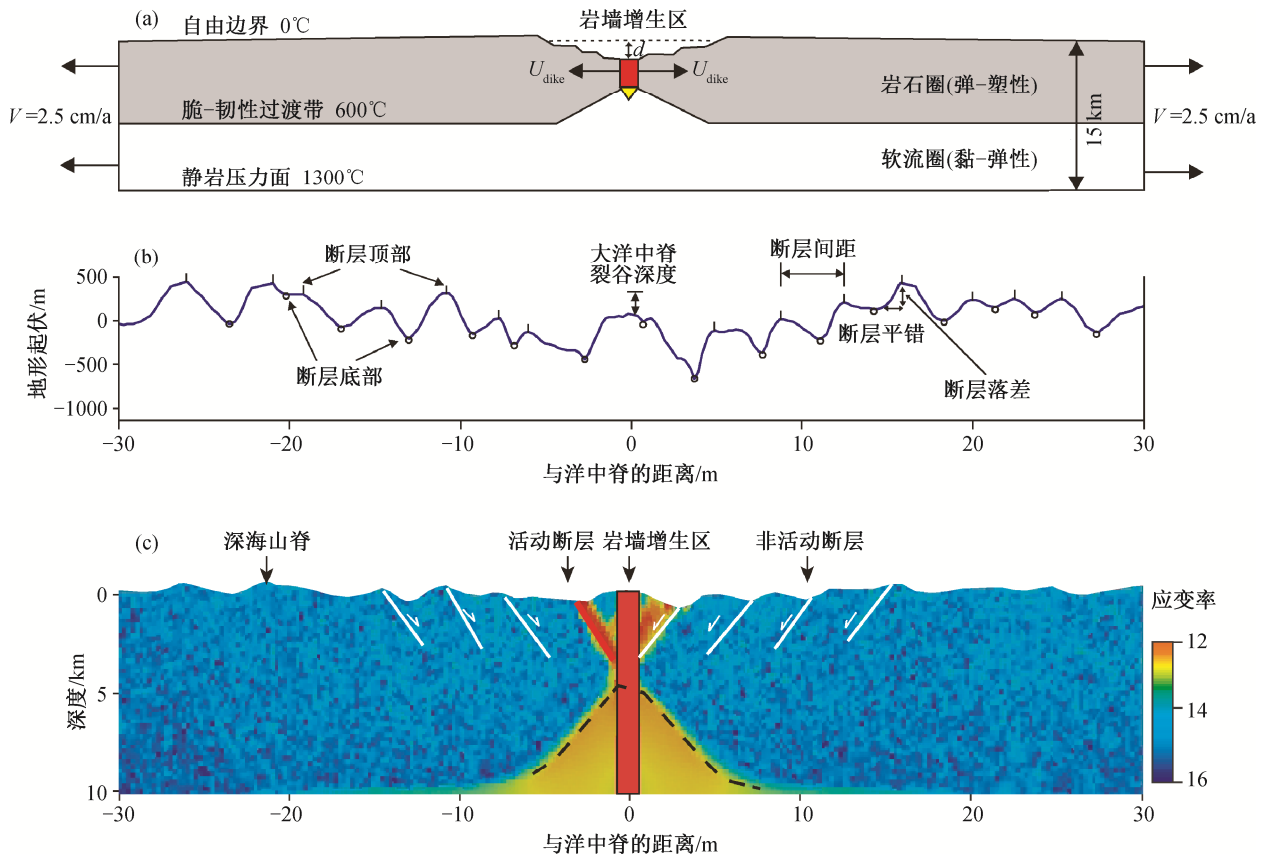


图 1 洋中脊扩张过程数值模拟的模型设置(a)与模拟结果(b)和(c)

Fig. 1 Numerical simulation model setting of mid-ocean ridge spreading process (a) and simulation results ((b) and (c))

海底单次岩浆喷发量随着扩张速率增大而减小。如果单次岩浆喷发量能够反映岩浆供给变化幅度，那么本文结果显示，在一定范围内，随着扩张速率增加，喷出岩层的厚度将逐渐减小，这与观测结果<sup>[29]</sup>相吻合。2) 在保持岩浆供给变化幅度一致的情况下，随着岩浆供给变化周期增大(图 2(b1)~(b3))，喷出层的分布逐渐变得不连续，也与观测结果<sup>[30]</sup>相吻合。

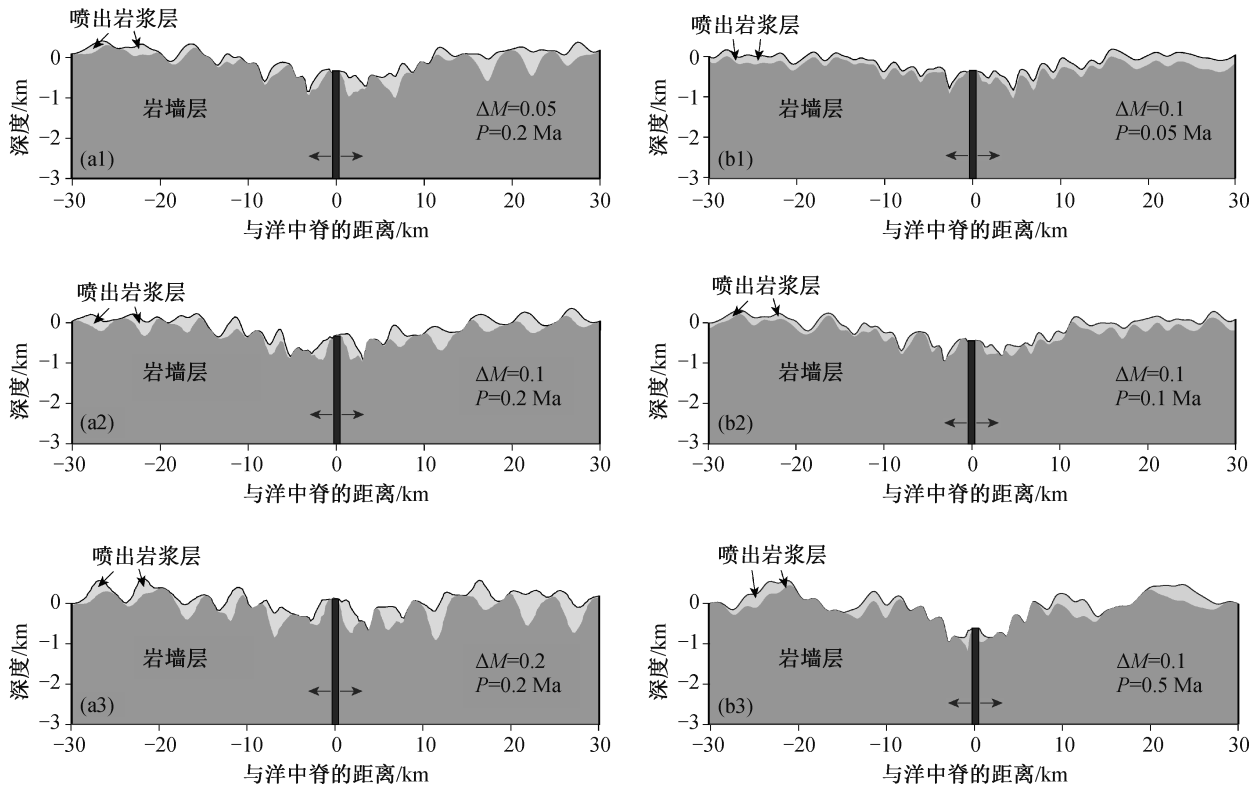
地形剖面 and 岩石圈变形是验证模拟结果的最直接证据。为了更好地与观测结果对比，我们对模型计算得到的地形曲线进行断层特征识别。结果表明，当岩浆供给周期小于 140 ka 时，断层的平均间距都是 3.4 km，不受岩浆供给变化周期影响，而地形频谱曲线上仅显示 3.4 km 的距离周期，没有体现岩浆周期对地形的影响(图 3)。当岩浆供给周期超过 140 ka 后，断层间距将受到岩浆供给周期的影响，并且二者线性相关，相关系数即为板块扩张速率。这一结果与没有考虑岩浆喷出作用的模拟结果<sup>[13,16]</sup>相似：在岩浆供给变化周期小于洋中脊同一侧两个断层代表的时间间隔情况下，岩浆供给变化

周期不会影响海底断层之间的间距。断层的平均间距主要受  $M$  的平均值和岩石圈结构的影响<sup>[15,18]</sup>。在本文模型的设置中， $M$  的平均值为 0.9，洋中脊处的岩石圈厚度为 5 km。在洋中脊两侧 5 km 范围内，岩石圈厚度逐渐增大，岩石圈底界与水平面的夹角为 45°，模拟计算得到的断层平均间距为 3.4 km，所代表的时间为 140 ka。改变上述 3 个关键参数( $M$  值、洋中脊处的岩石圈厚度以及岩石圈随远离洋中脊增厚的速率)中的任何一个，会得到不同的平均断层间距，可与全球不同构造位置的洋中脊特征<sup>[16,18]</sup>对比。

### 3 讨论

#### 3.1 岩浆供给变化周期对慢速扩张洋中脊不同构造位置的影响

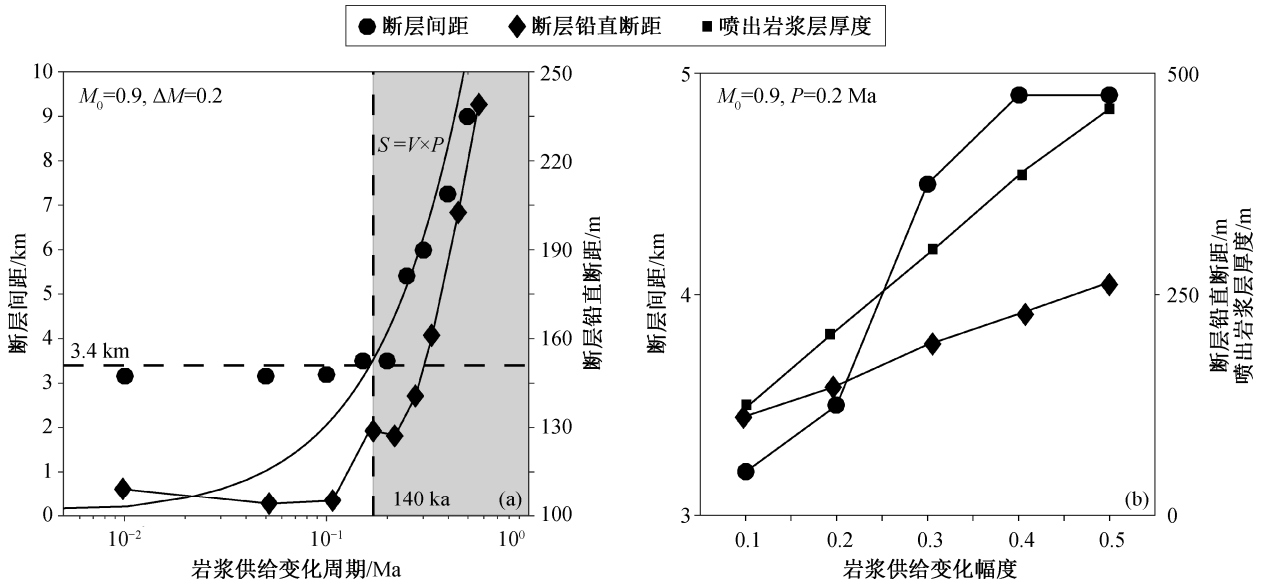
为了与模拟结果对比，本文对中印度洋洋中脊 10°45'S 附近的地形曲线进行频谱分析，讨论岩浆供给变化周期对海底地形的影响。作为研究案例的洋中脊段长度为 67 km，全扩张速率为 37.3 mm/a，属



(a1)~(a3)显示不同岩浆供给变化幅度, (b1)~(b3)显示不同岩浆供给变化周期; 黑色区域为岩墙增生区, 箭头指示增生方向

图2 岩浆供给周期对喷出岩层分布的影响

Fig. 2 Effect of magmatic supplies period on the distribution of eruption layer



(a)中灰色区域表示当岩浆供给变化周期大于140 ka时, 断层间距与变化周期线性相关, 相关系数为板块扩张速率

图3 岩浆供给变化周期(a)(修改自文献[19])和岩浆供给变化幅度(b)对断层间距和断层铅直断距的影响

Fig. 3 Effect of periods of magmatic supply fluctuation (a) (modified from Ref. [19]) and magmatic supply fluctuation amplitude (b) on fault spacing and roughness amplitude

于典型的慢速扩张洋中脊<sup>[31]</sup>。本文采用的多波束地形数据<sup>[31]</sup>是韩国海洋局大地航次(R/V ONNURI)在2010—2013年的航次中获得的,精度为50 m,数据覆盖洋中脊两侧30 km范围。参照文献[2],本文采用傅立叶频谱分析方法。

地形频谱分析的目的是将连续的地形起伏数据通过空间域转化为频率域数据,以便分析其中是否存在特定的周期性变化。为此,我们在研究区洋中脊的中段和末端分别选取两条与洋中脊走向正交的地形曲线(图4(a))。在进行频谱分析之前,先对地形曲线进行预处理:1)为了减小低频信号对地形曲线的影响,去掉波长大于10 km的长波趋势(图4(b));2)对50 m精度的原始地形数据进行插值处理,使采样点精度达到10 m。

采用多窗谱分析法,对选取的两条剖面进行空间频域分析。两条取自同一段洋中脊的剖面在频谱特征上具有明显的差异。剖面1具有明显的两个距离峰值,分别为4500和2000 m。以19.6 mm/a为半扩张速率,计算得到这两个距离峰值对应的时间周期分别是220和100 ka,这与前人对中速扩张洋中脊的频谱分析结果<sup>[2]</sup>一致。剖面2具有一个明显的5000 m距离峰值,对应的时间周期为250 ka。剖面2的距离周期明显大于剖面1,且两条剖面都没有小于2000 m的距离周期(即100 ka的时间周期),这与西北印度洋卡斯伯格洋中脊的频谱分析结果<sup>[32]</sup>一致。同一洋中脊的不同构造位置显示完全不同的地形特征,表明慢速扩张洋中脊的穿轴剖面的地形特征主要受局部构造作用控制,而不受全球海平面变化引起的岩浆供给变化周期控制。

### 3.2 岩浆供给变化周期对不同扩张速率洋中脊地形的影响

对不同构造位置的洋中脊海底地形的频谱分析结果显示,快速扩张洋中脊具有明显的100 ka<sup>[3]</sup>;中速扩张洋中脊<sup>[2,32]</sup>和慢速扩张洋中脊的洋脊段中部(图4中剖面1)也具有明显的100 ka频谱峰值,这种峰值的产生是平均断层间距对地形的影响还是岩浆供给变化周期对地形的影响,目前存在争议;在慢速扩张洋中脊的末端,洋中脊地形曲线没有显示100 ka左右的峰值,但显示与断层间距相当的峰值200 ka(图4中剖面2)。

洋中脊构造-岩浆过程的地球动力学数值模拟结果显示,只有当岩浆供给周期大于断层间距代表

的时间周期时,岩浆供给变化周期才会被海底地形频谱记录。受洋中脊岩石圈结构和岩浆供给速率的影响,断层间距随着洋中脊的扩张速率增加而减小<sup>[11,33]</sup>。在快速扩张洋中脊,正断层规模较小,平均断层间距小于500 m<sup>[34]</sup>,代表的时间周期大约为30~40 ka(图5);在中速扩张洋中脊,断层规模相对较大,平均断层间距为2000 m<sup>[8,35]</sup>,代表的时间周期为80~100 ka(图5);在慢速扩张洋中脊,断层规模沿洋中脊轴向差异较大<sup>[9,36-37]</sup>,在岩浆供给比较充足的洋脊段,断层平均间距为2000 m左右,代表的时间周期为100~120 ka,而在洋中脊末端,断层的平均间距可以到达5000 m甚至更长,代表200 ka甚至更长的时间周期。

综上所述,偏心率(100 ka)、倾斜度(41 ka)和岁差(23 ka)这3个稳定的米兰科维奇气候周期在快速扩张洋中脊深海地形上显示两个甚至3个周期特征;在中速扩张洋中脊和部分岩浆供给充足的慢速扩张洋中脊可能显示偏心率周期(100 ka),但在频谱特征上容易与正断层平均间距的距离峰值混淆;在大部分慢速扩张洋中脊,偏心率、倾斜度和岁差不会在地形上有所显示,地形上显示的距离距离峰值代表断层的平均间距。数值模拟结果也显示,与岩浆供给变化周期直接相关的洋中脊喷发物质(厚度为100 m级别)的分布相比,慢速扩张洋中脊两侧的正断层规模是影响海底地形的主要因素。

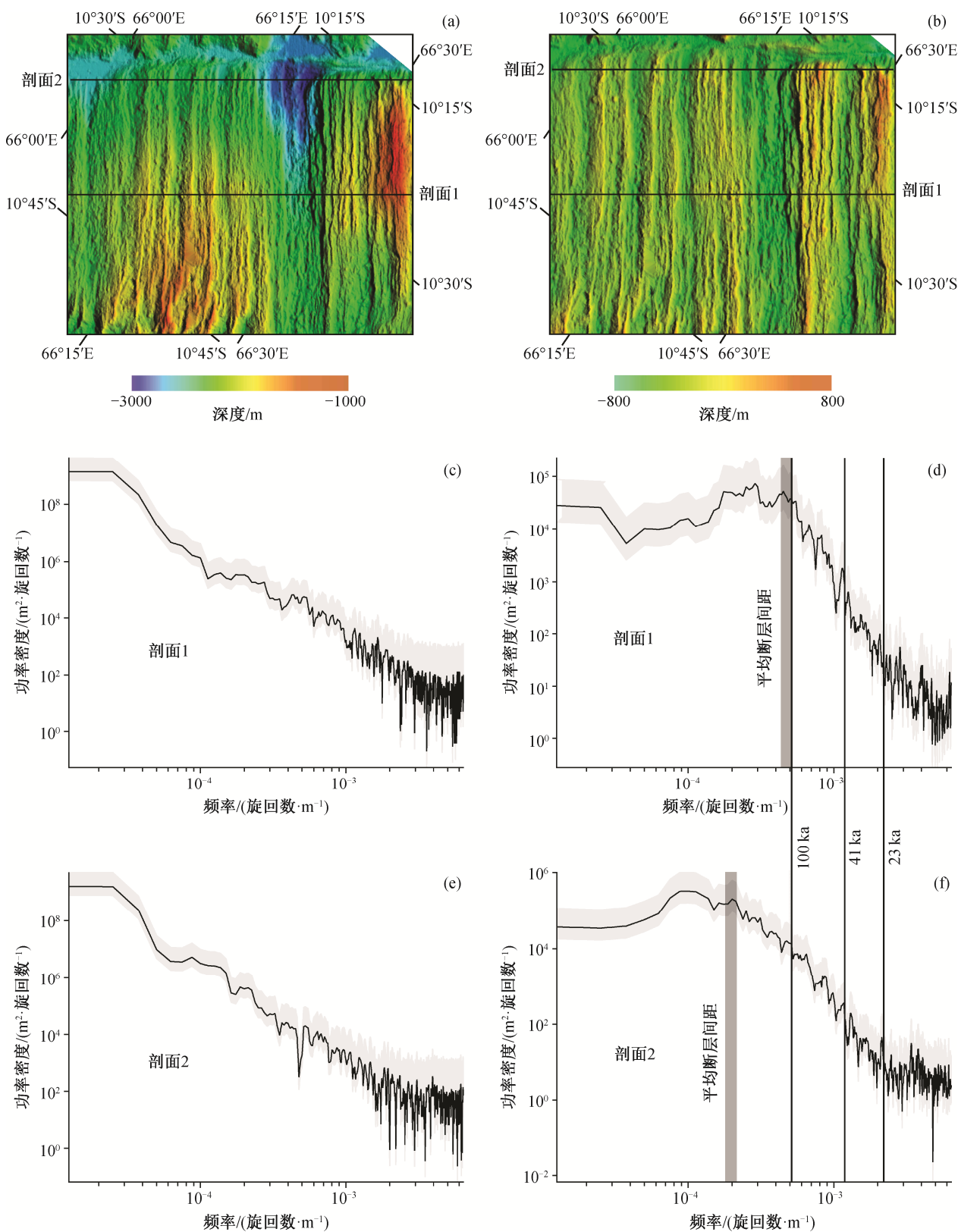
## 4 结论

本文通过数值模拟,恢复海底地形的形成过程。根据模拟结果,并结合不同类型洋中脊的地形特征,得到以下结论。

1) 在本文设置的模型中,当岩浆供给变化周期小于140 ka时,岩浆供给变化周期不会影响地形特征;当岩浆周期变化大于140 ka时,岩浆供给变化周期和扩张速率控制地形特征。特征周期值140 ka代表平均断层间距与扩张速率的比值,随着扩张速率的增加而减小。

2) 对中印度洋洋中脊地形曲线频谱分析的结果显示,在洋中脊段中部,频谱图上显示2 km的距离峰值,而在洋中脊末端,频谱图上显示5 km的距离峰值。这种距离周期峰值反映的只是局部断层间距,而不是全球的海平面变化特征。

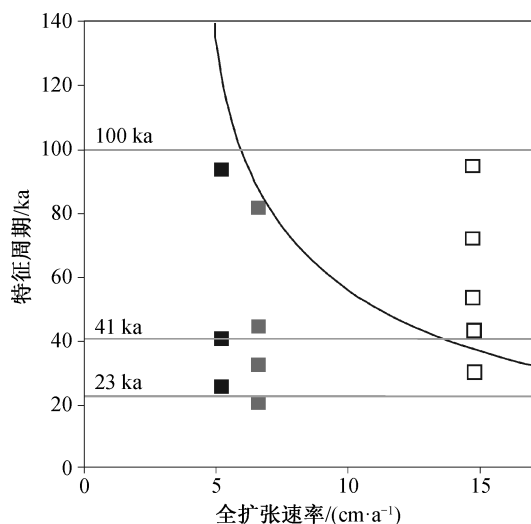
3) 综合不同构造位置的频谱分析和数值模拟



(a) 原始地形数据<sup>[31]</sup>; (b) 去掉长波趋势处理后的数据; (c) 剖面1的原始地形数据<sup>[31]</sup>; (d) 剖面1处理后数据的频谱分析结果; (e) 剖面2的原始地形数据<sup>[31]</sup>; (f) 剖面2处理后数据的频谱分析结果

图4 中印度洋洋脊10°45'S段洋中脊末端和洋中脊中央地形剖面频谱分析结果

Fig. 4 Spectrum analysis of topographic profile in the end and middle segment of Central Indian Ridge 10°45'S



黑色实线代表断层间距随洋中脊扩张速率的变化;灰色实线代表不同的米兰科维奇气候周期;黑色方块、灰色方块和黑色正方形分别代表智利洋中脊、南极洲-澳大利亚洋中脊和南太平洋洋中脊的频谱峰值<sup>[3,8]</sup>

图5 岩浆供给变化周期对不同扩张速率洋中脊地形的影响  
Fig. 5 Effect of magmatic supply fluctuation periods on Bathymetry of mid-ocean ridges with different spreading rates

实验结果, 本文认为, 3个稳定的米兰科维奇气候周期(偏心率(100 ka), 倾斜度(41 ka)和岁差(23 ka))在快速扩张洋中脊的地形上可能有明显的响应; 在中速扩张洋中脊和部分慢速扩张洋中脊的海底地形上响应不明显, 并且容易与断层间距代表的距离峰值混淆; 在大部分慢速扩张洋中脊, 深海地形主要受正断层控制, 几乎不受偏心率(100 ka)及以下的岩浆供给变化周期影响。

致谢 感谢北京大学地球与空间科学学院博士研究生刘仲兰提供数值模拟方法以及对论文初稿提出的建设性意见。

### 参考文献

- [1] 汪品先. 走向地球系统科学的必由之路. 地球科学进展, 2003, 18(5): 795-796
- [2] Katz R F, Crowley J W, Langmuir C H. Glacial cycles drive variations in the production of oceanic crust // AGU Fall Meeting Abstracts. San Francisco, 2012: 1237-1240
- [3] Tolstoy M. Mid-ocean ridge eruptions as a climate valve. Geophysical Research Letters, 2015, 42(5): 1346-1351
- [4] Middleton J L, Mukhopadhyay S, Langmuir C H, et al. Millennial-scale variations in dustiness recorded in Mid-Atlantic sediments from 0 to 70 ka. Earth & Planetary Science Letters, 2018, 482: 12-22
- [5] 李三忠, 张国伟, 刘保华. 洋底动力学——从洋脊增生系统到俯冲消减系统. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 39(3): 434-443
- [6] Tucholke B E, Olive J A, Behn M D. The structure of oceanic core complexes controlled by the depth distribution of magma emplacement. Nature Geoscience, 2010, 3(7): 491-495
- [7] Carbotte S M, Smith D K, Cannat M, et al. Tectonic and magmatic segmentation of the global ocean ridge system: a synthesis of observations. Geological Society London Special Publications, 2016, 166(6): 738-742
- [8] Howell S M, Ito G, Behn M D, et al. Magmatic and tectonic extension at the Chile Ridge: evidence for mantle controls on ridge segmentation. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2016, 17(6): doi: 10.1002/2016GC006380
- [9] Macdonald K C. Mid-ocean ridges: fine scale tectonic, volcanic and hydrothermal processes within the plate boundary zone. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1982, 10(1): 155-190
- [10] Shaw P R, Lin J. Causes and consequences of variations in faulting style at the Mid-Atlantic Ridge. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1993, 98(B12): 21839-21851
- [11] Small C. Global systematics of mid-ocean ridge morphology // Buck W R, Delaney P T, Karson J A, et al. Faulting and magmatism at mid-ocean ridges. Washington DC: American Geophysical Union, 1998, 106: 1-26
- [12] Goff J A. Comment on "Glacial cycles drive variations in the production of oceanic crust". Science, 2015, 349: 1237-1240
- [13] Olive J A, Behn M D, Ito G, et al. Sensitivity of seafloor bathymetry to climate-driven fluctuations in mid-ocean ridge magma supply. Science, 2015, 350: 310-313
- [14] Huybers P, Langmuir C H. Delayed CO<sub>2</sub> emissions from mid-ocean ridge volcanism as a possible cause of late-Pleistocene glacial cycles. Earth & Planetary Science Letters, 2016, 457: 238-249
- [15] Buck W R, Lavie L L, Poliakov A N. Modes of faulting at mid-ocean ridges. Nature, 2005, 434: 719-723
- [16] Garrett I, Behn M D. Magmatic and tectonic exten-

- sion at mid-ocean ridges: 2. origin of axial morphology. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2013, 9(9): 1–20
- [17] Cannat M, Sauter D, Mendel V, et al. Modes of seafloor generation at a melt-poor ultraslow-spreading ridge. *Geology*, 2006, 34(7): 605–608
- [18] Behn M D, Ito G. Magmatic and tectonic extension at mid-ocean ridges: 1. controls on fault characteristics. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2013, 9(8): 1–22
- [19] Liu Z, Buck W R. Magmatic controls on axial relief and faulting at mid-ocean ridges. *Earth & Planetary Science Letters*, 2018, 491: 226–237
- [20] Tucholke B E, Behn M D, Buck W R, et al. Role of melt supply in oceanic detachment faulting and formation of megamullions. *Geology*, 2008, 36(6): 455–458
- [21] Wright T J, Sigmundsson F, Pagli C, et al. Geophysical constraints on the dynamics of spreading centres from rifting episodes on land. *Nature Geoscience*, 2012, 5(4): 242–250
- [22] Cundall P A. Numerical experiments on localization in frictional materials. *Ingenieur-Archiv*, 1989, 59(2): 148–159
- [23] Lavier L L, Buck W R, Poliakov A N B. Factors controlling normal fault offset in an ideal brittle layer. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2000, 105(B10): 23431–23442
- [24] Buck W R, Delaney P T, Karson J A, et al. Mechanics of stretching elastic-plastic-viscous layers: applications to slow-spreading mid-ocean ridges // *Faulting and magmatism at mid-ocean ridges*. American Geophysical Union, 2013: 305–323
- [25] Mackwell S J, Zimmerman M E, Kohlstedt D L. High-temperature deformation of dry diabase with application to tectonics on Venus. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1998, 103(B1): 975–984
- [26] Buck W R, Poliakov A N B. Abyssal hills formed by stretching oceanic lithosphere. *Nature*, 1998, 392: 272–275
- [27] Gerya T. Dynamical instability produces transform faults at mid-ocean ridges. *Science*, 2010, 329: 1047–1050
- [28] Sinton J, Bergmanis E, Rubin K, et al. Volcanic eruptions on mid-ocean ridges: new evidence from the superfast spreading East Pacific Rise, 17°–19°S. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2002, 107(B6): ECV3-1–ECV3-20
- [29] Buck W R, Carbotte S M, Mutter C. Controls on extrusion at mid-ocean ridges. *Geology*, 1997, 25: 935–938
- [30] Carbotte S, Mutter C, Mutter J, et al. Influence of magma supply and spreading rate on crustal magma bodies and emplacement of the extrusive layer: insights from the East Pacific Rise at lat 16°N. *Geology*, 1998, 26(5): 455–458
- [31] Pak S J, Moon J W, Kim J, et al. Widespread tectonic extension at the Central Indian Ridge between 8°S and 18°S. *Gondwana Research*, 2017, 45: 163–179
- [32] 邹卓延. 西北印度洋卡尔斯伯格脊扩张演化及其全球变化响应[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2016
- [33] Chen Y, Morgan W J. Rift valley/no rift valley transition at mid-ocean ridges. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1990, 95(B11): 17571–17581
- [34] Carbotte S M, Macdonald K C. Comparison of seafloor tectonic fabric at intermediate, fast, and super fast spreading ridges: influence of spreading rate, plate motions, and ridge segmentation on fault patterns. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1994, 99(B7): 13609–13631
- [35] Goff J A, Ying M, Anjana S, et al. Stochastic analysis of seafloor morphology on the flank of the Southeast Indian Ridge: the influence of ridge morphology on the formation of abyssal hills. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1997, 102(B7): 15521–15534
- [36] Escartín J, Cowie P A, Searle R C, et al. Quantifying tectonic strain and magmatic accretion at a slow spreading ridge segment, Mid-Atlantic Ridge, 29°N. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1999, 104(B5): 10421–10437
- [37] Shaw P R. Ridge segmentation, faulting and crustal thickness in the Atlantic Ocean. *Nature*, 1992, 358: 490–493