高压物理学报

基于岩浆凝固的地壳动力学研究

霍睿智，贺端威

引用本文：

霍睿智，贺端威. 基于岩浆凝固的地壳动力学研究 [J]. 高压物理学报，2018，32(5)：051201.

HUO Ruizhi，HE Duanwei. Crustal Dynamics Based on Magma Solidification [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2018，32(5)：051201.

当期更多内容≫

您可能感兴趣的其他文章：

近十年我国在地球内部物质高压物性实验研究方面的主要进展

刘曦，代立东，邓力维，范大伟，刘琼，倪怀玮，孙樯，巫翔，杨晓志，翟双猛，张宝华，张莉，李和平

DOI：10.11858/gywlxb.2017.06.001

石榴子石族矿物状态方程研究进展

范大伟，李博，陈伟，许金贵，匡云倩，叶之琳，周文戈，谢鸿森

DOI：10.11858/gywlxb.20170597

泥质岩体系高温高压变质过程中温度对石榴子石 Fe-Mg 分异的影响

李营，杜建国，谢超，周志华

DOI：10.11858/gywlxb.2015.05.002

高温高压下榴辉岩和玄武岩热扩散系数的测量

陈刚，李和平，苗社强

DOI：10.11858/gywlxb.2016.01.004

月幔条件下水在橄榄石中扩散的实验研究

谢梦雨，鹿亚飞，邹心宇，邓力维

DOI：10.11858/gywlxb.20170645

DOI: 10.11858/gywlxb.20180599

基于岩浆凝固的地壳动力学研究*

霍睿智[1,2],贺端威[1,2]

(1.四川大学原子与分子物理研究所,四川 成都 610065;
2.四川大学高能量密度物理教育部重点实验室,四川 成都 610065)

摘要:地球在形成之初处于熔融状态,随着时间的推移,地球表面的岩浆不断冷却、凝固,发展成现在的圈层结构,并且地球物质的冷却及液-固转变依然在持续。通过对地震发生后地球日长变化进行统计分析,发现总体上地震后地球自转速率加快。分析认为,这一现象是由于地幔部分岩浆冷却凝固使地壳岩石圈下部体积塌缩所致。由此,建立了一个地壳动力学模型,以解释地壳各板块间的相互作用和相对运动,并且认为地震等地质活动的动力学成因主要是地球内部熔体持续凝固所导致的地壳下部体积收缩、压力减小,在重力作用下,构成地壳的各板块之间的相互作用加剧,原有力学结构失稳,发生大规模岩层错位、断裂,从而引起地震、火山爆发等剧烈的地质活动。通过建立热学模型和力学模型,验证了上述观点。

关键词:地壳动力学;岩浆凝固;地震机制;日长

中图分类号: P65;P553 **文献标识码**:A

作为太阳系的一个重要组成部分,地球自冥古宙[1-2]因尘埃与气体的聚集作用形成以来,一直经历着长时间的复杂演变,该演变过程实际上是一个持续冷却过程。冥古宙初期,地球上没有任何岩石,到处都是沸腾的岩浆,到现在成为具有圈层分异的球体,期间经历了包含地核、地幔、地壳以及大气圈与海洋的复杂分异和演变过程。

自 20 世纪 60 年代以来,由于多学科相互渗透和融合,地球动力学不断得到新的发展。地球动力学概念框架的构建和内容的充实过程经过了大陆漂移[3]、海底扩张[4-6]和板块构造[7-9]3 个阶段。海底扩张的提出是以海洋地球物理和海洋地质为基础,认为:当地幔对流从洋中脊升起时,产生了新的洋壳,并向洋脊两边移动扩散;当地幔对流在大陆下方升起时,大陆将“被动”地裂开并向两侧移动,在分开的两块大陆的中间形成新的洋底[4]。板块概念是以全球地震活动的成带性作为根据,于是地震活动成为板块构造的主要研究内容。此外,地震活动、地壳运动、火山喷发、地下资源等的预测和预报逐步发展起来,开启了地球动力学的新内容——地壳动力学。

板块构造学派大多以地幔对流[10]作为驱动力,认为地球内部放射性物质衰变发热所导致的地热变化会引起重力的差异,形成地壳岩层内部应力集中的不稳定状态,发生地震等物质的大规模运动,当能量释放后,又恢复到相对平衡状态。然而,地震等地壳运动的力源依然存在争议。

本研究通过收集、统计和分析全球近几十年来的大地震数据,探索地球内部和地壳运动现象的内在联系,建立新的模型,以解释地震发生机制及板块构造运动的驱动力和物理机制。

1 模型的设计原理

天文观测表明,地球自转速度是有变化的,并且有长期变化、季节变化和不规则的加速度变化

* **收稿日期**: 2018-07-14; **修回日期**: 2018-07-16
基金项目: 中国工程物理院中子物理学重点实验室课题(2014AB01);国家自然科学基金(51472171,11427810)
作者简介: 霍睿智(1993—),女,硕士,主要从事地壳动力学研究. E-mail:2323155992@qq.com
通信作者: 贺端威(1969—),男,博士,教授,主要从事大腔体静高压技术、超硬材料及高压下的弹塑性研究. E-mail:duanweihe@scu.edu.cn

等[11-12]。而一次里氏震级 $M_s=8$ 的地震，所释放的地震波能量约为 6.3×10^{16} J；一次 $M_s=8.8$ 级地震，所释放的地震波能量约为 10^{18} J。一次大震的发生可以波及大半个地球，从而对地球自转速率产生明显的影响。Stoyko 等[13]早在 1969 年就发现在全球范围内，中、深源地震能量的释放与地球自转速率的变化存在高相关性。Chao 等[14]根据地球的标准模型理论(1066B)以及对地震源的质心距张量解，计算了 9 000 多个地震对地球自转和重力场低阶带谐系数的影响，分析结果表明：地震对地球自转和重力场变化的影响有较强的非随机性，地震会加速地球自转。2004 年 12 月 30 日发表在《Nature》上的一篇新闻报道称："2004 年 12 月 26 日发生在苏门答腊的地震使地球自转加快了约 3 μs[15]。"在美国宇航局(NASA)上的新闻报道称：2010 年 2 月 27 日发生在智利的 8.8 级地震可能使地球日长(Length of Day，LOD)缩短了 1.26 μs[16]；2011 年 3 月 11 日发生在日本的 9.0 级地震可能将地球 LOD 缩短了 1.8 μs[17]。那么，事实是否如新闻报道那般，大地震会导致地球自转速率加快呢？

本研究对 1963～2016 年这 54 年间全球发生的 7.5 级以上地震数据及地震后地球半个月内的 LOD 变化进行了统计分析(地震数据来自美国地震台网(USGS)；地球自转变化数据源自国际地球自转服务中心(IERS)的地球定向参数，取自 EOP(IERS) 08 C04 的 LOD 时间序列)，发现：54 年间全球发生 7.5 级以上地震 232 次，其中地震后地球自转即时加快发生 97 次，地震后 1～2 d 地球自转加快的次数为 27，地震后地球自转在一周内减慢但随后加快的次数为 80，地震后半个月内地球自转速率未超过地震当天的次数为 28。也就是说，地震后地球自转处于加快状态的比例居多，约为 90%。

那么，是什么原因导致地震后地球自转加快呢？从地质或宇宙发展的时间尺度上看，地球自转是趋势性减慢，但在短时间内地球的角动量仍可认为是守恒的。根据角动量守恒定律

$$L_e=\frac{d}{dt}(m_e r_e^2\omega_e) \tag{1}$$

式中：L_e 为角动量，m_e 为物体质量，r_e 为旋转半径，ω_e 为旋转角速度。大地震后地球自转加速必然是地球半径减小的结果。

本研究认为，导致地球半径变小的原因如下：由于地幔部分的岩浆持续冷却凝固，造成地壳下部的体积塌缩、压力降低，在重力作用下地壳岩石圈层所承受的载荷增大，当应力局部集中超过地壳岩石强度时，将导致大规模岩石断裂、错位，以地震的形式释放应力，在宏观上表现为地球体积收缩。因此，地震在总体上会引起地球半径变小，进而导致地球的自转速率增加。至于地震发生后出现的地球自转速率先减小后增大的现象，我们认为其原因在于：岩浆在凝固过程中会释放凝固潜热，这些热量通过固-液界面向周围散发，在短时间内释放的潜热可能超过体系向外散失的热量，造成局部热量积聚和升温(类似于金属熔体凝固时的"再辉"现象)，从而导致地壳下部部分物质膨胀，体积增加，进而引起地球半径增大，地球自转减慢；随后，热量通过多种形式散失，总体上造成地壳下部体积塌缩，地球半径变小，最终引起地球自转速度增大。

概括来说，之所以会发生地震，是由于地幔部分的岩浆持续冷却凝固，造成地壳下部体积塌缩，压力减小；在重力作用下，构成地壳各板块间的相互作用加剧，原有力学结构失稳，发生大规模岩层断裂、错位，从而引起地震的发生。这一过程在总体上会造成地球半径变小，进而导致地震后地球自转速率增加。

2　模型建立

2.1　热学模型的建立

因为地球物质的液-固转变可以近似为等温过程，我们认为地球向外太空的散热量主要来自于岩浆(包括液态外核)持续冷却凝固所释放的潜热。岩浆凝固会伴随体积收缩，并导致固态岩石圈-液态岩浆界面处压力降低，在重力作用下地壳各板块间的相互作用加剧，在宏观上主要表现为挤压加剧。由于地壳构成与力学性能的非均匀性，以及压力波动所导致的岩浆液-固相变界面振荡，局部会出现剪切、拉伸应力的变化。这些相互作用的变化所积聚的能量将通过突发的岩层断裂、错位等地质活动释放，此为地

震的主要成因。因此,岩浆持续冷却凝固会引起地壳下部压力减小,地壳主要以地震的方式进行自我调整,达到力学平衡,其过程在总体上会引起地球体积收缩及自转加快。

本研究将根据地震引起的 LOD 变化计算地球体积的年收缩率,然后根据地球体积年收缩量等于岩浆凝固所导致的体积收缩量,计算地球每年的岩浆凝固量及散热量,再将其与地球每年向外太空的散热量进行比对,建立热学模型。具体过程如下。

(1) 根据地震后地球自转加快计算地球体积年收缩量

O'Connell 等[18]计算了 1900～1964 年 30 次大震引起的地球 LOD 变化,发现有 24 次造成地球 LOD 减小,且地震引起的 LOD 缩短率约为 6 μs/yr。本研究统计了不同学者对几次突出强震引起的地球 LOD 变化(Δt)的计算结果[19-21](见表 1),得到平均每次强震会使地球自转加快约 1.3 μs。根据通过 USGS 获取的地震数据,统计 1963～2016 年 7.5 级以上地震,共计 232 次,平均每年发生 4 次大震,即大震对地球 LOD 变化的累积效应约为 5.2 μs/yr。由此计算得到地球体积年收缩量约为 390 km^3。

表 1　6 次大地震及其对 LOD 变化的影响

Table 1　The influences of six great earthquakes on the changes in length-of-day (ΔLOD)

No.	Aera	Date	Latitude/(°)	Longitude/(°)	Depth/km	Moment magnitude	ΔLOD	Ref.
1	Bio-Bio,Chile	1960-05-22	−38.143	−73.407	25	9.5	−8.4	[14]
2	Southern Alaska	1964-03-28	60.908	147.339	25	9.2	6.8	[14]
3	Offshore Valparaiso, Chile	1985-03-03	−33.135	71.871	33	8.0	−0.1	[19]
4	Michoacan,Mexico	1985-09-19	18.190	102.533	27.9	8.0	−0.085	[14]
5	Off the west coast of northern Sumatra	2004-12-26	3.295	−95.982	30	9.1	−0.48	[20]
6	Near the east coast of Honshu,Japan	2011-03-11	38.296	142.373	29	9.1	−5.81	[21]
	Average						−1.3	This work

(2) 地球上每年岩浆凝固量计算

设定岩石圈平均厚度为 100 km[22-24],岩石圈底部温度为 1 200 ℃[25]、压力为 3.1 GPa[24]。不同学者采用热电偶、光学高温计、红外辐射测量法等测试手段,测得全球不同地区的岩浆温度均在 1 000～1 200 ℃,故设定岩石圈底部软流圈上部的岩浆温度为 1 200 ℃[26-31]。本研究收集了世界各地不同类型岩浆岩的主要矿物成分及其质量分数[32-46](见表 2),通过分析得到构成岩浆的主要矿物及其质量分数。

根据地震后地球自转加快的时间所计算的地球体积年收缩量等于岩浆凝固所导致的体积收缩量 ΔV,有

$$\frac{m}{\rho_0}-\frac{m}{\rho}=\Delta V \tag{2}$$

式中:m 为发生凝固的岩浆质量,ρ_0 和 ρ 分别为岩浆凝固前、后的密度。

本研究收集了不同熔融岩浆在高温高压下的密度[47-49](见表 3),发现不同熔融岩浆在 3.1 GPa、不同温度下的密度差别不大,也就是说温度对熔融岩浆密度的影响不是很大。选定 2.88 g/cm^3 作为熔融岩浆的密度是因为洋中脊玄武岩的主要化学成分及其含量(质量分数)与本研究设定的岩浆成分接近。

本研究还收集了不同固态岩浆岩在 3.1 GPa、1000 ℃下的密度[50](见表 4),发现如果两种岩浆岩按体积比 1∶1 混合,其主要化学成分的质量分数同本研究设定的岩浆成分接近,故将 3.3 g/cm^3 设为岩浆凝固后的密度。因此岩浆凝固过程中密度变化 14.6%,而根据 Ohtani 等[48]绘制的熔融玄武岩在高温高压下的压缩曲线估算得到岩浆在 3.1 GPa 等温恒压凝固时的密度变化约为 13%,与本研究结果差别不大,从而认为本研究所取数据是基本合理的。

将相关数据代入(2)式,计算得到岩浆发生凝固的质量 m 约为 8.8×10^{15} kg。

表 2　全球不同类型岩浆岩的主要化学成分

Table 2　Main chemical compositions for different types of magmatic rocks on Earth

Type of rock	Mass fraciton/%								Ref.
	SiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	Sum	
Alkali olivine basalts	46.7	15.1	11.7	7.7	9.9			98.2	[32]
Tholeiitic basatle (tholeiites and olivine Tholeiites) of the Hawailian Islands	49.36	13.94	8.53	8.44	10.3			99.03	[33]
Alkalic basalt	46.46	14.64	9.11	8.19	10.33			99.71	[33]
Picrite basalt of oceanite type	46.41	8.53	9.82	20.81	7.38			100.1	[33]
Hawaiite ('andesine andesite')	48.6	16.49	9.11	8.19	10.33			99.23	[33]
Primary tholeiite of the Izu-Hakone region	48.73	16.53	8.44	8.24	12.25			100.02	[34]
Olivine basalt of Niuafo'au	50.37	14.65	9.24	7.13	11.74			99.8	[35]
Tholeiitic picrite-basalt	46.4	8.5	9.8	20.8	7.4			99.7	[36]
Ankaramite	44.1	12.1	9.6	11.5	13			99.3	[36]
K-poor alkali olivine basalt	45.4	14.7	9.2	7.8	10.5			99.3	[36]
Hawaiite	47.9	15.9	7.6	4.8	8			99.1	[36]
Nephelinite	39.7	11.4	8.2	12.1	12.8			98.4	[36]
Olivine tholeiite	49.16	13.33	9.71	10.41	10.93			100.12	[37]
Tholeiite	53.8	13.9	9.3	4.1	7.9			100.7	[38]
Tholeiite andesite	59.31	13.77	6.48	2.27	5.58	3.91		97.97	[39]
Icelandite	61.76	15.36	5.84	1.76	5.04	4.37		100.0	[40]
High-alumina basalt	49.15	17.73	7.2	6.91	9.91			99.18	[38]
High-alumina andesite	58.65	17.43	3.48	3.28	6.26	3.82		99.1	[39]
Dacite	69.68	15.21	1.9	0.91	2.7	4.47		99.46	[40]
Rhyolite	73.23	14.03	1.7	0.35	1.32	3.94	4.08	99.56	[40]
Pantellerite	69.8	7.4	6.15	0.05	0.45	6.7	4.3	98.19	[41]
Commendite	75.23	11.99	1.25	0.02	0.27	4.79	4.67	99.42	[41]
Alkalic picrite-basalt	46.57	8.2	9.75	19.65	9.43			99.79	[42]
K-rich alkali olivine basalt	42.43	14.15	8.48	6.71	11.91			99.18	[43]
Trachybasalr	46.48	16.68	7.3	4.65	9.4			99.68	[43]
Trachyte	60.7	20.5	0.4	0.2	1.4	6.2	6.7	99.13	[43]
Tristanite	55.85	18.98	3.11	2.04	4.51	5.16		98.63	[44]
Benmorite	55.64	16.38	4.91	1.06	2.9	6.07	3.49	95.23	[44]
Phonolite	60.64	18.29	1.18	0.09	0.83	8.93	5.1	98.08	[45]
Wyomingite	54.09	9.94	1.48	6.99	4.71		11.38	97.3	[46]
Average	53.41	14.19	6.67	6.30	7.31			99.087	

(3) 将每年地球岩浆凝固散发热量与地球年散热量进行比较，验证猜想。

岩浆凝固散发的热量 Q 为

$$Q = Lm \tag{3}$$

式中：L 为岩浆的凝固潜热。岩浆的凝固潜热为 500 J/g[51-53]，代入(3)式得到每年地球岩浆凝固释放的热量 Q 约为 4.4×10^{21} J。对于地球年散热量的估算，有的学者通过对地球不同圈层物质的相关性质进行计算得到[54]，有的学者通过在全球不同地点进行热流量测定然后对全球散热量进行估算[55-56]，也有学者通过建立模型进行计算[57]，所得地球年散热量的数量级均为 10^{21} J。本研究计算得到的地球每年岩浆凝固放热量与其他学者估算的地球年散热量为同一数量级，从而验证了我们的猜想是正确的。

表 3　不同熔融岩浆的化学成分及其在高温高压下的密度

Table 3　Chemical compositions of different molten magmas and their densities at high temperature and high pressure

Type of molten magma	Mass fraciton/%						Density/(g·cm^{-3})	Ref.
	SiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Sum		
Magma*	53.41	14.19	6.67	6.3	7.31	99.1	2.88	This work
PHN1611	45.1	2.8	10.4	38.4	3.4	100	2.87[a],2.94[b]	[47]
Mid-ocean ridge basalt	51.81	15.95	9.97	7.86	11.69	100	2.88[c]	[48]
Hydrous peridotite magma	45.9	3.8	8.5	32.5	3.6	99.2	2.77[d],2.8[e],2.83[f]	[49]

Note:(1) The asterisk "*" represents the main chemical compositions of magma in this paper.

(2) The letter "a" and "b" represent the values come from compression curves of PHN1611 melt at 31 kPa/2 360 ℃ and 31 kPa/2 030 ℃ respectively.

(3) The letter "c" represents the value comes from compression curves of basaltic melts at 31 kPa/2 200 ℃.

(4) The letter "d","e" and "f" represent the values come from isothermal compression curves of the peridotite melt at 31 kPa/1 973 K,31 kPa/1 873 K and 31 kPa/1 773 K respectively.

表 4　不同固态岩浆岩的化学成分及其在高温高压下的密度

Table 4　Chemical compositions of different solid magmatic rocks and their densities at high temperature and pressure

Type of magmatic rock	Mass fraciton/%						Density/(g·cm^{-3})	Ref.
	SiO_2	Al_2O_3	FeO	MgO	CaO	Sum		
Average sediment	62.77	13.12	4.28	3	8.76	100	3.16[c]	[50]
Mid-ocean ridge basalt	49.67	16.1	7.3	11.42	7.66	100	3.5[d]	[50]
Hypothetical magmatic rock[a]	56.22	14.61	5.79	7.21	8.21	100	3.3[e]	This work
Magma[b]	53.41	14.19	6.67	6.3	7.31	99.1	3.3[e]	This work

Note:(1) The letter "a" represents an hypothetical magmatic rock which is a mixture of average sediment and mid-ocean ridge basalt in a ratio of one to one.

(2) The letter "b" represents the main mineral composition content of the magma which is set in this paper.

(3) The letters "c" and "d" represent the values come from density chart for average sediment and MORB at 3.1 GPa/1 000 ℃ respectively.

(4) The letter "e" represents the value is the average of c and d.

2.2　力学模型的建立

岩浆凝固导致地壳下部压力减小,在重力作用下,若压力减小量超过壳层岩石所能承受的最大荷载,则可引发地壳岩石层的大规模断裂、错位,出现地震。

将地球简化为一个简单的球壳模型,计算球壳能够承受的临界弹性屈曲荷载,则可模拟由于岩浆凝固所导致的压力减少是否会引起球壳的坍塌,从而建立力学模型。具体过程如下。

(1)将地球简化为一个简单的球壳模型

将地球看作一个理想的简单球壳,壳层下部看作力学承受面。壳层的主要成分定为花岗岩。壳层厚度定为 33 km,其原因是:将 1963～2016 年全球 7.5 级以上地震震深做频次分布图(见图 1),可以发现,震源深度在 20～40 km 的地震频次最多,故将 33 km 处看作等效力学中心面。

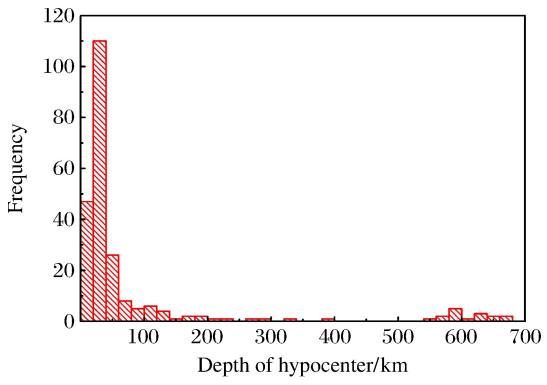


图 1　1963～2016 年 7.5 级以上地震的震源深度分布

Fig. 1　Focal depth distribution of earthquakes above magnitude 7.5 from 1963 to 2016

对于一个理想球壳,它在外压下所能承受的临界弹性屈曲荷载 p 可由下式[58]求得

$$p=\frac{2E}{\sqrt{3(1-\mu^2)}}\left(\frac{t}{R}\right)^2 \tag{4}$$

式中：E 为杨氏模量，t 为壳层厚度，R 为球体半径，μ 为泊松比。花岗岩的杨氏模量可由下式[59]计算得到

$$E(T)=1.289+207.229\exp(-T/11.911)+12.019\exp(-T/871.270)\quad(R=0.98271) \tag{5}$$

由温度梯度可知，距离地表 33 km 处的温度约为 412.75 ℃，计算得到花岗岩杨氏模量约为 8.77 GPa。花岗岩的泊松比 μ 定为 0.2，球体半径即为地球半径 6 370 km。将相关参数代入(4)式，即可求得壳层所能承受的最大屈曲荷载 p，约为 0.26 MPa。

(2) 计算因岩浆凝固所导致的岩石圈底部压力减少量

对岩石圈底部(100 km 深)进行受力分析：岩浆未发生凝固前，固-液界面力学平衡；当岩浆持续冷却发生凝固后，固-液界面处由于部分岩浆凝固成固体，使得界面处所受重力增加，浮力减小，力学平衡被打破，压力的减少量 Δp 为

$$\Delta p=\frac{2mg}{S} \tag{6}$$

式中：g 为重力加速度，S 为平均每年重灾区面积。根据 1964～2016 年间地震数据统计，大约每年有一次 8 级以上地震发生。震级与最大烈度[60]有如下关系

$$M=0.62I_0+1.68\lg h-0.95 \tag{7}$$

式中：M 为震级，I_0 为最大烈度，h 为震源深度。取震源深度为 33 km，计算得到 8 级地震对应的最大烈度 I_0 为 10 级。当烈度达到 7 级时，钢筋混凝土框架房屋有轻微损坏，我们认为属于重灾区范围。重灾区半径 r 与烈度之间有如下关系[61]

$$I_0-I=3\lg\left(\frac{r^2+h^2}{h^2}\right) \tag{8}$$

式中：I_0 为最大烈度，I 是距离震源中心为 r 时的烈度。当烈度为 7 级时，距离震源中心的半径为 99 km，则重灾区面积约为 1.23×10^{11} m^2。将重灾区面积代入(6)式，得到由于岩浆凝固导致岩石圈底部压力的减少量为 1.4 MPa。

(3) 建立力学模型，验证猜想。

100 km 处的压力为 3.1 GPa，33 km 处的压力为 0.9 GPa[24]，据此可以得到一个压力梯度变化。根据前面的计算，得到岩浆凝固导致压力减小，由此可以计算减小的压力传递到 33 km 处的量为 0.4 MPa，超过壳层所能承受的最大屈服荷载 0.26 MPa，力学结构失稳，力学模型建立。

3　结　论

总体上，地球向外太空散热，地球物质的冷却、液-固转变依然持续。地球内部岩浆的持续冷却凝固伴随着体积收缩，引起地壳岩层底部压力降低，在重力作用下地壳板块之间的相互作用加剧，力学结构失稳，地球通过地震等地质活动释放应力，进行自我调整，达到新的力学平衡。本研究通过对地震后地球自转速率变化数据的分析，逆推得到每年的岩浆凝固量，计算得到这部分岩浆凝固所释放的热量与地球每年散热量在数量级上一致。此外，由于岩浆凝固导致地壳下部体积塌缩，压力减小，计算发现：压力的减小量大于壳层所能承受的最大荷载，也就是说，在重力作用下板块间的相互作用力加剧，壳层力学结构失稳，从而引发地震等地质活动。热学和力学模型的建立将地球内部岩浆的液-固转变行为与板块运动的力源机制联系起来，提出了基于岩浆凝固的地壳动力学观点，希望为地震的预测与预报提供新的思路。

感谢四川大学原子与分子物理研究所张友君老师的有益讨论！

参考文献:

[1] CLOUD P. A working model of the primitive Earth [J]. American Journal of Science,1972,272(6):537-548.

[2] VAN KRANENDONK M J,ALTERMANN W,BEARD B L,et al. A chronostratigraphic division of the Precambrian:possibilities and challenges [M]//The Geologic Time Scale. Elsevier,2012:299-392.

[3] WEGENER A. Die entstehung der kontinente [J]. Geologische Rundschau,1912,3(4):276-292.

[4] HESS H H. History of ocean basins [J]. Petrologic Studies,1962:599-620.

[5] DIETZ R S. Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor [J]. Nature,1961,190(4779):854-857.

[6] BACKUS G E. Magnetic anomalies over oceanic ridges [J]. Nature,1964,201(4919):591-592.

[7] WILSON J T. A new class of faults and their bearing on continental drift [J]. Nature,1965,207(4995):343.

[8] MORGAN W J. Rises,trenches,great faults,and crustal blocks [J]. Journal of Geophysical Research,1968,73(6):1959-1982.

[9] MCKENZIE D P,PARKER R L. The North Pacific:an example of tectonics on a sphere [J]. Nature,1967,216(5122):1276-1280.

[10] HOLMES A. Radioactivity and earth movements [J]. Nature,1931,128(3229):496.

[11] MOORE J C. A new concept of stability,M_0-stability [J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications,1985(1):1-13.

[12] HARDY G H,LITTLEWOOD J E,PÓLYA G. Inequalities [J]. Cambridge at the University Press,1964(3):115-138.

[13] STOYKO A,STOYKO N. Rotation de la terre,phénomènes géophysiques et activité du soleil [J]. Bulletin de Lacademie Royale de Belgique,1969,5(55):279-285.

[14] CHAO B F,GROSS R S. Changes in the Earth's rotation and low-degree gravitational field induced by earthquakes [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society,1987,91(3):569-596.

[15] HOPKIN M. Sumatran quake sped up Earth's rotation [J/OL]. Nature,2004-12-30. https://www.nature.com/news/2004/041229/full/news041229-6.html.

[16] BUIS A. Chilean quake may have shortened Earth days [N/OL]. NASA,2010-03-01. https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php? release=2010-071.

[17] BUIS A. Japan quake may have shortened earth days,moved axis [N/OL]. NASA,2011-03-14. https://www.nasa.gov/topics/earth/features/japanquake/earth20110314.html.

[18] O'CONNELL R J,DZIEWONSKI A M. Excitation of the Chandler wobble by large earthquakes [J]. Nature,1976,262(5566):259-262.

[19] CHAO B F,GROSS R S. Changes in the Earth's rotational energy induced by earthquakes [J]. Geophysical Journal International,1995,122(3):776-783.

[20] XU C,SUN W,ZHOU X. Effects of huge earthquakes on Earth rotation and the length of day [J]. Terrestrial Atmospheric & Oceanic Sciences,2013,24(41):649-656.

[21] XU C,SUN W,CHAO B F. Formulation of coseismic changes in Earth rotation and low-degree gravity field based on the spherical Earth dislocation theory [J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth,2014,119(12):9031-9041.

[22] OLIVER J. Contributions of seismology to plate tectonics [J]. AAPG Bulletin,1972,56(2):214-225.

[23] JACKSON E D,WRIGHT T L. Xenoliths in the Honolulu volcanic series,Hawaii [J]. Journal of Petrology,1970,11(2):405-433.

[24] 周瑶琪. 地球动力学系统及演化 [M]. 北京:科学出版社,2013:34-40,340-341.

[25] JEANLOZ R,MORRIS S. Temperature distribution in the crust and mantle [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences,1986,14(1):377-415.

[26] HUNTINGDON A T,BECK M S. Oxygen and sulphur fugacities of magmatic gases directly measured in active vents of Mount Etna:discussion [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A,1973,

274(1238):137-146.

[27] WRIGHT T L,KINOSHITA W T,PECK D L. March 1965 eruption of Kilauea volcano and the formation of Makaopuhi lava lake [J]. Journal of Geophysical Research,1968,73(10):3181-3205.

[28] FLYNN L P,MOUGINIS-MARK P J. Temperature of an active lava channel from spectral measurements,Kilauea Volcano,Hawaii [J]. Bulletin of Volcanology,1994,56(4):297-301.

[29] RICHTER D H,AULT W U,EATON J P,et al. The 1961 eruption of Kilauea volcano,Hawaii [M]//US Geological Survey Professional Paper. US Department of the Interior,US Geological Survey,1964.

[30] RAWSON D E. Drilling into molten lava in the Kilauea Iki volcanic crater,Hawaii [J]. Nature,1960,188(4754):930-931.

[31] BURGI P Y,CAILLET M,HAEFELI S. Field temperature measurements at Erta'Ale lava lake,Ethiopia [J]. Bulletin of Volcanology,2002,64(7):472-485.

[32] SCHWARZER R R,ROGERS J J W. A worldwide comparison of alkali olivine basalts and their differentiation trends [J]. Earth and Planetary Science Letters,1974,23(3):286-296.

[33] MACDONALD G A,KATSURA T. Chemical composition of Hawaiian lavas [J]. Journal of Petrology,1964,5(1):82-133.

[34] KUNO H. Lateral variation of basalt magma type across continental margins and island arcs [J]. Bulletin Volcanologique,1966,29(1):195-222.

[35] MACDONALD G A. Notes on Niuafo'ou [J]. American Journal of Science,1948,246(2):65-77.

[36] MACDONALD G A. Composition and origin of Hawaiian lavas [J]. Studies in volcanology:a memoir in honor of Howel Williams,1968,116:477-522.

[37] YODER H S JR,TILLEY C E. Origin of basalt magmas:an experimental study of natural and synthetic rock systems [J]. Journal of Petrology,1962,3(3):342-532.

[38] WATERS A C. Basalt magma types and their tectonic associations:Pacific Northwest of the United States [M]//The Crust of the Pacific Basin. American Geophysical Union,2013:158-170.

[39] MCBIRNEY A R. Andesitic and rhyolitic volcanism of orogenic belts [J]. The Earth's Crust and Upper Mantle,1969:501-507.

[40] CARMICHAEL I S E. The petrology of Thingmuli,a tertiary volcano in eastern Iceland [J]. Journal of Petrology,1964,5(3):435-460.

[41] NOBLE D C. Systematic variation of major elements in comendite and pantellerite glasses [J]. Earth and Planetary Science Letters,1968,4(2):167-172.

[42] LE MAITRE R W. Petrology of volcanic rocks,Gough Island,south Atlantic [J]. Geological Society of America Bulletin,1962,73(11):1309-1340.

[43] BAKER P E,GASS I G,HARRIS P G,et al. The volcanological report of the Royal Society Expedition to Tristan da Cunha,1962 [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A,1964,256(1075):439-575.

[44] TILLEY C E,MUIR I D. Intermediate members of the oceanic basalt-trachyte association [J]. Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar,1964,85(4):436-444.

[45] BAKER I. Petrology of the volcanic rocks of Saint Helena Island,South Atlantic [J]. Geological Society of America Bulletin,1969,80(7):1283-1310.

[46] CARMICHAEL I S E. The mineralogy and petrology of the volcanic rocks from the Leucite Hills,Wyoming [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology,1967,15(1):24-66.

[47] SUZUKI A,OHTANI E. Density of peridotite melts at high pressure [J]. Physics and Chemistry of Minerals,2003,30(8):449-456.

[48] OHTANI E,MAEDA M. Density of basaltic melt at high pressure and stability of the melt at the base of the lower mantle [J]. Earth and Planetary Science Letters,2001,193(1/2):69-75.

[49] SAKAMAKI T,OHTANI E,URAKAWA S,et al. Measurement of hydrous peridotite magma density at high pressure using the X-ray absorption method [J]. Earth and Planetary Science Letters,2009,287(3/4):293-297.

[50] MASSONNE H J,WILLNER A P,GERYA T. Densities of metapelitic rocks at high to ultrahigh pressure condi-

tions:what are the geodynamic consequences? [J]. Earth and Planetary Science Letters,2007,256(1/2):12-27.

[51] FUKUYAMA H. Heat of fusion of basaltic magma [J]. Earth and Planetary Science Letters,1985,73(2/3/4):407-414.

[52] SPARKS R S J. The role of crustal contamination in magma evolution through geological time [J]. Earth and Planetary Science Letters,1986,78(2/3):211-223.

[53] MAGDE L S,SPARKS D W. Three-dimensional mantle upwelling,melt generation,and melt migration beneath segment slow spreading ridges [J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth,1997,102(B9):20571-20583.

[54] JAUPART C,LABROSSE S,LUCAZEAU F,et al. 7.06-temperatures,heat and energy in the mantle of the earth [J]. Treatise on Geophysics,2007,7:223-270.

[55] DAVIES J H,DAVIES D R. Earth's surface heat flux [J]. Solid Earth,2010,1(1):5-24.

[56] SCLATER J G,JAUPART C,GALSON D. The heat flow through oceanic and continental crust and the heat loss of the Earth [J]. Reviews of Geophysics,1980,18(1):269-311.

[57] NAKAGAWA T,TACKLEY P J. Influence of magmatism on mantle cooling,surface heat flow and Urey ratio [J]. Earth and Planetary Science Letters,2012,329:1-10.

[58] PAN B,CUI W. An overview of buckling and ultimate strength of spherical pressure hull under external pressure [J]. Marine Structures,2010,23(3):227-240.

[59] XU X L,GAO F. Experimental study on the strength and deformation quality of granite with effect of high temperature [C]//Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications,2012,226:1275-1278.

[60] BÅTH M. Seismicity of the Tanzania region [J]. Tectonophysics,1975,27(4):353-379.

[61] BÅTH M. Introduction to seismology [M]. Basel:Birkhauser Verlag,1973:127.

Crustal Dynamics Based on Magma Solidification

HUO Ruizhi[1,2],HE Duanwei[1,2]

(1. *Institute of Atomic and Molecular Physics,Sichuan University,Chengdu* 610065,*China*;
2. *Key Laboratory of High Energy Density Physics and Technology of Ministry of Education,Sichuan University,Chengdu* 610065,*China*)

Abstract:The earth was in a molten state at the beginning of its formation. Over time,the magma on the earth's surface began to cool down and solidify,and the earth has gradually become such a trap structure. However,the cooling and liquid-solid transformation process of the earth materials continues until today. This paper presents a statistical analysis of the change of earth's length-of-day after earthquakes,and it is found that the earth's rotation speed is generally accelerated after great earthquakes. We believe that this phenomenon is caused by the cooling and solidification of the magma in the part of the mantle,which causes significant volume collapse of the lower crustal lithosphere. Thus,we set up a crustal dynamic model to explain the interaction and relative motion of tectonic plates. We believe that the dynamic genesis of earthquake and other geological activities are due to the continuous solidification of the melt in the interior of the earth which could lead to a volume shrinkage and pressure drop in the lower part of the earth's crust. The effect of gravity enhances the interaction among tectonic plates,the original mechanical structure becomes unstable,and eventually the massive rock fracture occurs,which can cause severe geological events such as earthquakes,and volcanic eruptions. This conclusion has been further validated based on the thermal and mechanical model proposed in this paper.

Keywords:crustal dynamics;magma solidification;earthquake mechanism;length of day