

doi:10.3799/dqkx.2015.107

月震重定位

赵娜¹, 朱培民¹, 张秉政², 袁悦锋¹

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

2. 浙江省工程勘察院综合物探研究所, 浙江宁波 315012

摘要: 由于前人的月震定位结果主要是基于20世纪70、80年代的月球速度模型, 定位结果误差较大, 无法为月震层析成像等研究提供精确的月震参数。随着对月球内部结构研究的不断深入, 月球速度模型及分层结构的精细程度已经有了很大提高。通过对Apollo月震数据解码及分析, 重新拾取了月震初至数据, 在总结前人震源定位的基础上, 利用月球新近速度模型, 采用Geiger震源定位方法进行了月震震源定位, 给出了较为全面的月震参数目录, 并对月震和地震的分布及形成机制进行了对比, 可为以后月震及月球内部结构的深入研究提供更多的依据。

关键词: 月震定位; 速度模型; 定位精度; 地震; 地球物理。

中图分类号: P184

文章编号: 1000-2383(2015)07-1276-11

收稿日期: 2014-10-16

Moonquake Relocation

Zhao Na¹, Zhu Peimin¹, Zhang Bingzheng², Yuan Yuefeng¹

1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Research Institute of Geological Surveying, Zhejiang Institute of Engineering Exploration, Ningbo 315012, China

Abstract: Existing parameters for tomography and relevant research about the moonquakes are not necessarily accurate due to the low precision of moonquake location resulted from outdated velocity models published during last century. However, the accuracy of lunar velocity model and stratigraphic structure has been improved greatly thanks to latest studies on lunar internal structure. This paper selects new arrival times from Apollo moonquake data, and relocates the moonquakes using Geiger method based on the latest lunar velocity model. In addition, the differences of distribution and mechanism between moonquakes and earthquakes are analyzed. This study can offer more information for further research of moonquakes and lunar internal structure.

Key words: moonquake relocation; velocity model; location accuracy; earthquake; geophysics.

在各类探测星体内部结构的方法中, 地震波观测是获取星体内部结构极为重要的方法(Nakamura, 2005)。对于月球而言, 月震波观测主要来自美国阿波罗任务于1969—1972年在月球上安置的4台月震仪所记录的月震数据。这4台月震仪进行了8年(于1977年9月30日同时关闭)的数据采集, 共记录了12 000多个月震事件, 其中包括9次人工撞击、1 743次陨石撞击、28次浅源月震、7 245次深源月震, 还有3 500多个月震未能识别(Nakamura, 2003; Wiczorek *et al.*, 2006)。根据震源深度及其形

成原因, 一般将月震划分为4类: 浅源月震、深源月震、热月震和陨石撞击(Nakamura *et al.*, 1982)。

在过去的月震震源定位研究中, 由于月球内部速度模型的不精细以及月震波初至拾取的不准确性, 震源定位的结果误差较大。例如, Lamlein (1977)、Nakamura *et al.* (1979, 1982)、Goins *et al.* (1981)、Nakamura (2005)的月震定位研究采用的月球速度模型不超过10层, 且月球内部分层情况与新近的研究结果差异较大, 造成定位结果误差较大, 有的震中误差达十几度, 甚至几十度, 这使得后来的月

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos.41174049, 91014002)。

作者简介: 赵娜(1985—), 女, 博士, 研究方向为月震与地震层析成像。E-mail: zhnacug@126.com

引用格式: 赵娜, 朱培民, 张秉政, 等, 2015. 月震重定位. 地球科学——中国地质大学学报, 40(7): 1276—1286.

震层析成像的结果也不够准确(Zhao *et al.*, 2008, 2012)。

由于月震信号的特点,提高初至数据精度的困难较大,因此多数月震学家通过对月球内部结构的约束来提高月震定位精度。随着对月球研究的深入,月球内部速度模型及其分层结构不断精准。Khan *et al.*(2000)、Khan and Mosegaard(2002)重新对月震数据进行了分析,利用蒙特卡洛非线性反演方法计算出了月球内部速度模型,认为月亮厚度约为45 km,不同于前人的反演结果(认为月亮厚度约为60 km),但其得出的速度模型误差较大。Lognonne *et al.*(2003)、Gagnepain-Beyneix *et al.*(2006)分别对约60个月震震源进行了重新定位,结合月球的其他探测数据,计算出了新的速度模型,并认为月亮的平均厚度为 30.0 ± 2.5 km。Garcia *et al.*(2011)再次对上述震源进行重新定位,首次给出了月球速度参考模型(very preliminary reference moon model,简称VPREMOON),该模型将月核以上的部分共分为74个速度层,每层厚度均小于20 km,是目前为止给出的最为精细的速度模型。Weber *et al.*(2011)利用阵列处理技术对月震数据进行重分析,认为月球有一个直径约330 km的月核,也分为固态的内核和液态的外核。Wieczorek *et al.*(2013)基于Grail重力数据,计算得出月亮的平均厚度为34~43 km。

本文在总结前人月震震源定位结果的基础上,重新对月震事件拾取了初至时间,利用新近的月球速度和分层结构(Garcia *et al.*, 2011, 2012; Weber *et al.*, 2011; Wieczorek *et al.*, 2013),对110个震源进行了重定位,并对地震和月震的分布及形成机制进行了对比。在定位过程中,本文除了利用到时数据,还增加了P-S波到时差的应用。

1 数据与方法

笔者从IRIS(全称incorporated research Institution for seismology)申请到了所有的月震数据(其中有一部分不正确,后由美国Yosio Nakamura教授提供),并对这些数据进行了解码分析。在总结前人月震震源定位结构的基础上,笔者对18个陨石撞击、11个浅源月震及部分深源月震重新拾取了初至时间,其他深源月震的到时数据来源于Nakamura(2005)。图1和图2给出了笔者从原始数据中拾取出的具有代表性的人工撞击、陨石撞击、浅源月震和深源月震事件,以及对陨石撞击事件拾取的初至

剖面。Apollo月震台站位置及工作时间如表1所示。

图3给出了本文采用的一维速度模型,该模型的月亮厚度参考Wieczorek *et al.*(2013),深度在1257 km以上的速度参考Garcia *et al.*(2011, 2012),1257 km以下的速度模型及分层结构参考Weber *et al.*(2011)。该模型共分为70层,每层厚度为1~12 km,月幔中每层厚度约为20 km,该模型在经纬度上的范围覆盖整个月球。

本文采用经典定位方法——Geiger定位方法(Geiger, 1912; 田玥和陈晓菲, 2002)。设有 n 个台站的观测到时时为 t_1, t_2, \dots, t_n ,求震源 (x_0, y_0, z_0) 及发震时刻 t_0 ,使得目标函数最小:

$$\phi = (t_0, x_0, y_0, z_0) = \sum_{i=1}^n r_i^2, \quad (1)$$

其中 r_i 为到时残差:

$$r_i = t_i - t_0 - T_i(x_0, y_0, z_0), \quad (2)$$

T_i 为震源到第 i 个台站的计算走时。使目标函数取极小值,即:

$$\nabla_{\theta} \phi(\theta) = 0, \quad (3)$$

其中 $\theta = (t_0, x_0, y_0, z_0)^T$,

$$\nabla_{\theta} = \left[\frac{\partial}{\partial t_0}, \frac{\partial}{\partial x_0}, \frac{\partial}{\partial y_0}, \frac{\partial}{\partial z_0} \right]^T. \text{ 为方便,记:}$$

$$g(\theta) = \nabla_{\theta} \phi(\theta), \quad (4)$$

则由式(3),在真解 θ 附近任意试探解 θ^* 及其校正量 $\delta\theta$ ($\theta = \theta^* + \delta\theta$)满足:

$$g(\theta^*) + [\nabla_{\theta} g(\theta^*)^T]^T \delta\theta = 0, \quad (5)$$

也即 $[\nabla_{\theta} g(\theta^*)^T]^T \delta\theta = -g(\theta^*)$,

由 ϕ 的定义可得式(6)的具体表达式为:

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial r_i}{\partial \theta_j} \frac{\partial r_i}{\partial \theta_k} + r_i \frac{\partial^2 r_i}{\partial \theta_j \partial \theta_k} \right]_{\theta^*} \delta\theta_j = - \sum_{i=1}^n \left[r_i \frac{\partial r_i}{\partial \theta_k} \right]_{\theta^*}, \quad (7)$$

若 θ^* 偏离真解 θ 不大,则 $r_i(\theta^*)$ 和 $\left[\frac{\partial^2 T_i}{\partial \theta_j \partial \theta_k} \right]_{\theta^*}$ 较小,可忽略二阶导数项,式(7)被简化为线性最小二乘解,即:

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial r_i}{\partial \theta_j} \frac{\partial r_i}{\partial \theta_k} \right] \delta\theta_j = - \sum_{i=1}^n \left[r_i \frac{\partial r_i}{\partial \theta_k} \right]_{\theta^*}, \quad (8)$$

以矩阵形式表示,上式为:

$$A^T A \delta\theta = A^T r, \quad (9)$$

$$\text{其中 } A = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\partial T_1}{\partial x_0} & \frac{\partial T_1}{\partial y_0} & \frac{\partial T_1}{\partial z_0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{\partial T_n}{\partial x_0} & \frac{\partial T_n}{\partial y_0} & \frac{\partial T_n}{\partial z_0} \end{bmatrix}.$$

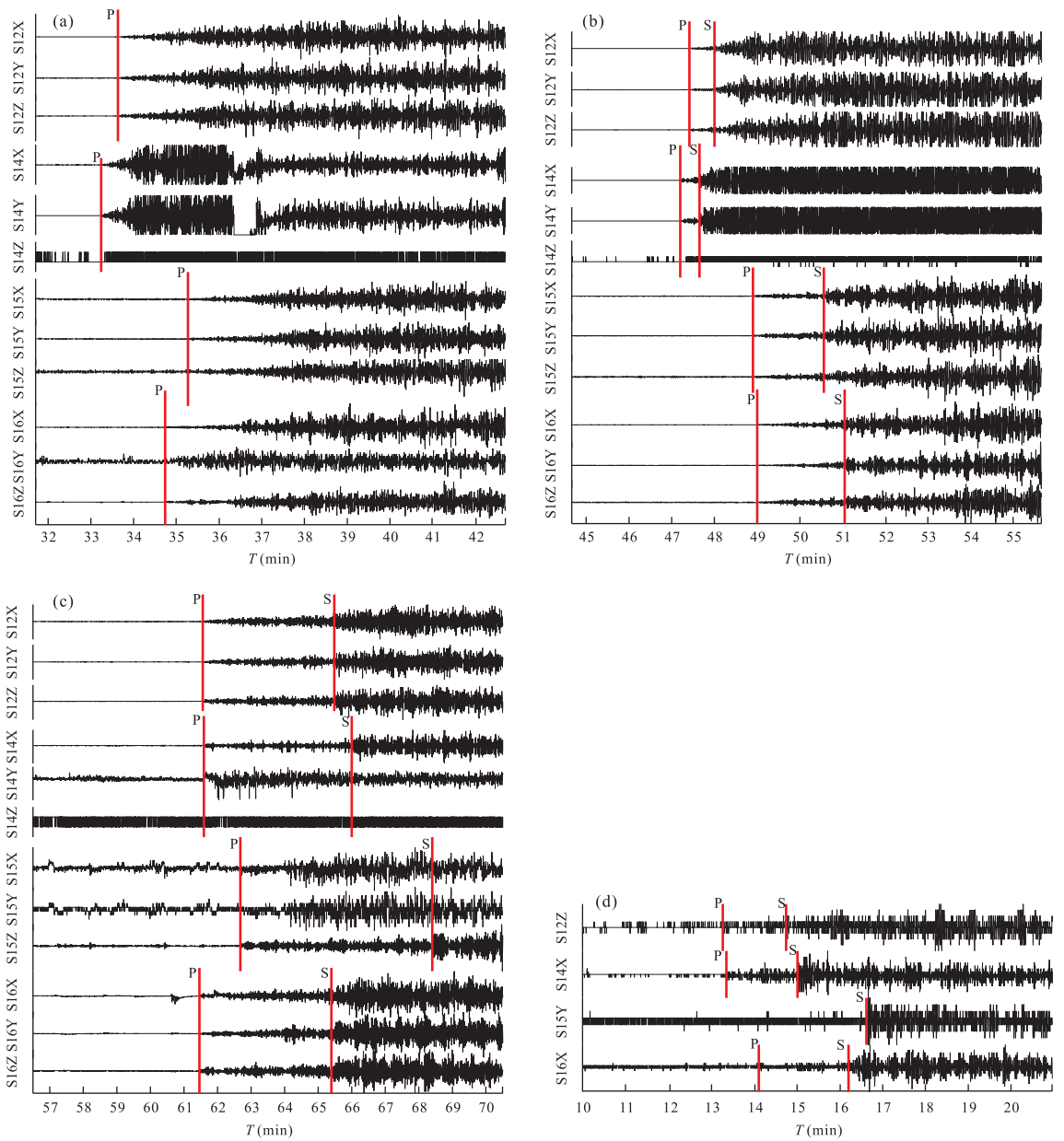


图 1 4 个台站的 3 个分量记录的月震事件

Fig.1 The moonquakes recorded by the three components of four stations

a.人工撞击事件(1972-12-10T20-32-42);b.陨石撞击事件(1972-05-13T08-46-39);c.浅源月震事件(1973-03-13T07-56-15);
d.深源月震事件(1973-09-30T04-10-57)

为了区别不同精度的到时数据对结果的影响,引入加权目标函数.设各台站到时的残差 r_i 的方差为 σ_i^2 ,则加权目标函数为:

$$\phi_r(\theta) = \sum_{i=1}^n r_i^2(\theta) \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad (10)$$

按照上述同样的步骤,通过求式(10)的极小值,得到如下加权线性最小二乘解:

$$A^T C_r^{-1} A \delta\theta = A^T C_r^{-1} r, \quad (11)$$

其中 C_r 为加权方差矩阵: $C_r = \text{diag}(\sigma_1^2, \dots, \sigma_n^2)$.

由式(9)或式(11)求得 $\delta\theta$ 后,以 $\theta = \theta^* + \delta\theta$ 作

为新的尝试点,再求解相应方程.如此反复迭代,直至 ϕ 或 ϕ_r 足够小(或满足一定的循环结束条件),此时即得估计解 θ .

为了验证算法的正确性,本文设计了震源定位数值实验.首先给定理论震源位置和发震时刻,应用本文采用的月球速度模型及算法计算出理论到时,在此到时数据中加入小于 1 s 的随机噪声作为观测数据,并假定每个到时的不确定性均为 0.5 s.在初始模型与真实模型差距较大的情况下进行 512 次迭代计算得到如表 2 所示的反演结果.由于月球的半径

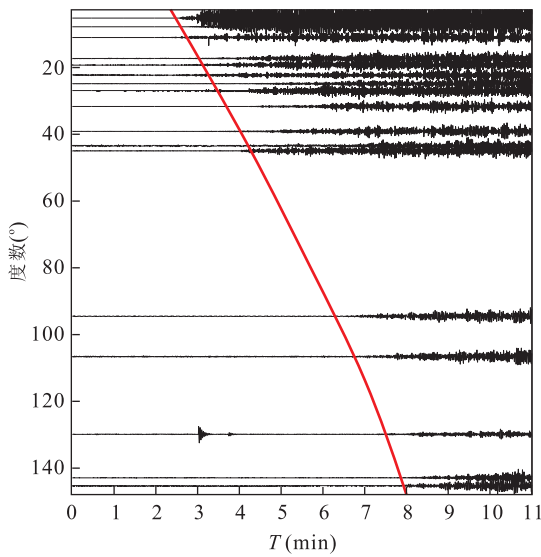


图 2 由陨石撞击事件拾取的 P 波初至时间剖面
Fig.2 The arrival time profile of P wave of meteorite impacts

表 1 Apollo 月震台站位置及工作日期

Table 1 The position and work time of Apollo seismic stations

台站	纬度(°)	经度(°)	高程(km)	工作日期
S12	-3.04	-23.42	1.424	1969-11-19~1977-09-30
S14	-3.65	-17.84	1.063	1971-02-05~1977-09-30
S15	26.08	3.66	1.926	1971-07-31~1977-09-30
S16	-8.97	15.51	0.007	1972-04-21~1977-09-30

注:据 Nakamura *et al.*(1982).

为 1 737.1 km,因此月球赤道处的 1°约为 30.3 km.反演得到的震中距与理论震源震中距的球面距离为 5.545 5 km,此距离为初始震源震中距与理论震源震中距球面距离的 0.946%.在反演次数有限,到时数据存在一定误差,且初始模型与真实模型差距较大的情况下,这样的反演结果是比较精确的.由此可见,本文采用的定位算法及编写的程序是正确可行的.

此外,本文还挑选了 2 个人工撞击月震(发震时刻和震源位置已知)进行定位,以更好地验证算法的正确性和模型的精细程度,震源位置如图 4 所示.表 3 给出对人工月震的反演结果及其与实际震源参数

表 2 数值实验模型及反演结果

Table 2 The synthetic model and inversion results

模型	纬度(°)	经度(°)	深度(km)	发震时刻
真实模型	-17.400	-38.400	917.00	1973-09-30T04-10-59
初始模型	-10.000	-20.000	500.00	1973-09-30T04-10-00
反演结果	-17.247	-38.505	915.11	1973-09-30T04-10-59
反演结果与真实模型的差	0.153	0.105	1.89	0.156 s

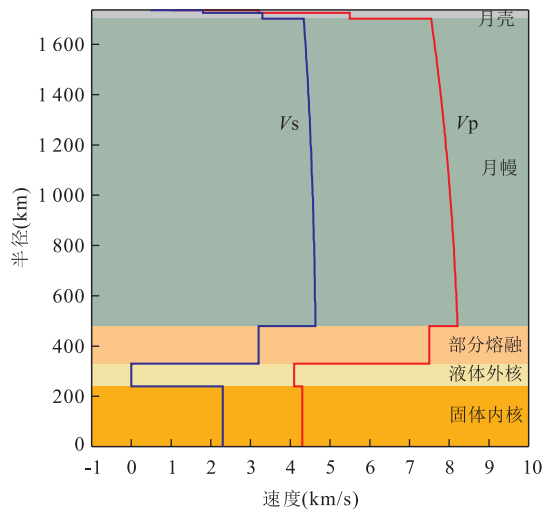


图 3 本文采用的月球内部速度模型

Fig.3 The velocity model of the moon applied in this paper 据 Garcia *et al.*(2011)、Weber *et al.*(2011)和 Wiczorek *et al.*(2013)

的对比.由反演结果看出反演出的震源位置与实际撞击位置的差均在 1°(约 30.3 km)以内,两个事件的实际震中与反演震中的球面距离分别为 28.264 2 km和 13.964 5 km.定位精度比 Nakamura (2005)的定位精度(震中误差多在 100 km 以上)有了明显提高,这说明本文采用的模型比前人所用模型有了更高的精度.

2 月震震源定位结果及分析

反演过程中的初始模型采用前人公布的震源位置和发震时刻(Lammlin, 1977; Nakamura *et al.*, 1979; Goins *et al.*, 1981; Nakamura, 1983, 2003, 2005; Bulow *et al.*, 2005; Garcia *et al.*, 2011, 2012).对于其中误差较大的震源,则利用 P-S 波到时差及平面波拟合方法计算初始发震时刻和震源位置(Wadati, 1933).表 4 和图 5 给出了月震震源定位结果,表 4 中也给出了人工撞击的震源位置及撞击时刻,为以后的月震研究提供相关的震源数据.

反演结果中(表 4)A03 及以下的深源月震到时

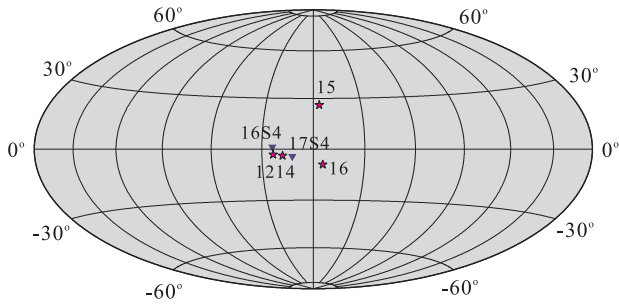


图 4 用于反演的 2 个人工撞击事件与月震台网的相对位置

Fig.4 The positions of the two artificial impacts and seismic stations

五角星表示月震台站位置;三角形表示用于理论实验的 2 个人工撞击月震

来自 Nakamura(2005),由于这些深源月震是由相关和叠加识别出的月震窝,只能利用相对到时对其进行震源定位,因此本文给出的发震时刻是相对于到时的发震时刻.另外,表 4 中深度误差为 0 的表示在反演过程中深度固定,只反演经纬度和发震时刻,所给深度为前人反演的震源深度.

本文的定位结果显示,月震的整体分布与前人的定位结果基本一致(图 6 和图 8),仅有少数震源位置有较大差异.由于多数月震学家多采用 Nakamura(2005)和 Garcia *et al.*(2011)的震源参数,笔者把本文的定位结果与此两者的定位结果进行对比(图 7 和图 8).Nakamura(2005)的定位结果显示,可能有 8 个深源月震位于月球背面(表 4 中标记为粗体的震源),而在本文的反演结果中显示这 8 个深源月震中,只有 3 个深源月震可能位于月球背面,另外 5 个可能位于月球正面.

图 6~图 8 还显示出月震台网内部的定位结果相对较高,台网之外相对较低.3 个作者的定位结果中以 Nakamura(2005)的定位精度最低,其采用的模型是 1983 年公布的月球速度模型,此模型仅将月

球分为 7 个速度层,其中月亮厚度约为 60 km,速度模型较为粗略,其定位结果误差也较大,最大的定位误差近 90°.本文与 Garcia *et al.*(2011)采用的速度模型较为接近,仅月亮厚度及月核大小稍有差异,故本文的定位精度与 Garcia *et al.*(2011)的定位精度相差不大,多数误差均在 5°以内,最小的误差不足 1°.另外,在所有的震源定位中,陨石撞击的定位精度相对较高,而浅源月震的定位精度相对较低.

3 月震与地震的对比

为了对月球震源分布及发震机制有更好的认识,本文将月震与地震进行了对比,这里首先介绍地震的分布及发震机制.图 9 显示了 1970 年至今全球 5.9 级以上的地震(5 000 个)分布及震源深度.由图 9 可以看出地震多发生在 60 km 以上,多为浅震.而西太平洋俯冲带地区的地震震源深度可达 600~700 km.地震在空间上的分布多呈带状分布,明显分布于板块边缘或板块缝合线处,这些地震称为板缘地震;也有一些分布于大陆内部,这些地震有些为串珠状分布,有些为聚集片状分布,例如中国的内陆地震,这些地震称为板内地震(徐伟民等,2014).

对于板缘地震而言,引发地震的构造活动主要为板块间的相对运动,造成板块碰撞或俯冲,从而使岩层发生错动或破裂(Stein and Klosko, 2002).相比板缘地震,板内地震的诱发机制相对复杂.简单总结为:在大陆边缘俯冲板片脱水熔融、大陆内部地幔柱上隆的热动力及其相关的重力驱动,以及剥蚀、搬运、沉积、拆沉等地质过程的作用下,盆地热软化下地壳流向相邻的造山带,使得造山带地壳加厚,盆地地壳减薄,最后在重力的作用下,盆地地壳向造山带内滑脱,使岩石发生错动或破碎,产生地震(王妙月,1994;李德威,2008;罗文行,2009;李德威等,

表 3 人工月震及其反演结果

Table 3 The artificial impacts and the inversion results

	纬度(°)	经度(°)	深度(km)	发震时刻
16S4 实际参数	1.300	-23.800	0	1972-04-19T21-02-04
初始模型	0	0	0	1972-04-19T21-02-00
反演结果	2.181	-24.105	0	1972-04-19T21-01-60
反演结果与实际参数的差	0.881	0.305	0	4.24 s
17S4 实际参数	-4.210	-12.310	0	1972-12-10T20-32-42
初始模型	0	0	0	1972-12-10T20-32-45
反演结果	-4.668	-12.261	0	1972-12-10T20-32-44
反演结果与实际参数的差	0.458	0.049	0	1.57 s

表4 月震震源定位结果

Table 4 The results of the moonquake location

月震事件	纬度(°)	纬度误差	经度(°)	经度误差	深度(km)	深度误差(km)	发震时刻	发震时刻误差(s)
12LM	-3.940		-21.200		0		1969-11-20T22-17-18	
13S4	-2.750		-27.860		0		1970-04-15T02-09-41	
14S4	-8.090		-26.020		0		1971-02-04T07-40-55	
14LM	-3.420		-16.670		0		1971-02-07T00-45-26	
15S4	-1.510		-11.810		0		1971-07-29T20-58-43	
15LM	26.360		0.250		0		1971-08-03T03-03-37	
16S4	1.300		-23.800		0		1972-04-19T21-02-04	
17S4	-4.210		-12.310		0		1972-12-10T20-32-42	
M01	71.016	1.040	5.218	1.120	0	0	1972-01-04T06-31-29	2.830
M02	1.326	0.400	-16.152	0.370	0	0	1972-05-13T08-46-39	0.974
M03	33.481	1.610	136.308	1.980	0	0	1972-07-17T21-50-57	2.590
M04	23.016	0.435	9.327	0.349	0	0	1972-07-31T18-08-16	1.660
M05	15.150	0.500	20.943	0.260	0	0	1972-08-29T22-58-37	0.921
M06	28.767	3.130	39.891	0.990	0	0	1973-09-26T20-46-16	4.390
M07	20.042	0.370	6.330	0.403	0	0	1974-07-17T12-05-01	0.453
M08	-5.123	0.440	20.825	0.450	0	0	1974-11-21T13-15-32	1.531
M09	2.247	0.363	-7.913	0.490	0	0	1974-12-15T09-07-13	0.718
M10	-50.578	0.391	0.351	3.509	0	0	1975-03-05T21-49-58	1.433
M11	-35.701	1.620	-122.400	1.401	0	0	1975-05-04T09-59-25	3.054
M12	-14.125	0.446	-8.843	0.372	0	0	1976-05-28T06-02-01	1.093
M13	23.219	3.885	-74.421	0.693	0	0	1976-11-14T23-13-05	1.642
M14	-13.643	2.173	-72.931	0.776	0	0	1977-06-28T22-22-35	2.553
M15	0.246	1.291	-17.075	0.657	0	0	1971-05-23T22-19-38	3.126
M16	32.164	0.030	-29.327	0.100	0	0	1971-06-12T10-49-21	0.100
M17	28.961	3.667	-42.897	1.064	0	0	1971-10-20T18-05-52	3.526
M18	-6.553	2.467	-70.439	1.478	0	0	1976-01-25T16-06-39	2.867
SH01	13.097	2.019	49.391	2.656	15.90	49.20	1972-09-17T14-35-07	5.316
SH02	46.046	5.900	36.945	6.995	6.03	0.70	1972-12-06T23-08-40	5.876
SH03	25.324	4.438	84.352	4.178	2.10	13.90	1974-07-11T00-46-16	7.697
SH04	26.443	4.036	-95.456	4.481	0	7.60	1975-01-03T01-41-52	5.699
SH05	64.693	4.254	49.934	5.930	20.30	13.30	1975-01-12T03-13-45	4.853
SH06	16.922	0.365	-25.294	0.540	111.97	93.14	1975-02-13T22-03-50	5.266
SH07	42.438	0.368	32.257	0.262	90.99	14.61	1976-01-04T11-18-58	0.918
SH08	48.673	2.379	-24.715	2.202	28.16	94.40	1976-03-06T10-12-28	3.823
SH09	52.670	4.328	41.720	4.542	91.03	37.48	1971-04-17T07-00-30	6.490
SH10	42.134	1.053	-24.012	0.230	99.95	1.47	1971-05-20T17-26-01	5.148
SH11	-81.092	2.749	-144.360	7.421	61.49	59.13	1973-03-13T07-56-15	7.568
A01	-17.177	1.170	-38.519	1.330	923.80	23.80	1973-09-30T04-10-57	1.132
A06	46.684	1.740	55.773	1.850	858.49	13.30	1976-07-02T10-52-23	0.644
A07	24.984	1.580	53.082	1.800	899.74	38.15	1976-07-02T03-11-23	1.876
A09	-36.116	1.390	-30.876	2.540	975.00	1.70	1977-04-16T19-58-05	2.877
A14	-28.388	1.390	-34.314	1.660	888.97	30.99	1973-05-28T18-53-11	3.873
A17	24.135	0.370	-19.320	0.430	849.45	14.63	1972-11-07T08-52-07	2.760
A18	19.426	2.220	32.877	1.820	882.00	15.30	1973-01-05T22-50-33	0.660
A24	-35.526	2.670	-38.817	3.850	980.10	10.50	1977-06-12T18-17-39	0.650
A25	35.333	1.620	59.664	1.550	943.62	1.20	1977-06-09T20-15-05	3.650
A30	11.931	3.000	-34.044	3.360	922.00	1.80	1972-05-17T00-42-44	1.460
A34	7.682	0.460	-9.631	0.310	928.00	13.40	1972-06-14T18-34-28	2.780
A40	-1.135	0.390	-11.070	0.460	886.30	23.70	1973-06-27T23-48-34	0.966
A41	14.998	2.190	-26.559	2.620	960.50	5.40	1972-06-08T16-16-24	0.689
A42	22.885	2.880	-54.186	1.940	1 004.00	7.20	1973-05-03T01-52-33	3.318
A44	52.792	1.960	57.926	1.870	956.85	9.20	1974-05-19T03-09-01	5.830
A51	9.481	0.530	16.229	0.610	900.33	9.90	1974-02-18T08-35-24	1.910
A03	-1.757	1.475	-49.678	6.105	926.46	97.31	1972-01-01T00-59-33	4.379
A10	-34.139	1.962	-37.210	1.979	1 072.41	6.12	1972-01-01T00-59-15	0.758
A15	1.442	0.610	-3.412	0.394	710.22	17.31	1972-01-01T01-01-34	2.371
A19	27.492	1.926	33.354	1.909	942.70	1.30	1972-01-01T00-59-47	2.624
A21	-17.258	1.736	-51.055	1.366	1 038.81	16.93	1972-01-01T00-59-14	2.244
A22	22.113	3.530	43.518	1.882	799.09	42.15	1972-01-01T00-59-45	3.971
A26	17.500	0.423	17.500	0.401	1 037.32	1.67	1972-01-01T00-59-49	2.204

续表 4

月震事件	纬度(°)	纬度误差	经度(°)	经度误差	深度(km)	深度误差(km)	发震时刻	发震时刻误差(s)
A32	26.200	1.774	41.303	1.376	944.00	1.56	1972-01-01T00-59-41	0.790
A35	7.847	1.638	34.495	1.414	933.00	0	1972-01-01T00-59-58	0.824
A54	-23.618	5.225	-55.318	1.456	805.12	41.75	1972-01-01T00-58-58	2.152
A59	22.120	2.814	-44.058	1.947	674.01	10.80	1972-01-01T00-59-48	3.013
A60	23.585	3.282	-49.035	1.058	750.00	0	1972-01-01T00-59-26	2.495
A65	47.292	3.560	42.676	5.806	870.00	72.02	1972-01-01T00-59-23	0.740
A70	33.295	1.967	69.382	3.543	1 065.79	0.97	1972-01-01T00-58-37	0.660
A71	-33.666	1.329	-17.968	0.967	696.38	0.45	1972-01-01T01-00-09	2.024
A73	21.338	1.511	-43.481	3.040	901.18	34.62	1972-01-01T00-59-22	3.700
A74	36.630	2.037	64.495	3.554	1043.00	0	1972-01-01T00-58-44	1.396
A82	29.011	1.173	36.976	1.073	931.56	0.19	1972-01-01T00-59-48	0.076
A86	-46.669	1.003	-36.628	4.874	680.60	21.60	1972-01-01T00-59-04	1.658
A96	6.567	0.336	11.789	0.326	803.30	72.07	1972-01-01T01-00-17	1.081
A99	8.325	0.723	20.221	0.781	1 000.92	39.21	1972-01-01T00-59-58	2.582
A100	-4.113	2.536	32.351	2.039	941.81	32.54	1972-01-01T00-59-40	1.068
A107	41.359	3.809	52.562	3.761	901.35	91.23	1972-01-01T00-59-14	4.203
A114	15.922	1.649	55.444	2.539	774.67	124.91	1972-01-01T00-58-57	4.932
A201	-40.600	1.722	-4.218	1.026	877.69	21.75	1972-01-01T00-59-27	1.683
A202	-1.078	0.389	-0.087	0.384	940.16	1.60	1972-01-01T01-00-17	0.146
A204	-28.691	2.986	-68.368	5.436	955.36	1.92	1972-01-01T00-58-35	3.097
A212	20.767	0.385	-31.295	0.447	963.02	1.02	1972-01-01T00-59-40	0.210
A216	-13.328	0.728	-21.825	0.581	770.54	25.00	1972-01-01T01-00-27	5.593
A223	35.726	3.27	-1.651	0.375	872.98	9.66	1972-01-01T01-00-15	3.243
A224	-52.615	1.084	-20.153	1.444	756.39	0.96	1972-01-01T00-58-46	1.674
A230	7.004	0.782	22.589	0.834	875.95	45.94	1972-01-01T01-00-02	1.036
A231	39.38	2.602	58.840	3.399	969.10	3.45	1972-01-01T00-58-46	3.550
A234	39.484	1.058	18.769	1.345	1 015.75	16.47	1972-01-01T00-59-59	2.932
A237	11.293	0.367	5.947	0.314	1 066.07	10.02	1972-01-01T00-59-43	0.200
A238	27.324	0.279	20.311	0.469	848.24	39.92	1972-01-01T01-00-16	1.137
A242	58.980	2.007	52.416	2.677	1 023.06	22.89	1972-01-01T00-58-58	1.524
A243	10.197	0.379	6.696	0.398	1 050.85	51.53	1972-01-01T00-59-47	1.056
A251	-48.511	1.567	39.754	1.154	909.27	52.06	1972-01-01T00-59-10	0.587
A258	-3.687	0.799	19.656	0.756	1 006.60	14.84	1972-01-01T00-59-33	0.324
A259	3.537	0.473	1.928	0.417	558.69	68.25	1972-01-01T01-01-07	7.236
A271	53.500	4.163	34.194	1.754	929.44	86.60	1972-01-01T00-59-39	3.226
A272	-50.413	1.802	52.036	1.478	938.69	103.23	1972-01-01T00-58-51	0.923
A276	-7.568	1.247	-51.497	1.759	1 036.29	35.66	1972-01-01T00-58-32	3.841
A279	7.962	0.386	-2.501	0.970	1 020.78	30.07	1972-01-01T00-59-44	0.247
A280	-4.729	1.961	49.799	2.194	963.00	1.55	1972-01-01T00-58-48	2.416
A283	4.285	0.257	24.223	0.415	998.41	17.65	1972-01-01T01-00-13	2.301
A286	54.479	1.235	55.045	1.197	935.96	11.71	1972-01-01T00-59-05	0.916
A290	9.276	0.475	4.566	0.203	1 083.44	12.22	1972-01-01T00-59-47	0.597
A29	54.360	6.959	62.156	12.202	1 073.6	99.31	1972-01-01T00-58-41	6.705
A33	6.225	2.960	118.990	3.180	886.09	57.73	1972-10-11T19-35-42	3.739
A218	2.208	14.526	-41.089	5.312	829.72	32.33	1972-01-01T00-59-19	7.336
A241	-69.972	3.699	73.892	8.062	934.36	54.61	1972-01-01T00-57-37	6.904
A244	32.946	3.577	73.355	2.088	797.04	77.82	1972-01-01T00-58-07	0.325
A245	8.964	4.812	70.329	11.787	898.28	76.40	1972-01-01T00-57-56	4.847
A282	17.221	2.243	96.787	2.013	1 145.16	32.49	1972-01-01T00-58-00	2.983
A285	37.448	3.401	95.713	13.103	933.00	0	1972-01-01T00-58-01	5.238

注: M, 陨石撞击; SH, 浅源月震; A, 深源月震; 前 8 个为人工月震; 深度误差为 0 表示在反演过程中深度固定, 只反演经纬度和发震时刻; 最后标记为粗体的震源表示前人定位结果中可能位于月球背面的震源。

2014)。可见, 无论是板缘地震还是板内地震, 其发震机制都直接或间接地与地球的构造活动有关(张国民等, 2005)。

相比地震, 月震的分布及成因则有很多明显差异, 如图 5 和图 9 所示。在分布上, 月震多分布于下

月幔, 其深度多在 700~1 200 km, 大部分为深源月震。在平面上主要分布于月球正面, 相比地震而言其分布较为随机, 但较多分布于北东向和南西向(Lammlin *et al.*, 1974; Nakanura, 2005)。

综合本文及前人的定位结果可以看出, 浅源月

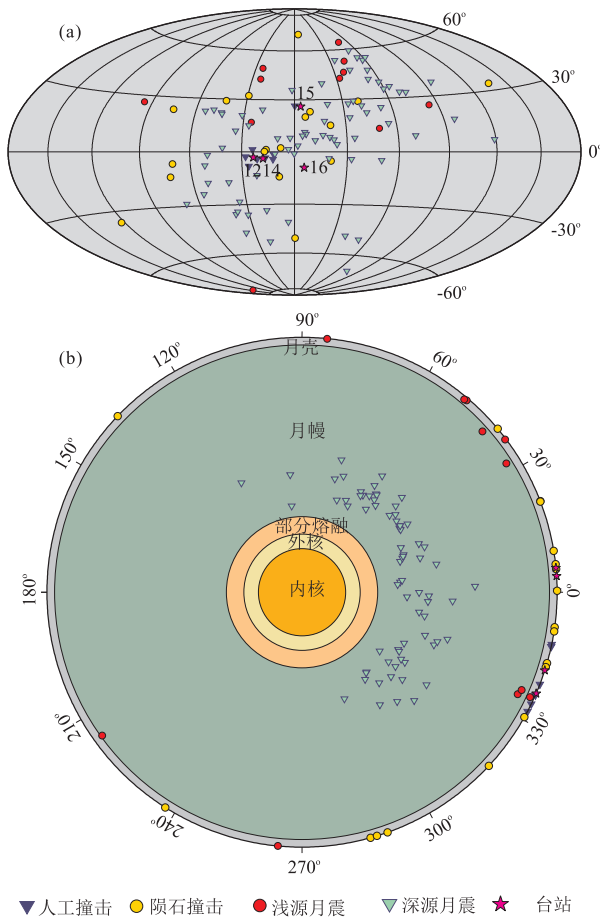


图 5 月震震源位置分布

Fig.5 The distribution of the moonquakes

a.月震位置在平面上的分布;b.月震位置在剖面上的分布

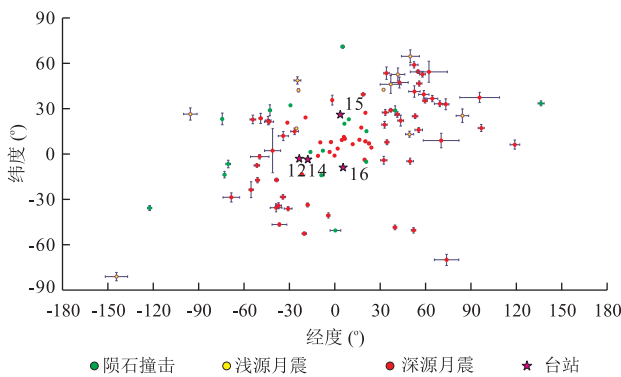


图 6 本文 110 个震源的定位结果及定位误差

Fig.6 The moonquake location results and errors

震多位于月亮及上月幔区域,其震级最大不超过 5 级.月震研究早期认为浅源月震是唯一与月球构造有关的月震,其产生机制可能是源于月球演化早期由于热收缩和热膨胀的不均匀性而积累的热弹性应力在上月幔和月亮中的释放.后期也有研究学者认为,浅源月震的发生可能与太阳系以外的超大高能

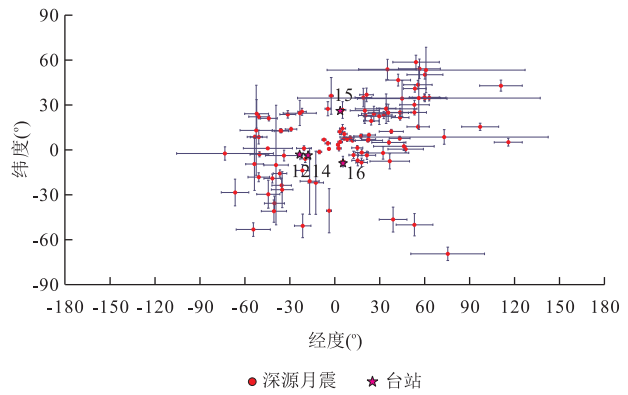


图 7 Nakamura (2005)106 个震源的定位结果及定位误差
Fig.7 The moonquake location results and errors of Nakamura(2005)

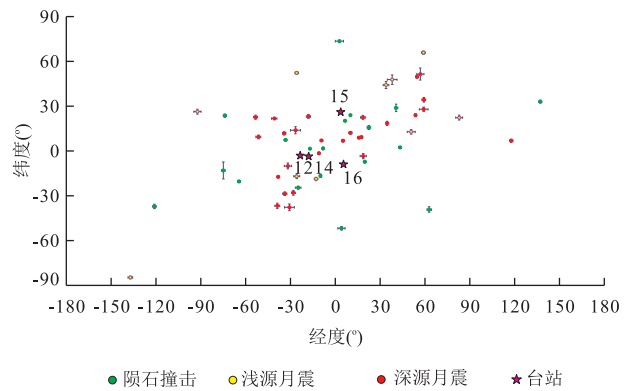


图 8 Garcia *et al.*(2011)56 个震源的定位结果及定位误差
Fig.8 The moonquake location results and errors of Garcia *et al.*(2011)

粒子有关(Frohlich and Nakamura,2006;Jaumann *et al.*,2012).由于发现的浅源月震个数仅有 28 个,数据较少,其真实的发震机制还需要利用更多的浅源月震进行研究(赵娜等,2012).

深源月震多位于深度为 700~1 200 km 处,即下月幔处,是目前记录到的最多的月震类型,其震级一般小于 3 级.很多深源月震都在局部区域重复发生,前人将这个区域称为月震窝(Wieczorek,2009).月震窝的产生具有一定的规律性,大约以 28 d(一个月球日)为一个周期.由于这样的发震规律,现在主流的研究认为深源月震的产生是由地球和太阳对月球的潮汐应力引起的(Wieczorek *et al.*,2006).此外,深源月震多分布于月球正面,推测可能是月球背面深源月震发震较少,也可能是背面的深源月震由于能量较小,月震波无法穿过月球中心的液态物质或部分熔融物质.

可见,月震与地震存在很多明显差异,而造成这

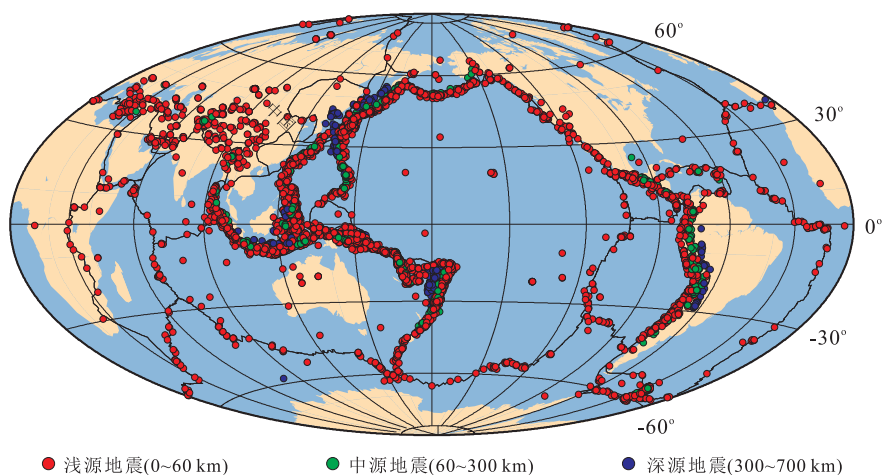


图 9 全球地震活动分布

Fig.9 The distribution of the earthquakes

震源位置参数来源于 <http://www.iris.edu/ieb/>

些差异的根本原因是月球与地球的内部结构及构造活动不同。月球内部分层结构与地球相似,也分为月壳、月幔和月核,但不同的是月球内部没有软流圈,故更不存在板块运动,很多研究认为月球是一个几近僵死的星体,因此月球上很少有自身构造活动引起的月震,多是由外部源引起月震活动。而地球上软流圈的存在则产生了板块运动,也使得地幔物质进行对流交换,从而产生更多的构造活动,除了板块碰撞外,还存在地表的凹陷、隆起、火山喷发等构造活动,地震则主要是在这样的构造活动中产生的。

4 结论

本文通过对月震数据解码分析,重新拾取了月震到时,其中包括陨石撞击、浅源月震和部分深源月震,综合前人公布的到时数据,基于新近公布的月球速度模型,采用 Geiger 定位方法对 110 个震源进行了重定位,给出了较为全面的月震参数目录,为以后的月震层析成像等研究提供震源参数。通过对反演结果的分析,本文得出以下几点认识与结论:(1) 本文采用新近的月球速度模型,定位结果相比于前人的定位结果精度有明显提高,说明本文采用的速度模型精细程度更高;(2) 在识别的深源月震中,可能仅有 3 个深源月震位于月球背面;(3) 月震与地震在分布及其发震机制上都有很大差异。

致谢:感谢 IRIS 为本文研究工作提供月震和地震数据;感谢 Yosio Nakamura 教授和 Johannes Schweitzer 教授为此研究工作提供了宝贵的建议与

巨大的帮助;感谢中国地质大学杜劲松博士为本文提供了资料和数据。另外本文的所有图件均使用 GMT(全称 generic mapping tools)绘图软件进行绘制(Wessel and Smith,1991)。

References

- Bulow, R.C., Johnson, C.L., Shearer, P.M., 2005. New Events Discovered in the Apollo Lunar Seismic Data. *J. Geophys. Res.*, 110 (E10): 1 - 22. doi: 10.1029/2005JE002414
- Frohlich, C., Nakamura, Y., 2006. Possible Extra-Solar-System Cause for Certain Lunar Seismic Events. *Icarus*, 185(1): 21-28. doi:10.1016/j.icarus.2006.07.002
- Gagnepain-Beyneix, J., Lognonne, P., Chenet, H., et al., 2006. A Seismic Model of the Lunar Mantle and Constraints on Temperature and Mineralogy. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 159(3-4): 140-166. doi:10.1016/j.pepi.2006.05.009
- Garcia, R.F., Gagnepain-Beyneix, J., Chevrot, S., et al., 2011. Very Preliminary Reference Moon Model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 188(1-2): 96-113. doi:10.1016/j.pepi.2011.06.015
- Garcia, R.F., Gagnepain-Beyneix, J., Chevrot, S., et al., 2012. Erratum to "Very Preliminary Reference Moon Model". In: Garcia, R. F., Gagnepain-Beyneix, J., Chevrot, S., et al., eds., *Phys. Earth Planet. Inter.*, 188: 96-113.
- Geiger, L., 1912. Probability Method for the Determination of Earthquake Epicenters from Arrival Time Only. *Bull. St. Louis Univ.*, 8: 60-71.
- Goins, N.R., Dainty, A.M., Toksöz, M.N., 1981. Lunar Seismology: The Internal Structure of the Moon. *J. Geo-*

- phys. Res.*, 86 (B6): 5061 — 5074. doi: 10.1029/JB086iB06p05061
- Jaumann, R., Hiesinger, H., Anand, M., et al., 2012. Geology, Geochemistry, and Geophysics of the Moon: Status of Current Understanding. *Planetary and Space Science*, 74(1): 15—41. doi:10.1016/j.pss.2012.08.019
- Khan, A., Mosegaard, K., 2002. An Inquiry into the Lunar Interior: A Non-Linear Inversion of the Apollo Lunar Seismic Data. *J. Geophys. Res.*, 107(E6): 19—44. doi:10.1029/2001JE001658
- Khan, A., Mosegaard, K., Rasmussen, K. L., 2000. A New Seismic Velocity Model for the Moon from a Monte Carlo Inversion of the Apollo Lunar Seismic Data. *Geophys. Res. Lett.*, 27(11): 1591—1594. doi: 10.1029/1999GL008452
- Lammlein, D.R., 1977. Lunar Seismicity and Tectonics. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 14(3): 224—273. doi: 10.1016/0031-9201(77)90175-3
- Lammlein, D.R., Latham G.V., Dorman J., et al., 1974. Lunar Seismicity, Structure, and Tectonics. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 12(1): 1—21. doi:10.1029/RG012i001p00001
- Li, D. W., 2008. Mechanism and Prediction of the Intraplate Earthquakes; An Example from Wenchuan Earthquake in Sichuan Province. *Geological Science and Technology Information*, 27(5): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., Chen, J. L., Chen, G. F., et al., 2014. Continental Seismotectonic System: Example from Qinghai-Tibet Plateau and Its Adjacent Areas. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(12): 1763—1775 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2014.160
- Lognonne, P., Gagnepain-Beyneix, J., Chenet, H., 2003. A New Seismic Model of the Moon; Implications in Terms of Structure, Formation and Evolution. *Earth and Planetary Sci. Lett.*, 211(1—2): 27—44. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00172-9
- Luo, W.X., 2009. The Connection between the Geophysical Structure of the Crust and the Distribution of Earthquake Focals and Its Tectonic Implication in Southern of the S-N Belt, China (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Nakamura, Y., 1983. Seismic Velocity Structure of the Lunar Mantle. *J. Geophys. Res.*, 88 (B1): 677—686. doi: 10.1029/JB088iB01p00677
- Nakamura, Y., 2003. New Identification of Deep Moonquakes in the Apollo Lunar Seismic Data. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 139(3—4): 197—205. doi:10.1016/j.pepi.2003.07.017
- Nakamura, Y., 2005. Farside Deep Moonquakes and Deep Interior of the Moon. *J. Geophys. Res.*, 110 (E1): 1—12. doi:10.1029/2004JE002332
- Nakamura, Y., Latham G. V., Dorman, H. J., 1982. Apollo Lunar Seismic Experiment—Final Summary. *J. Geophys. Res.*, 87 (S1): A117—A123. doi:10.1029/JB087iS01p0A117
- Nakamura, Y., Latham, G. V., Dorman, H. J., et al., 1979. Shallow Moonquakes: Depth, Distribution and Implications as to the Present State of the Lunar. Proc. Lunar Planet. Sci. Conf. 10th, Houston, 2299—2309.
- Stein, S., Klosko, E., 2002. International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology (Part A): 7 Earthquakes Mechanisms and Plate Tectonics. Northwestern University, Evanston, 69—78.
- Tian, Y., Chen, X. F., 2002. Review of Seismic Location Study. *Progress in Geophysics*, 17(1): 147—155 (in Chinese with English abstract).
- Wadati, K., 1933. On the Travel Time of the Earthquake Waves (Part II). *Geophys. Mag.*, 7: 101—111.
- Wang, M. Y., 1994. Cause and Physical Predication of Intraplate Earthquakes. *Acta Geophysica Sinica*, 37 (Suppl. 1): 208—213 (in Chinese with English abstract).
- Weber, R. C., Lin, P. Y., Garnero, E. J., et al., 2011. Seismic Detection of the Lunar Core. *Science*, 331(6015): 309—312. doi:10.1126/science.1199375
- Wessel, P., Smith, W. H. F., 1991. Free Software Helps Map and Display Data. *EOS Trans. Amer. Geophys. U.*, 72(41): 441—448. doi:10.1029/90EO00319
- Wieczorek, M. A., 2009. The Interior Structure of the Moon: What Does Geophysics Have to Say. *Elements*, 5(1): 35—40. doi:10.2113/gselements.5.1.35
- Wieczorek, M. A., Jolliff, B. L., Khan, A., et al., 2006. The Constitution and Structure of the Lunar Interior. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 60(3): 221—364. doi:10.2138/rmg.2006.60.3
- Wieczorek, M. A., Neumann, G. A., Nimmo, F., et al., 2013. The Crust of the Moon as Seen by GRAIL. *Science*, 339(6120): 671—675. doi:10.1126/science.1231530
- Xu, W.M., Chen, S., Shi, L., 2014. Seismic Activity and Gravity Anomaly Characteristics of Yutian in Xinjiang and Surrounding Regions. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(12): 1831—1841 (in Chinese with English abstract). doi:10.3799/dqkx.2014.166
- Zhang, G. M., Ma, H. S., Wang, H., et al., 2005. Boundaries between Active-Tectonic Blocks and Strong Earthquakes in the China Mainland. *Chinese Journal of Geophysics*, 48(3): 602—610 (in Chinese with English abstract).

- Zhao, D. P., Lei, J. S., Liu, L., 2008. Seismic Tomography of the Moon. *Chinese Science Bulletin*, 53(24): 3897–3907. doi:10.1007/s11434-008-0484-1
- Zhao, D. P., Tomoko A., Lucy, L., et al., 2012. Seismic Tomography and Geochemical Evidence for Lunar Mantle Heterogeneity: Comparing with Earth. *Global and Planetary Change*, 90–91: 29–36. doi:10.1016/j.gloplacha.2012.01.004
- Zhao, N., Zhu, P. M., Yuan, Y. F., et al., 2012. Necessity and Design for Seismic Experiment of China Future Manned Moon Landing Missions. *Geological Science and Technology Information*, 31(4): 137–142 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 李德威, 2008. 大陆板内地震的发震机理与地震预报——以汶川地震为例. *地质科技情报*, 27(5): 1–6.

- 李德威, 陈继乐, 陈桂凡, 等, 2014. 大陆地震构造系统: 以青藏高原及邻区为例. *地球科学——中国地质大学学报*, 39(12): 1763–1775.
- 罗文行, 2009. 南北地震带南段震源空间分布特征与地壳物性结构的关系及其结构意义(硕士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 田玥, 陈晓菲, 2002. 地震定位研究综述. *地球物理学进展*, 17(1): 147–155.
- 王妙月, 1994. 板内地震成因与物理预报. *地球物理学报*, 37(1): 208–213.
- 徐伟民, 陈石, 石磊, 2014. 新疆于田及周边地区地震活动性与重力异常特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 39(12): 1831–1841.
- 张国民, 马宏生, 王辉, 等, 2005. 中国大陆活动地块边界带与强震活动. *地球物理学报*, 48(3): 602–610.
- 赵娜, 朱培民, 袁悦锋, 等, 2012. 中国未来载人登月月震实验必要性和方案设计. *地质科技情报*, 31(4): 137–142.

* * * * *

《Journal of Earth Science》(英文版)2014 影响因子升至 0.757

根据美国 2014 年 6 月 19 日发布的 JCR(期刊引证报告)最新数据, 我校主办的英文期刊《Journal of Earth Science》(简称 JES)2014 影响因子升至 0.757, 总引用频次为 450, 近 5 年影响因子为 0.83. 近年来 JES 期刊影响因子逐年提升, 由 2012 年的 0.395 升至 2013 年的 0.546, 到 2014 年影响因子再创新高.

影响因子是衡量期刊国际影响力的重要指标. 近年来为了提升期刊的影响力, JES 主编赖旭龙教授、编委专家和编辑部成员采取了一系列措施, 优选高质量的研究成果: 采用“学术与出版分离”的办刊理念, 邀请编委和专家组织稿件, 成功组织了“二叠纪—三叠之交古生物演化”、“浅表层地球物理专辑”、“洪水灾害地质专辑”等, 充分发挥专家学者专业优势和业内威望, 严格审稿. 组建国际化的编委会, 国际编委达到 32%, 国际审稿专家有 300 多人; 聘请国际知名学者 Prof. Timothy M. Kusky 和 Prof. Robert E. Criss 担任副主编, 负责稿件处理工作. 同时, 聘请英国地质学家 Prof. Roger Mason 对文章进行语言润色, 并与国际著名的出版公司 Springer 合作海外发行电子版, 这些都对提升期刊在国际上的影响起到重要作用.