

陈志耕. 软流层的地球膨胀成因及其形成时间[J]. 地球科学进展 2013 28(7): 834-846. [Chen Zhigeng. The Earth expansion generated the asthenosphere and its formation time[J]. Advances in Earth Science 2013 28(7): 834-846.]

# 软流层的地球膨胀成因及其形成时间<sup>\*</sup>

陈志耕

(河北地质学院地球动力与应用研究所, 河北 石家庄 050031)

**摘 要:** 地球的软流层(圈) 堪称全球构造、岩浆与成矿作用动力之源。以往人们虽然认识到软流层的重要作用, 但其形成机制的定量研究还不够。最近 20 多年来, 对地球半径变化的检验研究结果表明, 地球膨胀已经有了较多的直接证据。而且, 即使按照地球膨胀晚期 0.1 mm/a 的半径增长率计算, 所产生的地球膨胀构造动力事件, 也将是一个全球性超级构造动力事件。根据地球的非线性有限膨胀演化, 所提出的软流层成因是: 源于原始地球深部的膨胀内压, 推挤原始地幔顶部物质做功并转化为原始岩石圈壳围限下的地幔顶部物质的压缩能  $A$ , 当压缩能的积累超过原始地幔顶部物质局部熔融所需要的热能  $\Omega$  时, 地幔顶部物质便开始熔融并逐渐形成地球的原始软流层。据此, 按照地球非线性膨胀演化初期的半径增长率 1.08 mm/a、原始地幔顶部物质以 15% 的局部熔融和绝热等压过程估算, 地球开始膨胀后仅 19.2 Ma, 地球的原始软流层(圈) 便可形成。

**关 键 词:** 地球膨胀; 地球膨胀检验; 软流层成因; 软流层形成时间; 全球超级构造动力事件

中图分类号: P542

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2013)07-0834-13

## 1 引 言

地球的软流层(圈) 在一定意义上堪称全球构造、岩浆与成矿作用的动力之源。因此 软流层无论是在地球科学基础理论研究, 还是在岩浆与成矿作用乃至全球变化等应用研究中, 都具有十分重要的意义。地球软流层是伴随着地震波探测过程中低速带(Low-Velocity Zone, LVZ) 的发现而被发现的<sup>[1]</sup>。尽管软流层的构造、岩浆与成矿动力意义重大, 但大多是将其作为自然存在的事实而很少涉及其成因研究<sup>[2~4]</sup>。Anderson<sup>[5]</sup> 认为地球软流层是在地球形成的早期均衡刚刚建立之后就形成的, 具体成因机制在于断层卸载以及由于足够高的温度而使得压力效应降低两方面的原因, 造成该层物质的部分熔融所形成。Jacobs 等<sup>[6]</sup> 认为低速带的成因还不清楚, 不过他们汇总了有关软流圈成因的一些设想: ①由于该层物质与其上下部分的矿物组合不同, 辉石地幔

岩与上覆的纯橄榄岩和下伏的石榴石地幔岩相比, 有显著偏低的地震波速, 所以辉石地幔岩组成一个低速带<sup>[7]</sup>; ②低速层代表着一种不同的矿物组合, 或者它是由于热梯度太大使得压力的影响被抵消, 造成物质的熔融<sup>[7]</sup>; ③具有较低熔点的地幔物质的较轻部分向上移动, 造成一个不仅有低速度而且进一步偏离熔点的折射残余层; ④低速层代表保存岩浆的一个大储集库; ⑤由于岩石富含放射性元素, 所以部分熔融带就是自存的。Jacobs 还列举过另外 2 种解释<sup>[8]</sup>: ①低速层可以用一种包含水的矿物集合的部分熔融或者去水作用更好地解释<sup>[9]</sup>; ②由于地幔榴辉岩和橄榄岩在有微量水存在时的早期熔融所致<sup>[10]</sup>。邓晋福等<sup>[11, 12]</sup> 根据橄榄岩包体与玄武岩化学组成上的互补性, 按照物质平衡原理估算新生代玄武岩岩浆形成时, 中国东部上地幔橄榄岩的局部熔融程度为 7% ~ 20%。金振民等<sup>[13]</sup> 在 1 070 ~ 1 130 °C 条件下的尖晶石二辉橄榄岩高温高压变形实验的

\* 收稿日期: 2013-01-14; 修回日期: 2013-04-10.

作者简介: 陈志耕(1957-) 男, 河北唐山人, 教授, 主要从事地球构造动力研究. E-mail: chenzg1998@126.com

研究结果表明,岩石的部分熔融程度为 5% ~ 6.5%。华北平原和中国北部的上地幔软流层 7.2 ~ 7.4 km/s 和 7.6 km/s 的实测地震波速<sup>[14,15]</sup>与含有 7% ~ 15% 间隙玄武岩岩浆的局部熔融软流层的地震波速相适应。顾芷娟等<sup>[16]</sup>在肯定上地幔橄榄岩中含 7% ~ 10% 隙间玄武岩岩浆的部分熔融是软流圈形成的主要原因的同时,还根据橄榄石的高温高压含水实验结果,提出由于水进入橄榄石后加速其塑性变形,促进地幔的塑性流动,可能是软流层形成原因的认识。

这些关于软流圈层成因的认识,主要是从温度、压力等地球物理或者矿物、岩石、地球化学等方面,对软流层的客观存在进行解释,可能还不是形成机制意义上的软流层成因定量研究。截至目前,尚未给出软流层(圈)的形成时间。

本文在简介最近 20 多年来地球半径检验等研究成果的基础上,根据地球的非线性膨胀构造动力,探讨源于原始地球深部的膨胀作用,推挤原始地幔顶部物质压缩并转化为热能的积累,最终造成地幔顶部物质局部熔融并形成地球原始软流层的问题。

## 2 最近 20 多年来对地球膨胀的检验及膨胀形成原始软流圈模式

### 2.1 地球膨胀的一般事实及最近 20 年来的直接证据

地球膨胀说很早就已有人明确提出 20 世纪 50 ~ 60 年代曾盛行过一段时期。关于地球膨胀的一般事实证据,王鸿祯等<sup>[17,18]</sup>①曾经简要列举过。陈志耕等<sup>[19,20]</sup>在对太阳系类地行星演化物理参数分析并结合古生物钟、古天文学研究成果以独立方法求得地球形成以来平均半径增长率的基础上,也对地球膨胀的一般事实进行过不完全归纳<sup>[21,22]</sup>:

间接证据(Ⅰ)——大陆地块几何形态证据。如全球大陆主要边界形态的相似性与吻合性;南半球主要大陆的倒三角几何形态;全球岩石圈板块的分形及降维演化等事实。

间接证据(Ⅱ)——地质学证据(构造、岩石、古地理、地球化学)。如古生物钟揭示地球自转速率的非潮汐减慢;硅铝质大陆地壳总面积可拼合成一个小半径的原始地球;古生代的生物地理与古大陆再造显示的地球表面积增长;地质历史上地表水体总量增长,而全球性海退和大陆出露面积反而增长的总趋势;以太古代绿岩带、基性岩墙群以及其他地质历史时期的伸展构造、拉张盆地、玄武岩广泛喷发、大陆裂谷、现代大洋中脊裂谷系等为代表的全球

性拉张构造;现代地表普遍新生的铁镁质大洋地壳中存在着年龄较老的硅铝质大陆地壳残体等显示的地壳大范围的拉张沉降等。

间接证据(Ⅲ)——地球物理及宇宙物理证据。如地球内部放射性元素衰变产热与各种形式热散失的平衡结果,表明地球整体增温的热动力状态;地震层析成像揭示的岩石圈拉张破裂减压熔融和因深部膨胀推挤形成减压熔融体的“无根上涌”形态特征;引力常数 G 随时间的减小等。

间接证据(Ⅳ)——生物进化表明地球表面重力不断减小证据。如生物由前寒武与寒武纪过渡时期的底栖,发展到在水介质中游动,尔后再到陆地爬行,最后能离开地表飞翔的生物总体上“离(地)心式”进化趋势;生物体积在地质历史时期总体逐渐增大的进化趋势等。

王鸿祯等<sup>[23]</sup>利用计算机成图方法,对震旦纪古大陆的地理位置进行再造,发现在 600 Ma 前的震旦纪,冈瓦纳古陆并未形成一个整体,而且早古生代的全区古大陆再造也表明,多数古陆块彼此隔离,这都与完整冈瓦纳大陆的假定存在矛盾。古地理和生物古地理研究也发现,古生代生物地理分区与古大陆再造的分布格局之间存在矛盾<sup>[18,24]</sup>。结合构造研究发现和确认的大量地壳伸展构造,他们提出地球曾发生阶段性不对称有限膨胀的设想<sup>[17,18]</sup>。在大约 5 次联合古陆解体每次都引起 5% 左右地球半径增长的推定下,研究组利用古地磁数据进行检验的结果分别是:中元古代(2 500 Ma BP)的地球半径为现值的 76%、新元古代(1 950 Ma BP)的地球半径为现值的 81%、寒武纪(850 Ma BP)的地球半径为现值的 94%<sup>[18]</sup>。这与推定基本一致。这是国内较早的地球膨胀检验研究。据此计算,从 2 500 Ma BP 的古元古代初期以来,膨胀地球半径的平均增长率约为 0.61 mm/a。

与造成人们难以理解和难以接受的上述地球膨胀间接证据根本不同的是,在最近的 20 多年中,已经有了较多根据地球半径变化检验研究得到的地球膨胀的直接证据。

Gerasimenko<sup>[25,26]</sup>通过甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)数据,对地球半径变化进行检验,得出最近 20 年间现代地球半径增长率不超过 1 mm/a 的结论。

① 王鸿祯. 地球阶段性有限膨胀及其对地球演化机制的控制. 攀登计划(探索性)基础研究项目建议书, 1998-06-25.

傅容珊等<sup>[27]</sup>以相对于热点参考架的地质—地球物理板块运动模型(US2-NUVEL1),分别计算地球经圈和纬圈方向上的表面积变化率和半径变化率,得到最近百万年( $10^6$ 年)内地球半径的增长率为  $0.14 \sim 0.27 \text{ mm/a}$ 。

Scalera<sup>[28]</sup>根据侏罗纪、白垩纪和古新世的全球古地理重建和三叠纪古地磁矢量数据,得出从三叠纪—古新世地球半径平均增长率高达  $15 \text{ mm/a}$  的结论。

魏东平<sup>[29]</sup>计算全球每个独立板块基于相对热点参考架的地质—地球物理板块绝对运动模型(US2-NUVEL1)运动规律下的面积变化,估算出全球板块的总面积的变化,计算得到在最近 3 Ma 内地球半径增长率为  $0.29 \text{ mm/a}$ 。

Gerasimenko<sup>[30]</sup>通过对美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提供的 1999 年 6 月的 VLBI 数据进行分析处理,对地球半径变化进行检验,得到最近 20 a 间地球半径的平均增长率为  $0.2 \text{ mm/a}$ 。

陈志耕<sup>[22]</sup>分析马宗晋等<sup>[31]</sup>和孙付平等<sup>[32]</sup>根据地质—地球物理板块运动模型得到最近 3 Ma 内南北纬中纬圈线长变化率和应用空间大地测量技术所得 20 年间地球南北中纬圈线长变化率来说明地球非对称性的数据资料,发现地球半径在 3 Ma 内有  $>0.20 \text{ mm/a}$  的增长率。

Scalera<sup>[33]</sup>再次以地史学的古地理研究方法得出三叠纪以来(约前 220 Ma)地球半径的平均增长率为  $14 \text{ mm/a}$ 。

申文斌等<sup>[34]</sup>通过全球分布的重力台站与重力卫星联合解算建立高精度、精细时间分辨率的时变重力场,根据所得地球惯性矩的年增加量计算了地球 1996—2006 年间的半径变化,得出 10 年间地球半径增长率为  $0.58 \text{ mm/a}$  的研究结果。申文斌等<sup>[35]</sup>还采用 GPS、VLBI 等多种高精度空间探测技术,综合解算得到的国际地球参考框架(International Terrestrial Reference Frame, ITRF)、ITRF2000 站坐标和速度,用 Delaunay(三角剖分)算法生成三角网逼近计算地球的体积变化,得到近 10 年间地球半径增长率为  $0.54 \text{ mm/a}$ 。

韩建成等<sup>[36]</sup>根据 1959—2005 年间的地球引力常数 GM 资料,计算给出了万有引力 G 值按 Dirac 的大数假说理论长期衰减变化为  $10^{-10}/\text{a}$  条件下,46 年间因质量变化引起的地球膨胀速率约为  $0.25 \text{ mm/a}$ 。

曹帅等<sup>[37]</sup>利用 NUVEL1 等多个典型全球板块相对运动模型的欧拉矢量,分析计算了沿板块边界段的两两板块间的相对运动速度,计算一定时间内板块边界段的面积变化,得到各模型中每个板块面积变化和全球表面积变化总量,对地球半径变化进行检验。结果表明,最近 1 Ma 内地球半径的增长率为  $0.16 \sim 0.25 \text{ mm/a}$ 。

孙榕等<sup>[38]</sup>根据最新版本的国际地球参考框架和 GPS、VLBI、SLR、多普勒卫星轨道定位测定技术(Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite, DORIS)4 种不同的空间大地测量技术给出参数联合解算的地表速度场,对地球半径变化进行检验,得出 10 年尺度地球整体膨胀的半径增长率为  $0.1 \text{ mm/a}$ 。

Shen 等<sup>[39]</sup>又基于多种空间大地测量和时空重力测量 2 种方法,对地球半径变化进行检验,得出最近 10 年地球一直在膨胀的结论:①根据覆盖超过 10 年的 GPS、VLBI、SLR、DORIS 等数据,利用国际地球参考框架(ITRF)2008 站坐标和速度综合解算,用 Delaunay 算法生成三角网逼近计算地球的体积变化,得到近 10 年间的地球半径增长率为  $0.24 \text{ mm/a}$ ;②根据地球引力常数的长期变化率、卫星激光测距与地球的平均极数据,估计地球的转动惯量及其时空变化,发现在最近几十年内地球的半径增长率为  $(0.17 \pm 0.02) \sim 0.21 \text{ mm/a}$ 。综合这 2 种空间大地测量观测和重力数据,得到的结论是:在最近 10 年内地球一直在膨胀,其半径增长率约为  $0.2 \text{ mm/a}$ 。

由美国 NASA 和法、荷等研究人员组成的一个

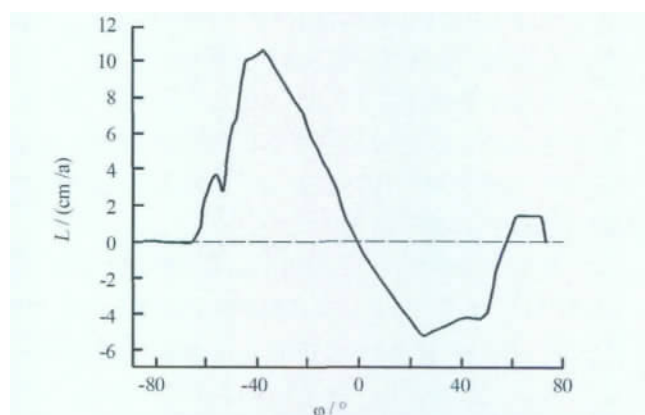


图 1 由板块绝对运动模型 HS2-NUV-EL1 得到的近 3 Ma 内地球纬圈长度年变化率的曲线图<sup>[31]</sup>

Fig. 1 According the absolute plate motion model HS2-NUV-EL1 calculated the Earth's near-zonal length at 3 Ma annual rate of change<sup>[31]</sup>

国际研究小组,应用 GPS、VLBI、SLR、DORIS 4 种空间大地测量新的数据处理技术,对地球半径变化进行检验,得到最近 25 年内地球半径的增长率为  $0.1 \text{ mm/a}^{[40]}$ 。

在一些学者进行地球半径变化检验研究并得出地球正在膨胀结论的同时,也有同样利用空间大地测量数据检测得出地球半径增长为负值的相反结论<sup>[41, 42]</sup>。不过,其中有些研究者在其尚未注意到地球整体的体积变化问题而参与进行的地球非对称性问题合作研究中<sup>[31]</sup>,同样综合 VLBI、GPS、SLR 空间大地测量数据及其组合给出全球构造变化检测的结果是:北半球的压缩变化量级在  $8.5 \sim 11.1 \text{ mm/a}$ ,南半球的膨胀变化量级在  $12.7 \sim 16.2 \text{ mm/a}$ 。根据这个结果直观地看,北半球的压缩变化量小于南半球的膨胀变化量,地球整体应该是膨胀的。不仅如此,在这项仅论及地球非对称性问题的研究中,作者还由板块绝对运动模型 HS2-NUV-EL1 计算得到最近几百万年内地球纬圈长度的年变化率并给出其曲线图(图 1)<sup>[31]</sup>。由该项研究数据及曲线图不难分析,表示膨胀部分的曲线积分大于表示压缩部分的曲线积分,即北半球的缩小部分不足以抵消南半球的膨胀部分,地球整体上是膨胀的且地球半径的增长率  $> 0.2 \text{ mm/a}^{[22]}$ 。此外,得出与地球膨胀相反结论的研究<sup>[41, 42]</sup>,都是以地球平均半径为  $6366.7 \text{ km}$  进行计算的。这与国际标准地球模型委员会(International Standards Earth Model Committee)推荐、第 21 届国际地震学与地球内部物理联合会(International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, IASPEI)正式通过的初步的参考地球模型(Preliminary Reference Earth Model, PREM)<sup>[43]</sup>采用  $6371 \text{ km}$  的地球平均半径是不一致的。

特别是检验时间尺度高出这类相反结论的空间大地测量技术方法检验时间尺度  $10^5$  倍,可靠性也优于这类相反结论所用检验手段的地质—地球物理板块模型方法,截至目前对地球半径变化的检验研究<sup>[27, 29, 37]</sup>,还未见有与地球膨胀结论相反的结果。而且与得出相反结论所用方法类似的最新检验结果<sup>[39, 40]</sup>,都是支持地球膨胀的。

将最近 20 多年来地球膨胀检验与综合研究的主要成果,分类汇总列入表 1~3 中。由表 1、2 不难看出,根据时间尺度大、可靠性较好的 3 项地质—地球物理板块运动模型检验结果<sup>[27, 29, 37]</sup>,在最近百万年时间尺度内的地球半径平均增长率为  $0.24 \text{ mm/a}$ ;而根据 20 多年来多种空间大地测量数据检验研

究的 4 项代表性结果<sup>[30, 38~40]</sup>,在最近 10~25 年间的地球半径平均增长率为  $0.15 \text{ mm/a}$ 。

在总结最近 20 年来地球膨胀检验研究成果的同时,也有必要介绍一项发表于 35 年前但现在仍然十分重要的检验研究成果。1978 年,国际权威杂志 *Nature* 在研究论文栏目发表了澳大利亚国立大学 McElhinney 等<sup>[44]</sup>的研究成果。这项研究依据世界古地磁数据对地球半径变化进行检验,得出在最近 400 Ma 内地球半径增长总量小于  $0.8\%$  的结论。这相当于在最近 400 Ma 内,地球半径有平均  $< 0.13 \text{ mm/a}$  的增长率。但遗憾地是,McElhinney 等却认为这个结果“足以排除目前任何地球膨胀的理论”。与此类似,以 NASA 为首的国际研究小组<sup>[40]</sup>在得到最近 25 年内地球半径增长率为  $0.1 \text{ mm/a}$  的检验结果后,仍然结论称“并没有发现地球出现统计学意义上的明显膨胀。”这类对地球膨胀检验结果给出带有明显学术偏见或者模棱两可结论的研究,客观上误导了很多、很长时间。

面对越来越多的地球膨胀直接证据,人们自然希望进一步探究引起地球膨胀的原因。地球内部放射性元素衰变产生的热能,是地球膨胀的原因之一<sup>[45, 46]</sup>。不过一般认为,长寿命放射性元素的大规模生热,是在地球演化较晚的时期。地球早期较大规模的膨胀原因,很可能是与地球的形成演化有密切联系的地球深部超高压下的特殊物质状态有关<sup>[47]</sup>。贯穿地球演化始终的引力常数  $G$  变化造成的地球物质减压膨胀<sup>[48~51]</sup>,是地球膨胀的另一个原因。由放射性元素衰变生热,造成的地球在整个地质时代中的半径增长总量为  $100 \sim 200 \text{ km}^{[52]}$ ,由引力常数减小产生的地球半径增长总量也与这一数值大致相当<sup>[53, 54]</sup>。

Yang 等<sup>[55]</sup>根据广义相对论的引力理论,修正爱因斯坦引力场方程求解证明宇宙膨胀,据此计算得到目前的地球半径增长率为  $0.45 \text{ mm/a}$ 。袁立新<sup>[56]</sup>根据宇宙膨胀论及其引力常数变化率,得到自寒武纪以来 570 Ma 的地球半径增长量为  $98.5 \text{ km}$ 。据此计算,在长达 570 Ma 间的地球半径平均增长率为  $0.17 \text{ mm/a}$ 。Chudinov<sup>[57]</sup>的认识并非没有道理:只要地球膨胀被事实所证明,就必然有其特定的膨胀原因、膨胀能量和膨胀前物质高密度的具体机制,且不管其有多么困难和多么不可思议。

容易估算,即使按照  $0.1 \text{ mm/a}$  的地球膨胀晚期半径增长率,仅需要约 150 Ma 的时间积累,由此产生的全球地壳面积的绝对增长量也高达  $2.4 \times$

$10^6\text{ km}^2$ 。如果这个全球地壳增量是在地球膨胀经过约 150 Ma 时间积累后的一个阶段性释放<sup>[60, 22]</sup>,那么就相当于从中生代的晚侏罗世开始至今,地球上新增加了平均宽度 50 km、总长 48 036 km 的全球裂谷系,约占现代全球总长约 80 000 km 裂谷系的 60%。显然,这是一个全球性的超级重大构造动力事件。与这一超级重大构造动力事件近乎同一时

代、也持续了大约 150 Ma 之久的燕山期中国东部岩石圈从厚 200 km 拆沉减薄至 80 km 的大陆“去根”<sup>[61~64]</sup>事件,以及备受地学家关注至少 100 Ma 前还沉睡海底,而今已成为“世界屋脊”但海拔高度尚不到 9 km 的青藏高原隆升事件<sup>[65~67]</sup>,这些事件的规模很可能还没有超过全球新增 48 036 km 裂谷系这个超级构造动力事件的规模。

表 1 最近 20 年来地质—地球物理板块运动模型方法检验 1~3 Ma 尺度地球半径变化的主要成果<sup>[22, 27, 29, 37]</sup>

Table 1 In recent 20 years geological-geophysical model method of plate movement test results the size of 1~3 Ma the radius of the Earth changes<sup>[22, 27, 29, 37]</sup>

作者(发表时间)	膨胀地球半径增长率的得出途径、方法	半径增长时期/Ma	平均半径增长率/(mm/a)
傅容珊等(1998) <sup>[27]</sup>	应用相对于热点参考架的地质—地球物理板块运动模型(US2-NUVEL1)分别计算地球经圈和纬圈方向上的表面积变化率和半径变化率	$n$ ( $n=1\sim3$ )	0.14~0.27 (中值 0.21)
魏东平(2003) <sup>[29]</sup>	计算全球每个独立板块基于相对热点参考架的地质—地球物理板块绝对运动模型(US2-NUVEL1)运动规律下的面积变化,估算出全球板块的总面积的变化,得到现代地球的膨胀速率	3	0.29
陈志耕(2004) <sup>[22]</sup>	依据从地质—地球物理板块绝对运动模型(US2-NUVEL1)中计算得到的地球南、北纬中纬圈线长度年变化率数据 <sup>[31]</sup> 的比较分析	$n$ ( $n=1\sim3$ )	>0.20
曹帅等(2009) <sup>[37]</sup>	利用 NUVEL1 等多个典型全球板块相对运动模型的欧拉矢量,计算沿板块边界段的两两板块间的相对运动速度。据此计算这些板块边界段的面积变化,得到各模型中每个板块面积变化和全球表面积变化总量	1	0.16~0.25 (中值 0.21)
3 项地质—地球物理板块模型法检验结果 <sup>[27, 29, 37]</sup> 的平均值			0.24

表 2 最近 20 年来空间大地测量技术方法检验 10~25 a 尺度地球半径变化的主要成果<sup>[22, 30, 35, 38~40]</sup>

Table 2 In recent 20 years in space geodesy techniques test results the size of 10~25 a the radius of the Earth changes<sup>[22, 30, 35, 38~40]</sup>

作者(发表时间)	膨胀地球半径增长率的得出途径、方法	半径增长时期/a	平均半径增长率/(mm/a)
Gerasimenko (2003) <sup>[30]</sup>	对 NASA 提供的甚长基线干涉测量(VLBI)数据进行处理计算得到	20	0.20
陈志耕(2004) <sup>[22]</sup>	依据 VLBI、GPS、SLR 3 种空间大地测量技术实测得到的地球南、北中纬度的纬圈长度年变化率数据 <sup>[32]</sup> 中比较分析得到	15	>0.20
申文斌等(2008) <sup>[35]</sup>	采用高精度 GPS、VLBI 空间大地测量数据综合解算所得 ITRF 和 ITRF2000 站坐标速度,以 Delaunay 算法生成三角网逼近计算地球体积变化得到	10	0.54
孙榕等(2010) <sup>[38]</sup>	依据最新版本的国际地球参考框架(ITRF)中的 GPS、VLBI、SLR、DORIS 等 4 种不同的空间大地测量技术给出参数联合解算的地表速度场得到	10	0.10
Shen W B 等(2011) <sup>[39]</sup>	GPS、VLBI、SLR、DORIS 等空间大地测量与时空重力测量方法相结合的综合方法	10	0.20
Wu Xiaoping 等(2011) <sup>[40]</sup>	GPS、VLBI、SLR、DORIS 等空间大地测量数据和新的数据处理技术	25	0.10
其中 4 项空间大地测量检验结果 <sup>[30, 38, 39, 40]</sup> 的平均值			0.15



表 3 近 20 年来综合研究及古地理、古地磁、重力测量和引力变化等方法得到的地球半径增长率<sup>[17 18 , 20 , 34 , 36 , 55 56 , 60 81]</sup>

Table 3 In the past 20 years synthetic study and paleogeography , paleomagnetism , gravity and gravity variation method to get the Earth radius growth rate <sup>[17 18 , 20 , 34 , 36 , 55 56 , 60 81]</sup>			
作者( 发表时间)	膨胀地球半径增长率的得出途径、方法	半径增长时期	平均半径增长率/( mm/a)
陈志耕( 1990) <sup>[20]</sup>	依据古天文观测数据、古生物钟资料并结合类地行星物理参数分析方法	4 500 Ma	0. 40
王鸿祯等( 1997) <sup>[17 18]</sup>	生物古地理、构造古地理等方法进行古大陆再造及古地磁方法检验	2 500 Ma	0. 61
陈志耕( 1999) <sup>[60 81]</sup>	依据地质学、岩石的同位素年代学研究成果 根据以自然演化的数学形式和弹性力学分析方法创建的地球有限膨胀演化模型得出	4 190 Ma	0. 40
		120 Ma	0. 10
申文斌等( 2007) <sup>[34]</sup>	通过全球重力台站与重力卫星联合解算建立高精度、精细时间分辨率的时变重力场 ,再据所得的地球惯性矩的年增加量计算得到	10 a ( 1996—2006)	0. 58
韩建成等( 2008) <sup>[36]</sup>	根据地心引力常数 $GM$ ,计算万有引力 $G$ 值按 Dirac 的大数假说理论长期衰减变化为 $10^{-10}$ /a 条件下计算因质量变化引起的地球膨胀速率。	46 a ( 1959—2005)	0. 25
Yang Jianliang , 等( 2011) <sup>[55]</sup>	在广义相对论引力理论的框架下 ,修正爱因斯坦引力场方程求解并证明宇宙膨胀。在此基础上计算出现代地球半径的增长率	目前	0. 45
袁立新( 2012) <sup>[56]</sup>	根据宇宙膨胀论及其引力常数变化率 ,得到寒武纪以来 570 Ma 地球半径的增长量为 98. 5 km	570 Ma	0. 17

这样一个全球超级构造动力事件的规模 ,显然已经大大超出了以往人们认为“即使地球有限膨胀假说将来得到证实 ,也不足以解释显生宙大地构造史”<sup>[68]</sup>所估计的规模。类似以往这种对地球膨胀构造规模的估计 ,也误导了很多。

2.2 地球膨胀早期形成原始软流圈的基本模式

地球膨胀一旦被越来越多的检验研究所证实 ,相应的地球科学基础理论以及相关的全球构造动力等重要问题 ,便应当考虑在地球膨胀构造动力框架下给予新的解释与说明。另一方面 ,还有一些在原有观念下尚未引起人们注意或者注意不够的地球科学理论与全球构造动力问题 ,也应该在地球膨胀框架下给予新的解释与说明。

作为全球构造、岩浆与成矿作用动力之源的地球软流层( 圈) 的成因机制 ,便是这类重要问题之一。

如图 2 所示 ,按照地球膨胀主导的全球构造动力初步模式<sup>[58 ~ 60 22]</sup> ,原始地球近于完整的原始岩石圈球壳体 ,在源于地球深部的膨胀动力作用下 ,承受一个膨胀内压  $P$  ,在该膨胀内压的作用下地幔物质外移产生径向应力  $\sigma_r$  ,同时在球壳体内产生切向的拉张应力  $\sigma_c$ 。

在原始岩石圈球壳的拉张破裂强度极限  $\sigma_{\max}$

内 ,膨胀内压推挤地幔物质径向位移产生的压缩机械能 ,在岩石圈球壳底部以下的地幔顶部物质中逐渐积累并转化为地幔顶部物质的热能而储存。当原始岩石圈球壳内因来自于深部的膨胀推挤机械能转化为地幔顶部物质的积累热能 ,超过了地幔顶部物质的软化与熔融所需要的能量时 ,地幔顶部物质发

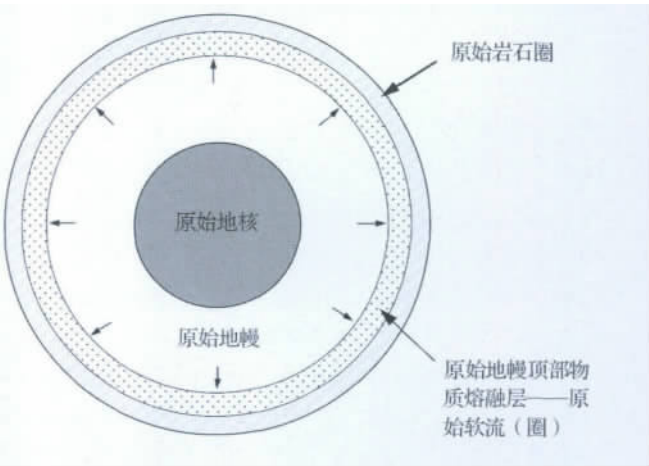


图 2 原始岩石圈球壳围限的原始软流层示意图

Fig. 2 The original lithosphere shell surround and formation original asthenosphere schematic

图内小箭头表示施加于地幔顶部物质底界的膨胀内压  $P$

Design of small arrow indicates inner expansion pressure (  $P$ ) applied to the mantle material bottom boundary

生熔融并逐渐形成原始岩石圈层之下的软流圈层。

在地球膨胀主导构造动力的作用下,不仅形成全球性的膨胀构造,而且源于深部膨胀推挤,使得地幔及软流层物质沿地球膨胀拉张裂谷系或其他拉张薄弱带上涌,产生与地幔柱等构造动力相关的一系列次级构造动力,形成包括全球板块构造和大陆构造等在内的次级构造形式<sup>[58~60,22]</sup>。

### 3 原始软流圈形成过程的能量关系与数值估算

根据热力学第一定律

$$dU = \delta Q + \delta A \quad (1)$$

式中:  $dU$  为系统的内能改变量,  $\delta Q$  为外界传递给系统的热量,  $\delta A$  为外界对系统所做的功。在不考虑热散失和放射性元素生热等因素的情况下,所考虑的原始地幔顶部物质是一个与外界没有热交换的绝热系统。此时,热力学第一定律中的  $\delta Q = 0$ 。该系统的内能改变量  $dU$  仅与外界对系统所做的功  $\delta A$  有关,即:

$$dU = \delta A \quad (2)$$

#### 3.1 地球深部膨胀推挤地幔顶部物质的压缩能

根据功能原理,从小半径地球膨胀到大半径地球的变化过程中,地球的膨胀压力必然做功。由于地球的初始固态类月质外壳,构成了近于连续且封闭的初始岩石圈球壳,源于地球深部的膨胀推挤地幔物质上移所做的功,转化为初始岩石圈球壳围限内的原始地幔顶部物质的压缩能并积累转化为热能。

我们讨论这种能量积累与转化的数量关系。

仍然按照膨胀地球初始岩石圈球壳的弹性薄球壳力学模型<sup>[69~73]</sup>并取初始岩石圈球壳的厚度为 30 km<sup>[59]</sup>。在 PREM 模型中,现代地球软流层的厚度为深 80 ~ 220 km 区间的 140 km<sup>[43]</sup>。考虑到膨胀前小半径地球以及初始形成的软流层厚度小于现代厚度两方面的因素,原始软流层的厚度估计在 60 ~ 100 km 之间,我们取为 100 km。

在地球膨胀初期的某一时间区间  $\Delta t$  内,使原始地幔顶部厚度为  $H$  的物质,因地幔原始岩石圈球壳的围限和源于地球深部的膨胀内压推挤,使被压缩的原始地幔顶部物质所在区间的底界较小半径  $r_1$  上移至较大半径  $r_2$ ,被压缩的原始地幔顶部物质的厚度由  $H$  被压缩至  $h$ ,则地幔顶部物质内积累的压缩能,可以用原始岩石圈围限下的原始地幔顶部被压缩物质的体积变化所做的功  $\Delta A$  近似地表示。即:

$$\Delta A = \Delta P \cdot \Delta V \quad (3)$$

式中:  $\Delta V$  为被深部膨胀推挤压缩的原始地幔顶部物质的体积变化量。写成微分形式有:

$$dA = dP \cdot dV \quad (4)$$

相对数千公里的地球半径而言,膨胀内压  $P$  在厚度仅 100 km 的原始软流层,可作为一级近似取为定值。因此,公式(4)变为:

$$dA = P \cdot dV \quad (5)$$

由于厚度为  $dr$  的球壳在压力  $P$  作用下体积变化  $dV$  可以表示为:

$$dV = 4\pi \int_{r_1}^r r^2 dr \quad (6)$$

故公式(5)变为:

$$\begin{aligned} A &= 4\pi P \int_{r_1}^r r^2 dr \\ &= \frac{4\pi}{3} P \cdot [(r_2)^3 - (r_1)^3] \end{aligned} \quad (7)$$

在膨胀时间  $\Delta t$  内,原始地幔顶部物质的底界由较小的半径  $r_1$  被推挤上移至较大半径  $r_2$  时,较小半径的  $r_1$ 、较大半径的  $r_2$  和膨胀地球的半径增长速率  $\alpha$  三者之间有如下关系:

$$r_2 = r_1 + \alpha \Delta t \quad (8)$$

据公式(7),原始地幔顶部物质的底界被深部膨胀推挤上移变化所做的膨胀功  $A$  为:

$$A = \frac{4\pi}{3} P \cdot [(r_1 + \alpha \Delta t)^3 - (r_1)^3] \quad (9)$$

陈志耕等<sup>[59]</sup>曾经依据膨胀内压与岩石圈自重压力  $P = W = \rho_0 g_0 h_0$  等效的假定,估算了原始地球深部膨胀施于初始岩石圈球壳底部的推挤压力约为  $4.52 \times 10^9$  Pa。当地球膨胀前的原始半径  $R$  取为 4 651 km<sup>[60]</sup>,原始地幔顶部物质底界的较小半径  $r_1$  取为 4 521 km,膨胀早期的地球半径增长率  $\alpha$  取为 1.08 mm/a<sup>[60]</sup>,地球膨胀推挤原始地幔顶部物质的底界上移所做的膨胀功  $A$  为:

$$A_{1.08} = \frac{4\pi}{3} P \cdot [(r_1 + \alpha \Delta t)^3 - (r_1)^3] \quad (10)$$

#### 3.2 原始地幔顶部物质全部熔融所需要的能量

在原始地球的内部,一个厚度为  $dr$  的原始地幔顶部物质薄层全部熔融所消耗的热能  $d\Omega$ ,应是该原始地幔薄层物质的熔融潜热  $dA$  和熔融升温热  $d\Omega_{融}$  两部分之和。即:

$$\begin{aligned} d\Omega &= [d\Omega_{融} + dA] \\ &= m(C_p dT + dA_{潜}) \\ &= [\rho \cdot V(C_p dT + dA_{潜})] \end{aligned} \quad (11)$$

据公式(11),原始地幔顶部一定区间内的物质

从初始温度  $T_1$  升温至熔融温度  $T_2$  时, 所消耗的热能  $\Omega$  与下述参数相关:

(1) 地幔顶部物质的平均密度  $\rho = 3\,500\text{ kg/m}^3$  (约相当于现代地球 340 ~ 350 km 深处的密度)。

(2) 地幔顶部物质的定压比热容  $C_p = 1\,300\text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$  [74~76]。

(3) 地幔顶部物质的熔融潜热, 水谷仁等 [74] 和李玉锁等 [77] 取为  $210\text{ kJ/kg}$ 。

$$\Lambda_{\text{潜}} = 2.10 \times 10^5\text{ J/kg}$$

(4) 地幔顶部物质的初始温度  $T_1$ 。取 Lubimova [52] 给出前 4 000 Ma 深度为 100 km 处的原始地幔顶部温度为  $300\text{ }^\circ\text{C}$  (或  $573\text{ K}$ )。这略高于现代地球深 11 km 处的  $280\text{ }^\circ\text{C}$  [78]。这是早期短寿命放射性元素衰变热及地球自引力收缩演化转变热造成的地球升温使原始地幔顶部达到的温度。

(5) 由实验资料得到, 橄榄石  $\rightarrow$  尖晶石相变区的温度  $T_2$  约为  $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$  [78]。这相当于现代地球的 400 km 深的温度。而据 Lubimova [52] 研究, 在 4 000 Ma 年前的早期地球, 500 km 深处的温度还不到  $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ , 在 4 500 km 的深处才达到  $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$ 。由此可见, 深度仅 100 km 左右的原始地幔顶部, 单纯依靠初期的放射性元素衰变热, 根本达不到使地幔顶部硅酸盐物质熔融形成原始软流层(圈)的程度。只有因地幔膨胀推挤产生地幔顶部物质机械压缩能转化的热能, 才有可能使地幔顶部物质熔融进而形成原始软流层(圈)所需高达  $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$  的温度。

故原始地幔顶部物质的熔融温度  $T_2$  与初始温度  $T_1$  之差为:

$$\begin{aligned}\Delta T &= T_2 - T_1 \\ &= (1500 - 300)\text{ }^\circ\text{C} \\ &= 1\,200\text{ }^\circ\text{C} \text{ (或 } 1\,473\text{ K)}\end{aligned}$$

若膨胀地球初始岩石圈球壳的厚度为 30 km [59] 并取初始软流层厚度的可能值为 100 km, 那么熔融原始地幔顶部物质的厚度  $H = 100\text{ km}$ , 原始地球开始膨胀的初始半径  $R = 4\,651\text{ km}$  [60], 则该厚度的原始地幔顶部物质的体积为:

$$\begin{aligned}V &= (4/3)\pi [(R - 30)^3 - (R - 100)^3] \\ &= 1.83 \times 10^{19}\text{ m}^3\end{aligned}$$

作为一级近似, 当原始地幔顶部一定厚度内的物质密度  $\rho$ 、定压比热容  $C_p$ 、熔融潜热  $\Lambda_{\text{潜}}$  等参数视为定值并不计压缩能转化率时, 公式(11)便是在不计热散失及放射性元素生热等绝热条件下, 原始地幔顶部 30 ~ 130 km 间地幔物质全部熔融所需要的热能。

## 4 地球开始膨胀后形成原始软流圈的大致时间

按照公式(1)热力学第一定律  $dU = \delta Q + \delta A$ , 原始岩石层球壳内部的膨胀推挤做功转化的物质压缩能  $A$  超过熔融原始地幔顶部约 100 km 厚 (30 ~ 130 km) 的物质所需热能  $\Omega$  时, 必有

$$A \geq \Omega \quad (12)$$

当地球半径增长率  $\alpha$  取为膨胀初期的  $1.08\text{ mm/a}$  [60] 时有

$$A_{1.08} \geq \Omega \quad (13)$$

据公式(10)膨胀功  $A$ 、公式(11)熔融热和公式(13), 可得到满足公式(12)的不等式:

$$\begin{aligned}&\frac{4\pi}{3}P \cdot [(r_1 + \alpha\Delta t)^3 - (r_1)^3] \\ &\geq [\rho \cdot V(C_p\Delta T + \Lambda_{\text{潜}})]\end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $P$  为地球膨胀内压,  $r_1$  为原始地幔顶部物质的底界在较小原始地球中构成的球面半径,  $\alpha$  为膨胀地球的半径增长率,  $\Delta t$  为地球开始膨胀后因膨胀压  $P$  推挤原始地幔顶部物质压缩熔融最终形成软流层的时间,  $\rho$ 、 $V$  分别为原始地幔顶部物质熔融之前的平均密度和体积,  $C_p$  为地幔顶部物质的定压比热容,  $\Delta T$  为原始地幔顶部物质的熔融温度  $T_2$  与初始温度  $T_1$  之差,  $\Lambda_{\text{潜}}$  为地幔顶部物质的熔融潜热。

将地球膨胀内压  $P = 4.52 \times 10^9\text{ Pa}$ ,  $r_1 = 4\,521\text{ km}$ ,  $\rho = 3\,500\text{ kg/m}^3$ ,  $V = 1.83 \times 10^{19}\text{ m}^3$ ,  $C_p = 1\,300\text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ,  $\Delta T = 1\,473\text{ K}$ ,  $\Lambda_{\text{潜}} = 2.10 \times 10^5\text{ J/kg}$  代入公式(14), 解得从地球开始膨胀到原始软流层形成所需要的时间为:

$$\Delta t \geq 108\text{ Ma}$$

因此, 当地球开始膨胀并以初期半径平均增长率  $\alpha$  为  $1.08\text{ mm/a}$  的速率膨胀, 深部膨胀动力推挤原始岩石圈球壳下部物质做机械压缩功  $A$  转化为压缩能并最终转化为热能的积累  $\Omega$ , 直至原始岩石圈球壳之下的地幔顶部物质全部熔融进而形成原始软流层的时间约为 108 Ma。

若地幔顶部物质不是上述计算的全部熔融, 而是根据岩石学家关于上地幔岩石模型和部分熔融实验研究仅有约 15% 的隙间玄武岩浆的局部熔融 [11~13], 则由公式(10)、(11)、(13)得到, 软流层的形成时间仅需 19.2 Ma。这是软流层形成的最可能时间。

## 5 结 论

综合本文讨论, 有以下几点结论:



(1) 现代地球膨胀不仅有大量间接事实证据的支持,而且已经有一系列直接证据的支持。

最近 20 年来地球半径变化的一系列检验研究结果表明,地球膨胀既有 10~25 a 较短时期的空间大地测量技术检测结果的支持,也有时间尺度在百万年量级、可靠性更大的 1~3 Ma 地质—地球物理板块模型数据检测结果的支持。可能的情况是:1~3 Ma 时间尺度内地球半径的平均增长率(0.24 mm/a),高于最近 10~25 a 时间尺度的地球半径平均增长率(0.15 mm/a)。

板块构造学说被誉为“地球科学的革命”,并与原子模型、元素周期律、大爆炸、进化论等一道,被称为“人类认识自然界的 5 个里程碑”<sup>[79]</sup>。然而,板块构造学说立论的 4 个基本前提之一便是“在全球范围内,板块沿分离型边界的扩张增生与沿汇聚型边界的压缩消亡互相补偿抵消,使地球半径保持不变”<sup>[80]</sup>。在地球膨胀已经被一系列直接证据不断证明的情况下,地球科学基本理论特别是全球构造动力学说,考虑在地球整体膨胀动力的框架下进行新的解释与完善,是非常必要的。

(2) 地球软流层(圈)是地球膨胀演化的产物。按照绝热等压过程、原始地幔顶部物质 15% 的局部熔融和地球非线性有限膨胀演化初期半径增长率为 1.08 mm/a 进行估算,在地球开始膨胀后的 19.2 Ma 厚 100 km、以 15% 隙间玄武岩浆形式局部熔融的地球原始软流层便可形成。

(3) 地球即使按照晚期 0.1 mm/a 的半径增长率膨胀,其所产生全球构造动力事件的规模也是惊人的,是一个全球性的超级构造动力事件。

(4) 地球膨胀动力长期以来一直难以被人们接受的重要原因,固然与可靠地检验地球半径变化的技术手段在最近 20 多年刚刚成熟而未能提供地球膨胀的直接证据密切相关。但是,一些检验研究者所得结论的偏见,以及对于地球膨胀形成全球构造事件的规模估计不足这两方面的误导,不能说不是重要的影响因素。

虽然原始软流层的形成时间是按绝热等压过程求得,而且放射性元素衰变生热对于软流层形成时间的影响,已经包括在本文计算过程中的起算温度中了。但是,准确地确定软流层形成时间,应考虑放射性元素衰变生热的动态影响。

将原始地幔顶部一定厚度范围(如 100 km 左右)内的物质密度及其他热物理参数取为定值,也将影响地球原始软流层形成时间确定的准确性。考

虑这些物理参数随深度的变化,给出原始软流圈形成更为准确的时间,有待今后进一步的研究。以现代软流层的 15% 部分熔融程度为依据,计算原始软流层形成时间的误差,是需要进一步研究的问题。软流层的地球膨胀成因,还有待于岩石地球化学等研究成果的检验。

借此机会,谨向生前积极推动国内地球阶段性有限膨胀研究的著名古生物、古地理、前寒武纪地质和大地构造学家王鸿祯先生,致以崇高敬意和深切的怀念。正是由于王鸿祯先生等地球科学家们的积极倡导与推动,第 52 次香山科学会议(1996)提出了极具眼光的科学建议“开展地质、地球物理、地球化学和天文学等多学科交叉研究,从深部地质和宇宙地质方面研讨地球膨胀的可能性及可能的膨胀率,从而提出具有我国特色的地球动力学及演化的总体见解,力争在国际地学研究上占有一席之地。”

致 谢:感谢陆楠博士、刘静、刘燕翔等在查阅资料、核对稿件方面给予的帮助。

#### 参考文献(References):

- [1] Gutenberg B. Physics of the Earth's Interior [M]. New York: Academic Press, 1959: 240.
- [2] Condie K C. Plate Tectonics and Crustal Evolution (1982) [M]. Zhang Wenhua, Li Jiliang, translated. Beijing: Science Press, 1986: 24-28, 268-269. [康迪 K C. 板块构造与地壳演化(1982) [M]. 张雯华, 李继亮, 译. 北京: 科学出版社, 1986: 24-28, 268-269.]
- [3] Zeng Rongsheng. The Solid Geophysics [M]. Beijing: Science Press, 1984: 126-146, 259. [曾融生. 固体地球物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1984: 126-146, 259.]
- [4] Fu Chengyi, Chen Yuntai, Qi Guizhong. Fundamentals of Geophysics [M]. Beijing: Science Press, 1985: 420-422. [傅承义, 陈运泰, 祁贵仲. 地球物理学基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 420-422.]
- [5] Anderson D L. Theory of the Earth [M]. Guan Huaping, Yang Yurong, translated. Beijing: Seismological Press, 1989: 67-68. [安德森 D L. 地球的理论 [M]. 关华平, 杨玉荣, 译. 北京: 地震出版社, 1989: 67-68.]
- [6] Jacobs J A, Russell R D, Wilson J T. Physics and Geology [M]. Liu Guangding, translated. Beijing: Maritime Press, 1984: 204-205. [雅各布斯 J A, 拉塞尔 R D, 威尔逊 J T. 物理学与地质学 [M]. 刘光鼎, 译. 北京: 海洋出版社, 1984: 204-205.]
- [7] Clark S P, Ringwood A E. Density distribution and constitution of the mantle [J]. Reviews of Geophysics, 1964, 2(9): 35-88.
- [8] Jacobs J A. A Textbook on Geonomy [M]. Wu Jiayi, Chen Yangzheng, Chen Yong, et al, translated. Beijing: Seismological Press, 1979: 174. [雅各布斯 J A. 地球学教程 [M]. 吴佳翼, 陈

- 养正 陈颢 等译. 北京: 地震出版社, 1979: 174. ]
- [9] Anderson D L, Sammis C G. Partial melting in the upper mantle [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1970, 3: 41-50.
- [10] Lambert I B, Wyllie P J. Melting in the deep crust and upper mantle and the nature of low velocity layer [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1970, 3: 316-322.
- [11] Deng Jinfu, E Molan, Lu Fengxiang. The composition, structure and thermal condition of the upper mantle beneath northeast China [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1987, 6(1): 1-40. [邓晋福 鄂莫岚 路凤香. 中国东北地区上地幔组成、结构及热状态[J]. 岩石矿物学杂志, 1987, 6(1): 1-40. ]
- [12] Deng Jinfu, E Molan, Lu Fengxiang. The chemistry of Hannuoba basalts and their trends of magmatic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1988, 4(1): 22-33. [邓晋福 鄂莫岚 路凤香. 汉诺坝玄武岩化学及其演化趋势[J]. 岩石学报, 1988, 4(1): 22-33. ]
- [13] Jin Zhenmin, Borch R S, Green H W. Spinel lherzolite from olive rock under high temperature and high pressure deformation experiment and Shangdi mantle dynamics significance [C] // Upper Mantle Characteristic and Dynamics of China Proceedings. Beijing: Seismological Press, 1990: 102-111. [金振民, Borch R S, Green H W. 尖晶石二辉橄榄岩高温高压变形实验及其上地幔动力学的意义[C] // 中国上地幔特征与动力学论文集. 北京: 地震出版社, 1990: 102-111. ]
- [14] Teng Jiwen, Wei Siyu, Li Jinsen, et al. Structure of the upper mantle and low velocity layer of the mantle under the Xingtai Earthquake Region on the north China plain [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1982, 25(1): 59-64. [滕吉文 魏斯禹 李金森, 等. 华北平原邢台地震活动地区的上地幔结构和地幔低速层[J]. 地球物理学报, 1982, 25(1): 59-64. ]
- [15] Song Zhonghe, Zhu Jieshou, An Changqiang et al. The verticle velocity structure in the mantle of Beijing-Sahalin Profile [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1981, 24(3): 310-318. [宋仲和 朱介寿 安昌强, 等. 北京—萨哈林剖面的地幔纵向速度结构[J]. 地球物理学报, 1981, 24(3): 310-318. ]
- [16] Gu Zhijuan, Sun Tianze, Tao Jingling, et al. Experiment of went peridotite under high temperature-pressure and asthenosphere genesis [J]. *Progress in Geophysics*, 2001, 16(3): 40-46. [顾芷娟 孙天泽 陶京岭, 等. 高温高压下橄榄石含水实验和软流圈成因[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(3): 40-46. ]
- [17] Wang Hongzhen, Li X, Mei S, et al. Pangaea cyciles, Earth's rhythms, and possible Earth expansion [C] // Wang Hongzhen, et al, eds. Origin and History of the Earth. Proceedings of 30th International Geological Congress. Beijing, 1997, 1(1): 111-128.
- [18] Wang Hongzhen. Speculations on Earth's rhythms and continental dynamics [J]. *Earth Science Frontiers*, 1997, 4(3/4): 1-12. [王鸿祯. 地球的节律与大陆动力学的思考[J]. 地学前缘, 1997, 4(3/4): 1-12. ]
- [19] Chen Zhigeng, Wan Minghua. The correlation between the radii and the rotationl Inertia coefficients of the terrestrial planets and its geodynamical implication [J]. *Acta Astrophysics Sinica*, 1985, 5(4): 315-324. [陈志耕 万明华. 类地行星半径与转动惯量系数相关关系及其地球动力学意义[J]. 天体物理学报, 1985, 5(4): 315-324. ]
- [20] Chen Zhigeng. Expansion's Earth that the initial values of the basic parameters and the average rate of change [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1990, 33(5): 611-618. [陈志耕. 膨胀地球基本参数的初值及其平均变化率[J]. 地球物理学报, 1990, 33(5): 611-618. ]
- [21] Chen Zhigeng. Raised of the earth expansion, the development and the main facts [J]. *Journal of Hebei College of Geology*, 1992, 15(6): 586-594. [陈志耕. 地球膨胀说的提出、发展及其主要事实依据[J]. 河北地质学院学报, 1992, 15(6): 586-594. ]
- [22] Chen Zhigeng. The Factual Evidence, Theoretic Analysis of Tectonic Dynamics of Earth Expansion and the Numerical Simulation of Field Coupling [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2004. [陈志耕. 地球膨胀动力的事实依据、理论分析及场耦合数值模拟[D]. 北京: 中国矿业大学, 2004. ]
- [23] Wang Hongzhen, Zhu Hong, Jia Weimin, et al. Sinian world tectonics framework—Application of microcomputer automatic mapping of ancient continental locations reengineering [C] // Lithofacies Palaeogeography Collection (3). Beijing: Geological Publishing House, 1987: 1-13. [王鸿祯 朱鸿 贾维民, 等. 震旦纪世界构造格局——应用微型计算机自动成图对古大陆位置的再造[C] // 岩相古地理文集(3). 北京: 地质出版社, 1987: 1-13. ]
- [24] Wang Hongzhen, Mo Xuanxue. Discourse of Chinese tectonic [J]. *Geology in China*, 1996, 8: 4-9. [王鸿祯 莫宣学. 中国地质构造述要[J]. 中国地质, 1996, 8: 4-9. ]
- [25] Gerasimenko M D. Very likely that geodesy will soon resolve the main problem of the Earth evolution: A few new facts [C] // Proceedings of the 3th International Symposium 'Regularities of Structure and Evolution of Geospheres'. Vladivostok, 1996: 3-6.
- [26] Gerasimenko M D. A few geodetic arguments in the favour of hypothesis of expanding Earth [J]. *Far Eastern Mathematical Reports*, 1997, 3: 69-79.
- [27] Fu Rongshan, Huang Jianhua, Li Ligang, et al. The Earth in the expansion? Plate tectonics and earth geometry scale change [C] // Chinese Geophysical Society Fourteenth Session Annual Conference. Xi'an: Xi'an Map Press, 1998: 385. [傅容珊 黄建华 李力刚, 等. 地球在膨胀吗? 板块运动与地球几何尺度变化[C] // 中国地球物理学会第14届年会论文集. 西安: 西安地图出版社, 1998: 385. ]
- [28] Scalera G. The global paleogeographical reconstruction of the Triassic in the Earth dilatation framework and the paleoposition of india [J]. *Annals of Geophysics*, 2001, 44(1): 13-32.
- [29] Wei Dongping. A modern global plate motion and the rate of the Earth expansion [C] // Chinese Geophysical Society Nineteenth Session Annual Conference. Nanjing: Nanjing Normal University press, 2003: 474. [魏东平. 现代全球板块运动与地球膨胀速率[C] // 中国地球物理学会第19届年会论文集. 南京: 南京师范大学出版社, 2003: 474. ]
- [30] Gerasimenko M D. The problem of the change of the Earth di-

- mension in the light of space geodesy data [C] // Scalera G, Jacob K H, eds. Why Expanding Earth? — A book in Honour of Ott Christoph Hilgenberg: Proceedings of the 3rd Lautenthaler Montanistisches Colloquium, Mining Industry Museum. Lautenthal (Germany), INGV, Rome, 2003: 395-405.
- [31] Ma Zongjin, Song Xiaodong, Du Pinren, *et al.* Asymmetry between the southern and northern hemispheres of the Earth [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2002, 45(1): 26-33. [马宗晋, 宋晓东, 杜品仁, 等. 地球南、北半球的非对称性 [J]. 地球物理学报, 2002, 45(1): 26-33.]
- [32] Sun Fuping, Zhao Ming, Ning Jinsheng *et al.* Using space geodetic data detection the asymmetry changes of the global structural [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(20): 2225-2229. [孙付平, 赵铭, 宁津生, 等. 用空间大地测量数据检测地球的非对称性全球构造变化 [J]. 科学通报, 1999, 44(20): 2225-2229.]
- [33] Scalera G. TPW and polar motion as due to an asymmetrical Earth expansion [C] // Lavecchia G, Scalera G, eds. Frontiers in Earth Sciences: New Ideas and Interpretations. Annals of Geophysics, 2006, 49(2/3): 483-500.
- [34] Shen Wenbin, Chen Wei, Li Jin. Confirmed by the time-varying gravity field of the Earth expansion effect [C] // Chinese Geophysical Society Twenty-third Annual Conference. Qingdao: Ocean University of China Press, 2007: 392-393. [申文斌, 陈巍, 李进. 由时变重力场证实地球膨胀效应 [C] // 中国地球物理学会第 23 届年会论文集. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2007: 392-393.]
- [35] Shen Wenbin, Zhang Zhenguo. Detecting the Earth expansion effect based on space-geodetic data [J]. *Mapping Science*, 2008, 33(3): 5-6. [申文斌, 张振国. 利用空间大地测量数据探测地球膨胀效应 [J]. 测绘科学, 2008, 33(3): 5-6.]
- [36] Han Jiancheng, Shen Wenbin, Chen Wei, The estimation of the Earth expansion effect based on long-term changes of GM [C] // Chinese Geophysical Society, Proceedings of the Twenty-Fourth Annual Conference. Beijing, 2008: 314-315. [韩建成, 申文斌, 陈巍. 根据 GM 的长期变化推估地球膨胀效应 [C] // 中国地球物理学会第 24 届年会论文集. 北京, 2008: 314-315.]
- [37] Cao Shuai, Zhang Keliang, Wei Dongping. Global plate motion and its impact on the Earth's surface area changes [J]. *Earthquake*, 2009, 29(4): 14-22. [曹帅, 张克亮, 魏东平. 板块运动及其对地球表面积变化的影响 [J]. 地震, 2009, 29(4): 14-22.]
- [38] Sun Rong, Shen Wenbin. Detection of the Earth expansion by space geodetic data [C] // Chinese Geophysical Society the Twenty-sixth Annual Meeting and Chinese Seismological Society the Thirteenth Academic Conference Collection. Ningbo, 2010: 719-720. [孙榕, 申文斌. 由空间大地测量数据探测地球膨胀 [C] // 中国地球物理学会第 26 届年会, 中国地震学会第 13 次学术大会论文集. 宁波, 2010: 719-720.]
- [39] Shen W B, Sun Rong, Chen Wei, *et al.* The expanding Earth at present: Evidence from temporal gravity field and space-geodetic data [J]. *Annals of Geophysics*, 2011, 54(4): 436-453.
- [40] Wu X, Collilieux X, Altamimi Z, *et al.* Fukumori (8 July 2011), Accuracy of the International Terrestrial Reference Frame origin and Earth expansion [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(13): 1-5.
- [41] Huang Liren, Ma Zongjin, Zhu Jianxin, *et al.* The newest observational evidence on asymmetrical deformation of the Earth [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 24(2): 196-199. [黄立人, 马宗晋, 朱建新, 等. 地球非对称变形的最新观测证据 [J]. 地震学报, 2002, 24(2): 196-199.]
- [42] Sun Fuping, Zhu Xinhui, Wang Ren, *et al.* Detection of changes of the Earth's volume and geometry by using GPS and VLBI data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 1015-1021. [孙付平, 朱新慧, 王刃, 等. 用 GPS 和 VLBI 数据检测固体地球的体积和形状变化 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1015-1021.]
- [43] Dziewonski A M, Anderson D L. Preliminary reference Earth model [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1981, 25: 297-356.
- [44] McElhinney M W, Taylor S R, Stevenson D J. Limits to the expansion of Earth, Moon, Mars, and Mercury and to changes in the gravitational constant [J]. *Nature*, 1978, 271(5346): 316-321.
- [45] Dearnley D R. Orogenic fold-belts, Convection and expansion of the Earth [J]. *Nature*, 1965, 206: 4991.
- [46] Lubimova E A, Polyck B G. Heat flow map of Eurasia [J]. *Geophysical Monograph Series*, 1969, 13: 82-88.
- [47] Chen Zhigeng. A tentative discussion on the state of Earth core matter and its quantum Earth dynamics [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2002, 26(4): 273-279. [陈志耕. 地核物态及其量子地球动力探讨 [J]. 物探与化探, 2002, 26(4): 273-279.]
- [48] Jordan P. Schwerkraft und Weltall [M]. California: Braunschweig, 1952.
- [49] Dicke R H. Principle of equivalence and the weak interactions [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1957, 29: 355.
- [50] Dicke R H. Implications for cosmology of stellar and galactic evolution rates [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1962, 34(1): 110-122.
- [51] Peebles J, Dicke R H. The temperature of meteorites and Dirac's cosmology and Mach's principle [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1962, 67: 2939.
- [52] Lubimova H A. Thermal history of the Earth with consideration of the variable thermal conductivity of its mantle [J]. *Geophysical Journal International*, 1958, 1(2): 115-134.
- [53] Beck A E. Energy requirements of an expanding Earth [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66(5): 1485-1490.
- [54] Birch F. On the possibility of large changes in the Earth's volume [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1968, 1(3): 141-147.
- [55] Yang Jianliang, Yang Ming. Improvement of general relativity and cracking of cosmological puzzles [J]. *Journal of Vectorial Relativity*, 2011, 6(1): 117-137.

- [56] Yuan Lixin. Study on the consistency between the Earth's expansion and ancient deposition, change of the Physics[J]. *Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition)*, 2012, (4): 116-122. [袁立新. 古沉积、相关物理演化与地球膨胀的一致性研究[J]. 吉林师范大学学报: 自然科学版, 2012, (4): 116-122.]
- [57] Chudinov Yu V. Global Edution Tectonics of the Expanding Earth[M]. Amsterdam: VSP BV, 1998.
- [58] Chen Zhigeng. The expansion of tectonic mechanism of preliminary explore [C] // The Third Countrywide Tectonic Dynamic Symposium. Yichang, 1986, (1): 2-3. [陈志耕. 膨胀地球大地构造作用机制初探[C] // 全国第三届地球构造动力学学术会议论文集, 宜昌, 1986, (1): 2-3.]
- [59] Chen Zhigeng, Liu Taifeng, Feng Chaojun, *et al.* The homoplastic research of physical simulation of Earth's expansive tectonic dynamics[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1996, 39( Suppl. 1): 95-106. [陈志耕, 刘泰峰, 冯朝军, 等. 地球膨胀构造动力物理模拟的相似性研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39( 增刊 1): 95-106.]
- [60] Chen Zhigeng. The evolution model of the Earth's limited expanding[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44( 9): 912-920. [陈志耕. 地球有限膨胀演化模型[J]. 科学通报, 1999, 44( 9): 912-920.]
- [61] Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailing, *et al.* China Eastern lithospheric root/de-rooting and mainland "activated" [J]. *Modern Geology*, 1994, 8( 3): 349-356. [邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部岩石圈根/去根作用与大陆“活化”[J]. 现代地质, 1994, 8( 3): 349-356.]
- [62] Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue. China Continental Root-column Structure—A Key, Continental Dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 110. [邓晋福, 赵海玲, 莫宣学. 中国大陆根—柱构造——大陆动力学的钥匙[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 110.]
- [63] Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Zhao Hailing, *et al.* The Yanshanian lithosphere-asthenosphere catastrophe and metallogenic environment in east China[J]. *Mineral Deposits*, 1999, 18( 4): 309-314. [邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期岩石圈—软流圈系统大灾变与成矿环境[J]. 矿床地质, 1999, 18( 4): 309-314.]
- [64] Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Shao Ji'an, *et al.* Asthenospheric upwelling and lithospheric thinning in late Cretaceous-Cenozoic in eastern North China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13( 2): 86-92. [路凤香, 郑建平, 邵济安, 等. 华北东部中生代晚期—新生代软流圈上涌与岩石圈减薄[J]. 地学前缘, 2006, 13( 2): 86-92.]
- [65] Li Jijun, Wen Shixuan, Zhang Qingsong, *et al.* The uplift's period, scope and type of the Tibetan Plateau[J]. *Science in China (Series A)*, 1979, 6: 608-616. [李吉均, 文世宣, 张青松, 等. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨[J]. 中国科学: A 辑, 1979, 6: 608-616.]
- [66] Shi Yafeng, Li Jijun, Li Bingyuan, *et al.* Uplift of the Qinghai-Xizang( Tibetan) Plateau and east Asia environmental change during late cenozoic [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54( 1): 10-21. [施雅风, 李吉均, 李炳元, 等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化[J]. 地理学报, 1999, 54( 1): 10-21.]
- [67] Wu Zhenhan, Wu Zhonghai, Hu Daogong, *et al.* Geological evidences for the Tibetan Plateau uplifted in Late Oligocene [J]. *Journal of Geology*, 2007, 81( 5): 577-587. [吴珍汉, 吴中海, 胡道功, 等. 青藏高原渐新世晚期隆升的地质证据[J]. 地质学报, 2007, 81( 5): 577-587.]
- [68] Sun Ronggui. History of Geological Science[M]. Beijing: Peking University Press, 1984: 327. [孙荣圭. 地质科学史纲[M]. 北京: 北京大学出版社, 1984: 327.]
- [69] Vening Meinesz F A. Shear patterns of the Earth's crust [J]. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 1947, 28( 1): 61.
- [70] Richardson R M, Solomon S C, Sleep N H. Tectonic stress in the plates [J]. *Reviews of Geophysics*, 1979, 17( 5): 981-1019.
- [71] Li Siguang. The Basis and Method of Geological Mechanics[M]. Beijing: Zhonghua Book Company, 1945. [李四光. 地质力学的基础与方法[M]. 北京: 中华书局, 1945.]
- [72] Sun Dianqing, Zhang Guoduo. simulation experiments in rotating sphere on the geological structure [C] // International Exchange Geology Collection ( a ). Beijing: Geological Publishing House, 1980. [孙殿卿, 张国铎. 地质构造在旋转球体上的模拟实验[C] // 国际交流地质文集( 一 ). 北京: 地质出版社, 1980.]
- [73] Wang Suyun, Chen Peishan. A numerical simulation of the present tectonic stress field of China and its vicinity [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1980, 23( 1): 35-45. [汪素云, 陈培善. 中国及邻区现代构造应力场的数值模拟[J]. 地球物理学报, 1980, 23( 1): 35-45.]
- [74] Shui Guren, Watanabe Hiko. The Earth's thermology, Yan Bo lecture, Earth science, 1 [C] // Research on the Basic Theory of Geothermal. Wang Weiyong, Huang Shangyao, *et al.*, translated. Beijing: Geological Publishing House, 1982: 35. [水古仁, 渡部晖彦. 地球热学, 岩波讲座, 地球科学 I [C] // 地热基础理论研究. 王维勇, 黄尚瑶, 等译. 北京: 地质出版社, 1982: 35.]
- [75] Jiang Hanwen. Thermal Engineering [M]. Beijing: Higher Education Press, 1994: 483. [蒋汉文. 热工学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994: 483.]
- [76] Zhang Qiang. Advanced Heat Transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 238. [张强. 高等传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 238.]
- [77] Li Yusuo, Xiu Jigang, Li Jitai, *et al.* Volcano Eruption Mechanism and Prediction [M]. Beijing: Seismological Press, 1998: 19. [李玉锁, 修济刚, 李继泰, 等. 火山喷发机制与预测[M]. 北京: 地震出版社, 1998: 19.]
- [78] Stacey F D. Geophysics [M]. Fu Chengyi, *et al.* translated. Beijing: Seismological Press, 1981: 338. [斯特西 F D. 地球物理学[M]. 傅承义, 等译. 北京: 地震出版社, 1981: 338.]
- [79] Xi Zezong. Five Milestones of The Human Understanding of Nature [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000: 179. [席泽宗. 人类认识世界的五个里程碑[M]. 北京: 清华大学出版

- 社 2000: 179. ]
- [80] DeMets C, Gordon G R, Angus D F, *et al.* Current Plate motion [J]. *Geophysical Journal International*, 1990, 101( 3 ): 425-478.
- [81] Chen Zhigeng. The evolution model of the Earth's limited expanding[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45( 4 ): 304-312.

## The Earth Expansion Generated the Asthenosphere and Its fFormation Time

Chen Zhigeng

( *Institute of Geodynamics and Application Hebei College of Geology, Shijiazhuang 050031, China* )

**Abstract:** The Earth's asthenosphere may refer to the dynamic source of global tectonics, magmatism and mineralization. Although people have recognized the importance of the asthenosphere's tectonic dynamic, magmatism and mineralization, there is little in-depth study of its formation mechanism in specific and quantitative tools. In recent twenty years, a series of research results in the radius change of the Earth show that the expansion of the Earth has much direct evidence. Accordingly, even calculated by inflation rate ( 0.1 mm/a ) of the radius of the late Earth expansion, the result of the Earth expansion will also be a global super tectonic event. According to the nonlinear limited expansion evolution of the Earth, the asthenosphere cause model is that, the expansion internal pressure from the original deep Earth pushes the top of the primitive mantle acting and is converted into compression energy  $A$  acting on the top mantle material under confined by original lithosphere shell. When the accumulating compression energy exceeded the thermal energy  $\Omega$  required to melt the part of material on top original mantle, the uppermost mantle material began to melt and gradually formed the Earth's primitive asthenosphere. Accordingly, assuming that the radial growth rate of nonlinear limited expansion at the beginning expansion period of the Earth is 1.08 mm/a, the meltdown rate of the top material of primitive mantle is 15%, under the condition of adiabatic isobaric process, it will only need 19.2 Ma to form the Earth's original asthenosphere after the Earth began to expand.

**Key words:** Expansion of the Earth; The Earth expansion test; Causes of the asthenosphere; Formation time of the asthenosphere; Global super tectonic events.