

The Small-Scale Mantle Convection and the Correlating with Sequence Stratigraphic*

Xiaolong Zhou, Hao Liu[#], Chunchen Zhao

The School of Ocean, China University of Geosciences, Beijing
Email: [#]lhcugb@163.com

Received: Oct. 17th, 2013; revised: Nov. 12th, 2013; accepted: Nov. 21st, 2013

Copyright © 2013 Xiaolong Zhou et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Xiaolong Zhou et al. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian

Abstract: The concept of small-scale mantle convection has been proposed for more than 20 years. We use it to explain some of the more unusual geological phenomena, such as the rapid uplift of the Tibetan Plateau and the Tianshan etc. These tectonic subsidence and uplift are a direct impact on the division of sequence boundaries as well as the formation time. According to Petersen's numerical simulations, it shows that small-scale convection driven stratigraphic sequences occur at periods of 2 to 20 million years. By correlating the third-order sequences, it is very important for the regional tectonic movements and sea level changes. Although small-scale mantle convection has little effect on the seafloor topography, it affected the passive and active continental margins, inland plastic and rigid lithosphere very differently. The author holds that the existence of small-scale mantle convection should be considered when dividing the sequences.

Keywords: Small-Scale Convection; Stratigraphic Sequences; Sea Level; Sequence Division

小尺度地幔对流及其与层序地层学的相关性*

周小龙, 刘 豪[#], 赵春晨

中国地质大学(北京)海洋学院, 北京
Email: [#]lhcugb@163.com

收稿日期: 2013年10月17日; 修回日期: 2013年11月12日; 录用日期: 2013年11月21日

摘 要: 小尺度地幔对流理念的提出距今已有 20 多年, 人们用它来解释一些较异常的地质现象, 如青藏高原、天山的快速隆起等。这些构造的沉降与隆升直接影响着层序界面的划分, 其形成时间也影响着层序级次的划分。根据 Petersen 的数值模拟实验显示, 小尺度地幔对流的作用周期为 2~20 个百万年, 与三级层序的周期范围最为吻合, 对于区域构造的升降及海平面变化具有不可忽略的影响。虽然小尺度地幔对流对海底地形影响不大, 但对于被动和主动大陆边缘, 内陆塑、刚性岩石圈均有影响。笔者认为在进行层序划分时应考虑小尺度地幔对流的存在。

关键词: 小尺度地幔对流; 层序地层; 海平面; 层序划分

1. 引言

自 1948 年 Sloss 等提出层序概念以来, 层序地层

*基金项目: 国家大型油气田及煤层气开发重大专项(2008ZX05023-002-001-003; 2011ZX05023-002-005)。

[#]通讯作者。

学开始在地质学中崭露头角。1977 年 Vail 等结合地震钻井资料, 提出了地震地层学。1988 年, Vail 和 Posamentier 提出并确立了经典层序地层学理论。1989 年, Galloway 提出了成因层序地层学。1994 年, Cross

等提出了高分辨率层序地层学。层序地层学在近 30 年来发展迅速,应用广泛,已成为地质学中的一门重要学科。

自 1978 年 Richter 等提出小尺度地幔对流的概念,小尺度地幔对流以解决较快速的地质沉降或抬升假说出现。80 年代到 90 年代,小尺度地幔对流有了较快发展,Roecker 等人及 MELT 地震小组皆利用地震资料检测到小尺度地幔对流在 500~700 km 深度的存在。现今,白武明等认为青藏高原和天山的构造抬升可能与小尺度地幔对流有关。

沉积层序是层序地底界均为整合面的一定地质时期内的沉积体^[1],其发育主要受 4 大要素控制,即构造沉降、海平面升降、沉积物供给、气候因素。其中地层不整合是受控于海平面变化还是构造作用,要结合不同级别层序进行分析。小尺度地幔对流对于三级层序的影响较大,其时间范围为 2~20 个百万年,对于区域构造和海平面变化具有不可忽略的影响。笔者因此考虑小尺度地幔对流对层序的影响,提出了有小尺度地幔对流影响的层序地层级次划分方案。

2. 地幔对流的发展

1889 年 Fisher 结合自己的地质认识提出地幔对流的概念以来,人们首次注意到它的存在。1931 年 Holmes 首次提出地幔对流假说,他认为地幔内部的温度差异,导致重力不稳定,引起热对流和物质交换,从而形成地幔对流。1935 年, Haskell 定量地确定了

地幔对流为流体性质,认为地幔具有 1020~1021 Pa.s 的粘度^[2]。而后有很多研究者进行了修正,但该粘度值变化不大。虽然这是一个很大的粘度值,但是以百万年为尺度的地质年代中,地幔还是表现出了流体性质,并且具备产生热对流的物理条件。通过许多学者对地幔对流进行的研究,而后发展了作用范围更小、作用周期更短的小尺度地幔对流,尤其是天山和青藏高原的快速隆升很可能与小尺度地幔对流有关。以下是地幔对流学说发展的几个重要时期(表 1)。

3. 地幔对流的模式

至今为止,很多学者都肯定地幔对流存在热交换,但是否存在物质交换或如何进行物质交换的问题上进行了争论,对地幔对流的模式说法不一。主要以热交换、物质交换共存的全地幔对流,和只存在热交换不存在物质交换的分层地幔对流两种说法为代表,经过不断发展提出了其他的地幔对流模式,包括小尺度地幔对流。

3.1. 全地幔对流

全地幔对流认为上下地幔之间不仅存在热交换,也存在物质交换。1977 年, Jordan^[3]用 S 波获得鄂霍茨克地震的结果显示,千岛-勘察加板块刺入到下地幔,佐证了全地幔对流的观点。1984 年, C-reager 分析了来自太平洋西北部的 14 个中、深源地震的 4040P 波和 PKIKP 波的走时,指出千岛-勘察加板块至少刺

Table 1. Some important stages of development of mantle convection hypothesis
表 1. 地幔对流说发展的几个重要阶段

序号	观点	依据	作者	提出时间
1	最早提出地幔对流概念	基于当时地质认识的猜想	Fisher	1889 年
2	最早提出地幔对流假说	对当时的大陆漂移说的合理解释	Holmes	1931 年
3	确定地幔的流体性质	测量出地幔具有 $10^{20}\sim 10^{21}$ Pa.s 的粘度	Haskell	1935 年
4	大洋中存在上地幔小尺度地幔对流	分析地震剪切波分裂的结果表明,在东太平洋中脊区域上有上地幔小尺度对流的存在,空间尺度为 500~700 km	MELT 地震小组	1992 年
5	首次运用数值模拟技术论证地幔对流的存在	层析成像和接收函数反演的结果	Roecker, Kosalev 等	1993 年
6	陆地上,在西天山亦存在上地幔小尺度对流	根据上地幔间断面转换震相走时的延迟时间,推断天山下方 410 km 间断面上移了 35 km	Chen 等	1996 年
7	我国提出,天山的构造运动和青藏高原的隆起与小尺度地幔对流有关	天山造山带远离欧亚板块和印度板块的碰撞边界,仅用板块的相互运动产生的挤压很难解释天山造山带强烈的地壳运动过程,推断小尺度地幔对流可能存在并影响其隆起	白武明等	2007 年

入到 900~1000 km 的深度(下地幔深度)^[4]；1986 年，Creager 又研究发现，在玛利亚纳和太平洋西北部的其它俯冲区下方，板块进入了下地幔，刺入深度达到了 1000 km 以上^[5]。1997 年，Kerr^[6]通过地震转换波、层析成像等研究，证实有些地幔柱是从核幔边界上涌而抵达岩石圈的。这些研究和发现，强有力地证明了全地幔对流假说。

3.2. 分层地幔对流

支持分层地幔对流的学者认为，在地球地幔中普遍存在的深度为 670 km 或 660 km 的地震间断面上、下，由化学成分变化引起的密度变化和热边界层反映的粘滞系数的差异，将起到对地幔对流的阻碍作用。因此，上、下地幔之间不存在物质交换。1979 年，Jeanloz 等^[7]研究得出，上、下地幔的大部分物质在化学成分上是不同的，不能通过地幔对流的方式来达到均一，即使不存在化学分层作用，由深度引起的对流形态的变化也会使地幔岩石在漫长的地质时期中发生分层。地幔中某些区域存在分层对流是不可避免的。1997 年，Hofmann^[8]通过研究大洋中脊、火山岛弧、大洋海岛玄武岩和大陆溢流玄武岩等，得出同类熔岩的同位素特征具有显著的相似性，不同类岩石则显著不同，从化学数据上佐证了地幔对流的分层性。

3.3. 其他地幔对流假说

基于全地幔对流和分层地幔对流假说，很多学者分别提出了新的观点。1999 年，Albarede 等^[9]提出地幔不充分混合模型，认为地幔对流可以囊括上下地幔全部，但仍然不能使所有地幔物质充分混合，因此仍然保存地球化学所要求的两个源区。1998 年和 1999 年，Lay^[10]和 Becker^[11]分别提出并发展地幔团块模型，认为下地幔中存在一些未亏损地幔的团块，粘滞性较大，密度适度较高，内部生热的正浮力为本身高密度所抵消而不致浮升。因此在存在全地幔对流时，总是悬浮在下地幔内，化学上不会与亏损地幔融混，但地幔热柱有时会带出其部分物质形成岩浆岩。1999 年，Kellogg^[12]提出了拉瓦灯模型的观点，他认为将分层对流边界从 660 km 深度撤到了 1000 km 以下到核幔边界之间相当大的动态范围内；下地幔内的确存在未亏损的地幔，具有相当量的放射性产热元素，以及一些

关键的同位素；层析成像结果也表明 1000 km 以下结构与以上不是十分连续的。Hilst^[13]也赞同了该模型的提出。

3.4. 小尺度地幔对流

在地幔对流的基础上，如果有足够大的扰动作用，重力不稳定进一步发展，导致在上地幔形成局部的、小规模的地幔对流。1978 年，Richter 等^[14]最早提出小尺度地幔对流这一概念，他们认为地幔中某种形式的小于 700 km 尺度的对流是难以避免的。80 年代，Vinnik 等^[15]人发现西天山存在地幔的上涌，认为西天山的大幅度抬升与小尺度的地幔对流有关。不久 Roecker 等^[16]利用层析成像技术和接收函数反演，印证了 Vinnik 的观点。90 年代初，MELT 地震小组^[17]分析地震剪切波分裂的结果表明，在东太平洋中脊区域上有上地幔小尺度对流的存在，其空间尺度为 500~700 km。近几年，白武明等认为，天山造山带远离欧亚板块和印度板块的碰撞边界，仅用板块的相互运动产生的挤压很难解释天山造山带强烈的地壳运动过程。因此，他们推测天山的构造运动和青藏高原的隆起与小尺度地幔对流有关。

4. 小尺度地幔对流的成因假说

4.1. 小尺度地幔对流的形成机理

Haskell^[18]定量地确定了地幔具有 $10^{20}\sim 10^{21}$ Pa.s 的粘度，在以百万年为尺度的地质年代中，地幔还是表现出了流体性质，并且具备产生热对流的物理条件：地幔中温度梯度略高于地幔物质的绝热自压温度梯度。因此可以假定地幔对流为牛顿粘滞流体，在流体瑞利数超过临界瑞利数时，其上地幔中将有热量对流发生，此时上地幔中物质密度将由温度的扰动而产生不均匀性，岩石圈中地幔物质的密度要大于在绝热温度梯度和压力条件下同样深度地幔物质的密度，因此从力学上就存在重力的不稳定^[19]，从而形成地幔对流。在全球大尺度板块构造运动的背景下(如板块汇聚或分离)，所产生的扰动作用，使这种重力不稳定进一步发展，导致在上地幔形成局部的、小规模的地幔对流，即小尺度地幔对流。这种对流受负浮力的驱动，它将导致上部岩石圈地幔相对冷的物质下沉，下部的物质上升，同时使岩石圈底部加热，并且加快了上

地幔的冷却(如图 1 所示)。

4.2. 小尺度地幔对流的动力机制

一般认为驱动地幔对流的力源有两种：地幔物质密度横向不均匀性以及地核和地幔本身的加热作用。前者使地幔产生了重力对流，而后者使地幔产生热对流。其外部动力源是核-幔边处的“正浮力”源和岩石圈地幔的“负浮力”源。产生正浮力源的机制有三种：来自地核的热流；来自地核但密度小于地幔物质的物质流动以及地幔致密物质侵入地核。其中第一种是动力学行为，后两种是纯理论上的^[20]。引起负浮力的机制有两种：岩石圈板块的冷却作用和浮力地壳的连续形成作用，前者一定发生且是主要机制^[21]。地幔内部动力源是来自于地幔中放射性元素的辐射加热作用、剪切应变加热作用^[22]和过渡带中的相变加热作用^[23]，不过它们的加热作用是微不足道的，在一般的计算中可以忽略。因此，在一般的研究中，常常只考虑了两种地幔对流的驱动力：来自岩石圈板块的冷却作用所产生的负浮力和来自于地核的加热作用所产生的正浮力。但是，支持地幔对流的热流不可能全部来源于地核，也不可能全部来源于地幔内部^[24]，因此仅考虑由来自地核的加热作用是不够的，它只是一种近似的替代。如果考虑重力地幔对流的作用，当它在上地幔产生足够大的动力时，小尺度地幔对流形成。

地球重力场观测^[25]、大地水准面异常的观测^[26]、地震层析成像以及热点分布规律^[27]表明上地幔中存在小尺度对流，最具有说服力的直接观测是 MELT(地幔电磁和地震层析成像)地震小组分析地震剪切波分裂的结果，在东太平洋中脊区域上有上地幔小尺度对流的存在，同时显示出两种不同的对流图样：面包圈和 Benard 对流(图 1)。在地幔内部条件下，对流都是非稳态，并且在大尺度非稳态流的背景下，存在比它

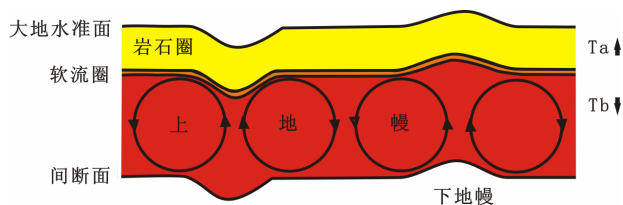


Figure 1. The schematic diagram of small-scale mantle convection (Ta Temperature of lithosphere, Tb Temperature of the upper lithosphere)

图 1. 小尺度地幔对流示意图(Ta 岩石圈温度, Tb 上地幔温度)

们速度大得多的小尺度对流^[28]。

虽然上地幔小尺度对流并不控制全球大尺度板块构造运动及动力学，但它对区域或板块内部动力学可能会起到重要的作用。对南太平洋火山链^[26]和海洋水深^[29]的解释以及以区域均衡重力异常为基本条件对上地幔小尺度对流基本图式的反演^[30]均证明了这一点。

5. 小尺度地幔对流与层序地层学的相关性

层序地层的发育主要受海平面升降、构造沉降、沉积物供给、气候因素四大因素控制。小尺度地幔对流主要影响前两者。

5.1. 小尺度地幔对流与地形变化相关性

对于小尺度地幔对流对于地形的影响，众说纷纭。有的学者认为该对流会引起构造沉降，形成盆地。也有一些学者认为该对流会产生隆起作用，形成高山。笔者通过阅读大量文献，认为应结合区域地质背景，具体问题具体分析。

5.1.1. 对海底地形变化影响不大

小尺度地幔对流使得岩石圈底部加热，表面热流量增加，加快了地幔的冷却。在常、低粘度的地层中，这种冷却效应要大于岩石圈的被加热效应，总体使得地形发生沉降。1980年，Connell 和 Hager^[31]首次提出这一观点，但认为岩石圈与地幔粘度差异很小，接近于常粘性。1985年，David 等^[32]通过重力、地形和地震研究表明，大洋和大陆热点周围的上升流区域，其下部的岩石圈发生了减薄。证实了 Connell 等的观点，同时推断出上升流上涌需要 10 个百万年，岩石圈减薄的速率为 10 km/Myr。而 Parsons 和 McKenzie 认为^[33]，老的岩石圈底部相对较小的粘性易于导致流体结构的不稳定(Parsons, 1999; McKenzie, 1999)，从而产生小于板块尺度的地幔对流。此对流使得岩石圈底部相对较冷的物质被相对较热的深部地幔物质所取代。这样，小尺度地幔对流将阻止海洋岩石圈像半无限空间冷却模型那样继续冷却。这样，小尺度地幔对流将增加海底热流值并使海底地形抬升。2005年，黄金水^[34]总结前人经验，运用数值模拟技术，建立垂直于大洋中脊的二维热对流有限元数值模型，采用常粘性以及与温度相关的粘性两种粘性结构对小尺度

地幔对流对海底地形的影响进行了重新研究。发现在常粘性模型中，小尺度地幔对流可造成海底地形沉降；但地球实际粘性并非非常黏性结构，对于接近地球实际的粘性结构，由于岩石圈底部加热与地幔冷却两种效应对海底地形的影响效果相当，所以小尺度对流对地形几乎不产生影响。

笔者较同意黄金水教授的观点，由于海底扩张属于半无限空间模式，地幔冷却效应较快，与岩石圈黏滞力较高，热量集中加热作用近似等权，所以对海底地形影响不大。

5.1.2. 对内陆地形变化影响较大

抵达岩石圈基底的较轻上升流可产生一个相对迅速的短期地表抬升。随后这种上升流物质所留下的空隙，由岩石圈较冷的、密度较大的下降流物质填补，并导致地表的分离和下沉。Luce^[35]通过模型处理和地球均衡理论，以苏伊士湾和阿尔卑斯、加利福尼亚为例，分别对稳定区域和不稳定区域的地形变化进行分析，认为小尺度地幔对流在不稳定的高温低粘度热点地区，会使岩石圈减薄，从而引起地形沉降，在较稳定的古克拉通地区使岩石圈增厚。李祖宁^[36]在 2001 年用数值模拟的方法研究了青藏高原隆起演化的过程，认为印度板块对欧亚板块的挤压是导致青藏高原隆升的主驱动力，但只这一种驱动力必然不够，上地幔小尺度对流和外力剥蚀作用也至关重要。很有可能，青藏高原正经历小尺度地幔对流影响的短期快速隆升，以后随着下降流的供给，青藏高原可能会出现隆升速度放缓甚至沉降。Trifonov 等在 2007 年通过研究发现，在近 2 个百万年以来，中天山平均隆起了约 2 km，有 1.2~1.5 km 的抬升是由于地幔热的物质替换了岩石圈下部较冷的物质所引起的，而其中一部分可能是由小尺度地幔对流作用产生的。中国西北地区

三大盆地：柴达木、塔里木和准格尔盆地下降速率依次增大，其中准格尔盆地下降速率达 10~20 mm/a，很有可能是小尺度地幔对流后期较冷物质下沉，地幔上隆及地壳拉伸减薄有关(图 2 所示)。

5.2. 小尺度地幔对流与海平面变化相关性

在几十到几百个百万年这样的大尺度时间范围内，全球海平面变化曲线可以作为海平面化较为准确的参考依据。因为该时间尺度基本是与大洋盆地的扩张闭合周期相近，受控于大洋中脊的增生和消亡的时间，这基本是一级或二级层序的时限范围。对于 2 到 20 个百万年里的海平面变化，该时间尺度不在冰体变化和大洋盆地的构造循环的周期范围内，因此全球海平面变化曲线并不能很好地对其解释。可是这个时间段的海侵和海退，在地质事件上到处可见，与三级层序的时限对应。小尺度地幔对流的作用周期恰好也在该时间范围内，将对三级层序甚至四级层序的形成产生影响。

被动大陆边缘，是典型的离散型板块边缘，火山活动很少或没有，其地壳是大陆和海洋位于同一刚性岩石圈板块内的过渡带。小尺度地幔对流进行缓慢，较热的且密度较低的上升物质较少，较冷的密度较大的下沉物质较多，可使该区域地幔上隆减慢，岩石圈厚度减薄，地形沉降，区域海平面总体相对下降，变化速率较慢。

主动大陆边缘，是典型的汇聚型板块边缘，火山活动频发区域，其地壳是大陆和海洋位于同一塑性岩石圈板块内的过渡带，小尺度地幔对流进行较快，较热的且密度较低的上升物质较多，较冷的密度较大的下沉物质较少，使该区域地幔上隆较快，部分岩石圈厚度增加，地形隆升，区域海平面总体相对上升，变化速率较快。

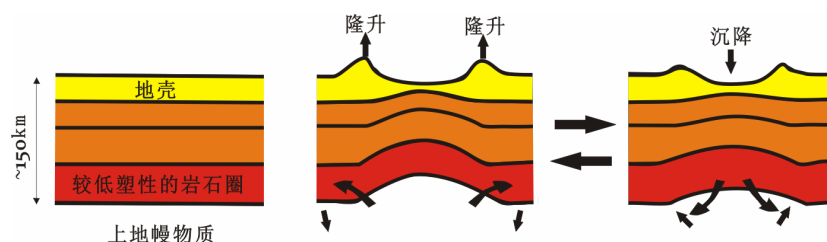


Figure 2. Small-scale mantle convection effect on the topography (Topographic uplift and subsidence can transform each other, combining a cycle)

图 2. 小尺度地幔对流对地形的影响(地形的隆升与沉降可以互相转化，形成一个周期)

小尺度地幔对深海地形几乎不产生影响，前面已提到过，这里不再赘述。

根据 Petersen 的数值模拟实验结果^[37]，小尺度地幔对流对海平的影响周期一般为 2~20 个百万年，这一期间正好与层序地层中的三级层序周期大致吻合，可以作为层序三级周期划分的参考。

5.3. 小尺度地幔对流与构造沉降相关性

Petersen 的小尺度地幔对流数值模拟实验显示，一个较塑性的岩石圈控制的热边界层，一般分布较多的上升流物质，小尺度地幔对流的作用周期一般为 2 到 20 个百万年，地面升降幅度近 30 米，横向作用半径近 250 km(有的甚至达到 800 km)。一个较刚性的岩石圈控制的热边界层，上升流物质分布较少，小尺度地幔对流的作用周期一般为几百个百万年，地面升降幅度可达 300 米，但多与大地构造相关，横向作用半径近 200 km，影响较弱。在准层序对流状态里，其自身的起伏和沉降发生在小于 20 个百万年的时间范围内。由于在热边界层里物质的大量水平运移，导致垂向运动通常呈现出穿时性的侧向关联。可允许的穿时范围在 2 到 5 个百万年，其作用模式如图 3 所示。

通过塑性岩石圈和刚性岩石圈的对比(表 2)，可对小尺度地幔对流产生影响的构造变形进行对比。

塑性岩石圈是现今构造变形较强烈的岩石圈，这类岩石圈有的处在新生代造山带之下，有的处在挤压拗曲盆地之下，有的处在拉张断陷盆地之下。小尺度地幔对流在大的构造区块、造山带以及盆地等都有可能存在并进行改造。由于塑性岩石圈高导层较发育，埋深相对较浅，变形较为强烈，小尺度地幔对流作用周期较快，所以垂向变化速率较快，所作用的横向范围较大。同时地震活动强烈，其内部强地震时有发生，作用周期可能在 2~20 个百万年，垂向作用范围可能为 20~40 m，垂向作用变化速率为 1~20 m/My，横向作用范围在 250~800 km 之间。

刚性岩石圈是现今构造变形不强烈的岩石圈，这

类岩石圈有的处在古造山带之下，有的处在盆地之下。小尺度地幔对流在大的构造区块、造山带以及盆地等都有可能存在并进行改造。由于刚性岩石圈高导层欠发育，埋深相对较深，变形不强烈，水平变形梯度不大，小尺度地幔对流作用周期较慢，所以垂向变化速率较慢，横向作用范围稍小，垂直形变为拗曲下降或整体抬升型。同时地震活动不强烈，内部鲜有大地震发生^[38]。作用周期可能在 100~1000 个百万年，垂向作用范围可能为 200~300 m，垂向作用变化速率为 0.2~3 m/My，横向作用范围在 200~300 km 之间。

岩石圈的刚性和塑性化：岩石圈的刚性和塑性是相对的，不是绝对的，大陆岩石圈与海洋岩石圈相比，大陆岩石圈是塑性的，海洋岩石圈是刚性的，因为海洋岩石圈是冷的、比重大且不易变形的基性岩，能作为板舌插入大陆岩石圈之下。大陆岩石圈可由刚性转化为塑性，也可由塑性转化为刚性。渤海湾盆地作为中朝准地台的一部分曾具有一个刚性岩石圈。塔里木盆地具有刚性岩石圈，但塔里木盆地是一个大型陆壳克拉通复合盆地，升降频繁，有多个不整合面。随着地幔上隆和深部热物质上涌，其岩石圈经历了由刚性到塑性，由塑性到刚性的反复变化过程。岩石圈的刚性和塑性不仅与岩石圈的热状态有关，而且与岩石圈内是否富含流体有关。岩石圈的刚性和塑性是可以相互转化的，既可由刚性转化为塑性，也可由塑性

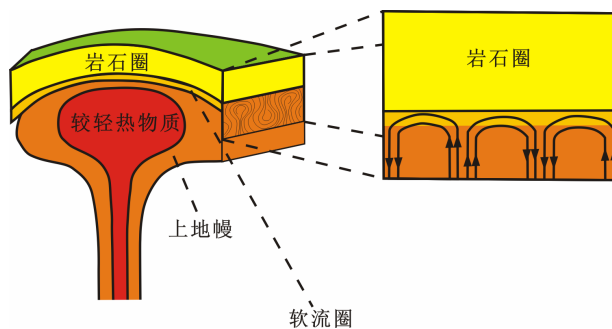


Figure 3. The pattern diagram of small-scale mantle convection associated with tectonic

图 3. 小尺度地幔对流与构造相关模式图

Table 2. The simulation results of rigid plastic lithospheric mantle convection from Petersen (For reference only)

表 2. Petersen 关于刚性、塑性岩石圈的地幔对流数值模拟实验结果(此数据仅作为参考)

岩石圈类型	上升物质	构造周期	垂向变化(m)	横向变化(km)	垂向变化速率(m/My)
塑性	较多	2~20 Myr	20~40	250~800	1~20
刚性	较少	100~1000 Myr	200~300	200~300	0.2~3

转化为刚性,其中小尺度地幔对流可能发挥着协调作用,与岩石圈互相影响,形成构造演化。

5.4. 小尺度地幔对流与层序级次划分

沉积盆地通常形成于大陆边缘和克拉通裂谷中。Petersen 的模型可以生成一个 300 km 宽的裂谷盆地,最初为断层控制的沉降,伴随着上地幔热物质上涌。而且,这种模式的热延迟时间要比传统模型所预测的时间更长(传统模型预测不包括小尺度地幔对流热量的传递与所导致的岩石圈减薄的作用)。小尺度地幔对流所产生的影响,影响了盆地沉降增生和消亡的周期,使断陷沉积模式复杂化^[39]。该模式可以被裂陷过程激发,构成不连续的轴向上涌,在裂陷侧翼之下,盆地的基底会有侵蚀。这就引起了沉积填充,呈现反复的海侵、海退以及不一致的沉积相侧向迁移的模式(图 4)。

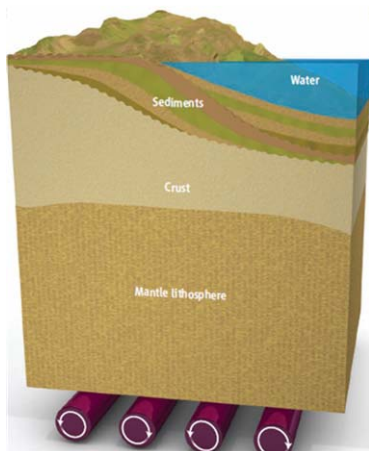


Figure 4. The sequence mode deposition with small-scale mantle convection mode (R. Dietmar Müller, 2010)
图 4. 小尺度地幔对流模式下的层序沉积模式(据 R. Dietmar Müller, 2010)

在进行层序划分时,沉积旋回和层序界面的识别同样重要。沉积旋回的变化主要体现在沉积古水深的变化、沉积相和沉积边界的迁移、接触关系以及古生物、古生态等的变化上。现今层序界面识别无非两种基本的界定:在海(湖)平面或沉积基准面下降期形成的不整合界面或沉积间断面;在海(湖)平面上升时形成的水进(海/湖泛)面,包括各级沉积旋回中的最大水进界面和初始水进界面。根据前人的经验总结和地震、测井资料的分析,并将小尺度地幔对流的因素考虑进去,笔者将沉积序列分为六个级别。一级至二级的层序地层单元从概念上与经典的层序地层学的巨层序、超层序及层序大体对应,主要是以不同规模的不整合面、区域冲刷面或沉积间断面为界,一般都显示出从水进到水退的旋回结构,在刚性岩石圈,小尺度地幔对流会对其构造升降产生近 200~300 m 的幅度,水平范围作用范围近 300 km,但时间周期基本上亿年,对层序的形成影响不大;三级层序的地层单元将小尺度地幔对流对构造沉降、沉积物供应速率的影响,在塑性岩石圈会有一个上地幔热物质上涌,使地面抬升近 40 m,可作用水平范围至少大于 300 km,时间周期在 2~20 My 内,可直接影响该区域的冲刷面或沉积间断面位置,从而影响沉积物供应速率,对三级层序的形成影响较大;由于四、五级的层序地层单元以及沉积体系域形成时间较短,可依据代表沉积基准面上升时形成的水进界面进行划分(表 3)。

6. 结论

小尺度地幔对流作为地幔对流的一种形式,在大尺度板块运动的背景下,影响着区域构造的沉降或隆升。

Table 3. The division of sequence stratigraphic since phanerozoic
表 3. 显生宙以来层序地层级别划分

级次	周期(Myr)	控制因素	作者
一级	>100	海盆容积变化, 板块构造, 刚性岩石圈中物质上涌	Pitman(1978); Kominz(1984); Petersen(2010)
二级	20~100	热构造沉降	Vail 等(1977); Watts(1982,1989); Cater 等(1998); 梅冥相(2005)
三级	1~20	海平面变化/构造作用, 塑性岩石圈中物质上涌	Vail 等(1977); Haq 等(1987); Petersen(2010)
四级	0.5~1	海平面变化/构造作用	Kidwell(1984); Piint(1988); Fulthorpe&Cater(1989); Hap 等(1987); Wagoner&Mitchum(1989); Petersen(2010)
五级	0.1~0.4	冰川性海平面变化	Emiliani(1955); Shackleton&Opdyke(1973,1976); 梅冥相(2005)
六级	<0.1	气候变化, 沉积物供应	Boyd 等(1988); Anderson&Thomas(1989); 梅冥相(2005)

由 Petersen 依据橄榄石的蠕变参数模拟的小尺度地幔对流模型, 大致计算出其周期约为 2~20 个百万年, 在塑性岩石圈中较为准确, 而在刚性岩石圈内将会延长周期。

小尺度地幔对流不会影响海底地形的变化, 通过减薄被动大陆边缘岩石圈, 使被动大陆岩石圈海平面下降, 通过地幔上隆和增厚主动大陆岩石圈, 使主动大陆岩石圈海平面上升, 在主动大陆架边缘形成更大海侵, 提高最大海泛面高度。

在内陆, 小尺度地幔对流塑性岩石圈内作用迅速, 而在刚性岩石圈内作用迟缓, 但两者可以互相转换, 由岩石圈内的高导层和流体性质决定。

根据小尺度地幔对流在塑性岩石圈作用周期为 2~20 个百万年, 可以对层序的级次提出一种划分方案, 将三级层序周期定为 1~20 个百万年。考虑小尺度地幔对流的影响, 可以为层序级次的划分及构造成因提供一种参考, 对于以往海平面上升的动力机制是一种补充或是挑战。

7. 致谢

感谢中国地质大学(北京)海洋学院刘豪副教授的细心指导和推荐, 完成了对本文的撰写。同时也感谢赵春晨博士的建议和指导, 对完成本文起到很大帮助。最后感谢中国地质大学(北京)对本文资料的提供, 使本文得以顺利完成。

参考文献 (References)

- [1] 孙家振, 李兰斌 (2002) 地震地质综合解释教程. 中国地质大学出版社, 武汉.
- [2] Haskell, N.A. (1935) The motion of a viscous fluid under a surface load. *Physics*, **1**, 265-269.
- [3] Jordan, T.H. (1977) Lithospheric slab penetration into the lower mantle beneath the sea of Okhotsk. *Geophysical Research*, **43**, 473-496.
- [4] Creager, K.C. and Jordan, T.H. (1984) Slab penetration into the lower mantle. *Journal of Geophysical Research*, **89**, 3031-3049.
- [5] Creager, K.C. and Jordan, T.H. (1986) Slab penetration into the lower mantle beneath the Marianas and other arcs of the north-west Pacific. *Journal of Geophysical Research*, **91**, 3573-3589.
- [6] Kerr, R.A. (1997) 20,000 leagues under the Earth. *Science*, **275**, 589-614.
- [7] Jeanloz, R. (1979) Convection, composition, and the thermal state of the lower mantle. *Journal of Geophysical Research*, **84**, 5497-5504.
- [8] Hofmann, A.W. (1997) Mantle geochemistry—The message from oceanic volcanism. *Nature*, **385**, 219-229.
- [9] Albarede, F. and Vander Hilst, R.D. (1999) New mantle convection model may reconcile conflicting evidence. *Transactions on American Geophysical Union*, **80**, 535-539.
- [10] Lay, T., Williams, Q. and Garnero, E.J. (1998) The core mantle boundary layer and deep earth dynamics. *Nature*, **392**, 461-468.
- [11] Becker, T.W., Kellogg, L.H. and O'Connell, R.J. (1999) Thermal constraints on the survival of primitive blobs in the lower mantle. *Earth and Planetary Science Letter*, **171**, 351-365.
- [12] Kellogg, L.H., Hager, B.H. and Vander Hilst, R.D. (1999) Compositional stratification in the deep mantle. *Science*, **283**, 1881-1884.
- [13] Van der Hilst, R.D. and Karason, K. (1999) Compositional heterogeneity in the bottom 1000 km of Earth's mantle: Towards a hybrid convection model. *Science*, **283**, 1885-1888.
- [14] Richter, F.M. and Mekengie, D.P. (1978) Simple plate models and mantle convection. *Geophysics*, **44**, 441-471.
- [15] Vinnik, L.P. and Saipokova, A.M. (1984) Structure of the lithosphere and asthenosphere of the Tien-Shan. *Annales Geophysicae*, **2**, 621-626.
- [16] Kosarev, G.L., Petersen, N.V., Vinnik, L.P. and Roecker, S.W. (1993) Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: Contrasts in the evolution of structures across the Talasso-Fergana fault. *Journal of Geophysical Research*, **98**, 4437-4448.
- [17] Yamaji, A. (1992) Periodic hotspot distribution and small-scale convection in the upper mantle. *Earth and Planetary Science Letter*, **109**, 107-116.
- [18] Haskell, N.A. (1935) The motion of a viscous fluid under a surface load. *Physics*, **1**, 265-269.
- [19] 白武明, 陈祖安, 黄晓葛 (2007) 小尺度地幔对流和大陆造山. 中国地球物理学会第二十三届年会论文集, 中国科学技术大学出版社, 青岛, 125-126.
- [20] Artyushkov, E.V. (1972) Density differentiation of the earth's matter and processes at the core-mantle interface. *Journal of Geophysical Research*, **77**, 6454-6458.
- [21] Elsasser, W.M. (1971) Sea floor spreading as thermal convection. *Journal of Geophysical Research*, **76**, 1101-1112.
- [22] Andrews, D.J. and Sleep, N.H. (1974) Numerical modeling of tectonic flow behind island arcs. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **38**, 237-251.
- [23] Solomon, S.C. (1975) Elevation of the olivine-spinel transition in subducted lithosphere: Seismic evidence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **11**, 97-108.
- [24] Jeanloz, R. and Richter, F.M. (1979) Convection, composition, and the thermal state of the lower mantle. *Journal of Geophysical Research*, **84**, 5497-5504.
- [25] Haxby, W.F. and Weissel, J.K. (1986) Evidence for small-scale mantle convection from SEASAT altimeter data. *Journal of Geophysical Research*, **91**, 3507-3520.
- [26] Baudry, N. and Kroenke, L. (1991) Intermediate-wavelength (400 - 600) South Pacific geoidal undulations: Their relationship of linear volcanic chains. *Earth and Planetary Science Letter*, **102**, 430-443.
- [27] Yamaji, A. (1992) Periodic hotspot distribution and small-scale convection in the upper mantle. *Earth and Planetary Science Letter*, **109**, 107-116.
- [28] 洪汉净, 阮维基 (1994) 大长宽比非稳态地幔对流的速度场特性. In: 现今地球动力学问题讨论会论文集, 地震出版社, 北京, 57-71.
- [29] Parsons, B. and McKenzie, D.P. (1978) Mantle convection and thermal structure of plates. *Journal of Geophysical Research*, **83**, 4485-4496.
- [30] 傅容珊, 常筱华, 黄建华等 (1994) 区域重力均衡异常和上地幔小尺度对流模型. *地球物理学报*, 增刊, 249-257.
- [31] Connell, R.J. and Hager, B.H. (1980) On the thermal state of the earth. In: Dziewonski, A. and Boschi, E., Eds., *Physics of the Earth's Interior*, North-Holland Publishing Company, Amsterdam, **46**, 270-317.
- [32] Yuen, D.A. and Fleitout, L. (1985) Thinning of the lithosphere by small-scale convective destabilization. *Nature*, **313**, 125-128.
- [33] Parsons, B. and McKenzie, D. (1978) Mantle convection and thermal structure of the plates. *Geophysical Research*, **83**, 4485-

- 4496.
- [34] 黄金水 (2005) 小尺度地幔对流与海底地形抬升. 武汉大学学报, **6**, 478-482.
- [35] Fleitout, L. (1985) Small-scale mantle convection. *Nature*, **317**, 478-479.
- [36] 李祖宁 (2001) 青藏高原隆升三阶段模式的数值模拟. 硕士论文, 中国科技大学, 合肥.
- [37] Petersen, K.D., Nielsen, S.B., Clausen, O.R., et al. (2010) Small-scale mantle convection produces stratigraphic sequences in sedimentary basins. *Science*, **329**, 827-830.
- [38] 徐常芳 (2003) 中国大陆岩石圈结构、盆地构造和油气运移探讨. *地学前缘*, **3**, 115-127.
- [39] Dietmar Muller, R. (2010) Sedimentary basins feeling the heat from below. *Science*, **329**, 769-770.