**Advances in Geosciences** 地球科学前沿, 2015, 5(5), 334-357
Published Online October 2015 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/ag
http://dx.doi.org/10.12677/ag.2015.55034

Hans汉斯

# Comparative Study of Global Volcano Activities on the Hot Engine Belt and the Cooling Seismic Belt

## —Improvement on Research Ideas of Volcano Prediction on the Hot Engine Belt

**Lijun Chen**

Earthquake Administration of Hunan Province, Changsha Hunan
Email: seisman@foxmail.com

Received: Sep. 22nd, 2015; accepted: Oct. 9th, 2015; published: Oct. 15th, 2015

Copyright © 2015 by author and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

## Abstract

**According to the Seismo-geothermics working method and using the GVP volcanic material of Smithsonian Institution web, the mantle plume data of mantleplumes web and author's seismic cone data, this article comparatively studied the dependency of volcanic activity with the hot engine belt and the cooling seismic belt, volcanic eruption type, the rise and fall of volcanic history by tectonic units and statistical unit of cones and plumes, and discussed volcanic origin and possibility of volcano prediction on the hot engine belt, which made the theoretical foundation of Seismo-geothermics volcano prediction method study. The study shows that the genesis of volcano is related to mantle hotspots, the seismic cone and/or the mantle plume. The energy and the thermal material of volcanic activity may come from the deep mantle, which constitute the two different types of volcanic communities called as cone type volcano and plume type volcano, and with different mode and rule of activity respectively. The hot engine belt and seismic cones thereof are the main body of the global volcanic activity, and the main geological disaster in the world, which affects the human survival. Therefore, we should expand the volcanic prediction research ideas and strengthen the monitoring and study of subcrustal earthquake activity, which perhaps can bring some new hope of volcanic prediction difficulties on the hot engine belt.**

## Keywords

**The Hot Engine Belt, The Cooling Seismic Belt, Seismic Cone, Mantle Plume, Volcano, Volcano Prediction**

文章引用: 陈立军 (2015) 全球热机带和冷机带火山活动的比较研究. *地球科学前沿*, **5**, 334-357.
http://dx.doi.org/10.12677/ag.2015.55034

# 全球热机带和冷机带火山活动的比较研究

## —兼论对热机带火山预测研究思路的改进

**陈立军**

湖南省地震局，湖南 长沙
Email: seisman@foxmail.com

收稿日期：2015年9月22日；录用日期：2015年10月9日；发布日期：2015年10月15日

## 摘　要

**本文根据地震地热说的工作方法，采用Smithsonian Institution的火山资料、Mantleplumes网页的地幔柱资料以及作者的地震柱资料，以地震柱或地幔柱为构造单元和统计单元，对比分析了火山活动与热机带和冷机带的依存性、火山的喷发类型、火山的兴衰史，并讨论了火山的成因和热机带火山预测的可能性，从而为地震地热说火山预测方法的研究奠定了理论基础。研究结果表明，火山的成因与地幔内的地震柱和/或地幔柱有关，火山活动的能量与热物质的补给可能来自地幔的深部，从而构成两类性质差异的火山群落，地震柱型火山和地幔柱型火山，各自具有不同的活动方式与活动规律。热机带及其所包含的地震柱，是全球火山活动的主体，也是全球地质灾变的主体，与人类的生存休戚相关。因此，应该拓展火山的预测研究思路，加强对壳下地震活动的监测与研究，或许能解热机带内的火山预测之困。**

## 关键词

**热机带，冷机带，地震柱，地幔柱，火山，火山预测**

## 1. 引言

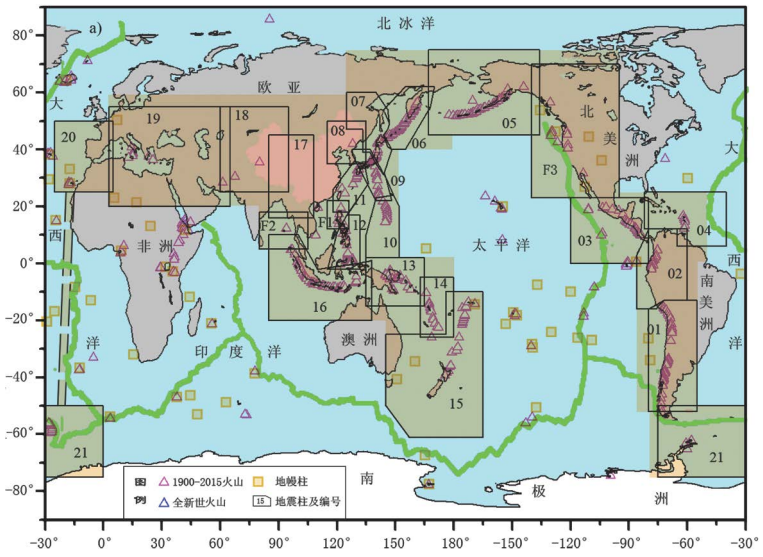
人类对火山的活动极为关注，积累了大量关于火山的知识、火山喷发资料与精美的图片[1]-[3]。关于火山的类型、火山的成因和火山的区带划分等等，人们不免与地表的板块构造“俯冲”或者“碰撞”相联系。然而，火山是地球生命过程中的一种自然现象，板块构造则只是科学家们关于地壳构造的一种模式设想，二者是否能有机结合，值得商榷。本文通过对热机带的地震柱和冷机带的地幔柱火山活动的统计分析与对比研究，认为火山活动能量与热物资的补给可能来自于上地幔深部的某种热柱，因而试图用地壳构造模式来解释火山的成生、喷发和消亡过程似乎是徒劳的。

本文选取全球的火山资料，与全球的地震柱和地幔柱进行比较研究，分析了全球火山分布的一般特征、火山与全球热机带和冷机带的依存关系、火山熔岩囊、火山的喷发类型、火山的兴衰史等问题，并就火山成因与火山的预测方法等相关问题做出了讨论。在本文的模式下，通过对壳下地震活动的监测与研究，似乎可以实现对热机带火山活动的预测。

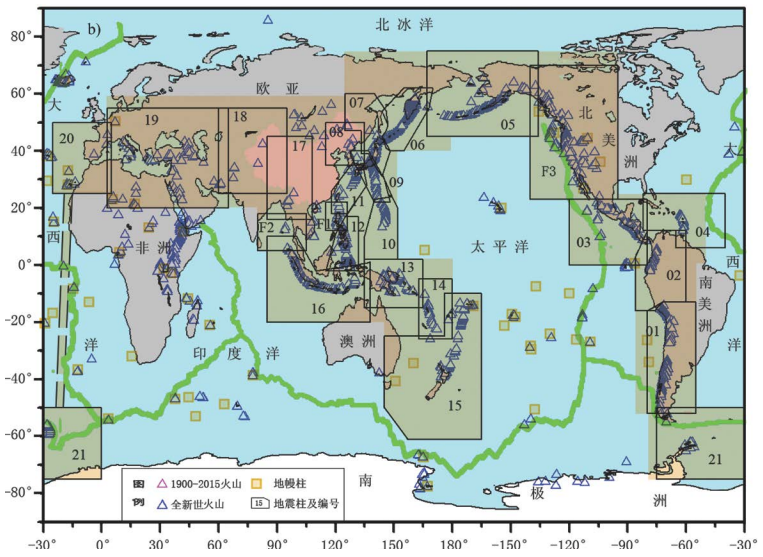
## 2. 资料的选取

本文所采用的火山资料，取自 Smithsonian Institution 的 Global Volcanism Program (GVP)网站[1]，地幔柱资料来自 www.mantleplumes.org 网页[4]。在作者提出的地震地热说中，依据全球地震活动状态，提出了地震柱的概念，并将全球的地震活动构造划分为热机带和冷机带两大构造体系[5]-[7]。这些资料的综

合展示，如图 1 所示。




(a)




(b)

**Figure 1.** Division of the hot engine belt and the cooling seismic belt; (a) Volcanos between 1900 to May, 2015, (b) Holocene Volcanos Number and name of seismic cones: No.01-South Chile seismic cone, No.02-North Chile cone, No.03-Guatemala cone, No.04-Haiti cone, No.05-Bering Sea cone, No.06-Okhotsk Sea cone, No.07-Japan cone, No.08-Huichun cone, No.09-Northern Mariana cone, No.10-South Mariana cone, No.11-Taiwan and Ryukyu cone, No.12-Philippines cone, No.13-Salomon cone, No.14-West Tonga cone, No.15-East Tonga cone, No.16-Indonesia cone, No.17-Burma cone, No.18-Hindu Kush cone, No.19-Mediterranean cone, No.20-West Mediterranean cone, No.21-The South Sandwich cone, F1-Manila cone, F2-Andaman cone and F3-North America cone

**图 1.** 全球热机带和冷机带火山活动的分布；(a) 1900~2015.5 的火山，(b) 全新世的火山地震柱编号及名称：01 南智利，02 北智利，03 危地马拉，04 海地，05 白令海，06 鄂霍次克海，07 日本，08 中国珲春，09 北马里亚纳，10 南马里亚纳，11 台湾及琉球，12 菲律宾，13 所罗门，14 西汤加，15 东汤加，16 印尼，17 缅甸，18 兴都库什，19 地中海，20 地中海西口，21 南桑威奇，F1 马尼拉，F2 安达曼，F3 北美洲

图 1 中，黑色实线多边形表示按照中深源地震活动中心点划分的 24 个地震柱构造，包含地震柱柱体及其影响区。地震柱构造(seismic cone)是一种倒立的圆锥体，由中、深源地震的震源体密集组成，已知最大深度 740 千米(详见本文附录及图 A1~图 A3)。以最小面积包围地震柱的浅黄色条带是由 24 个地震柱组成的全球 M 型热机带。

热机带以外的广大地区统称为冷机带(cooling seismic belt)。按照地震活动的分布，冷机带上只有浅源地震，大多数发生在呈 W 型展布的大洋中脊带上(图 1 中的绿色条带)。

热机带和冷机带的划分，是按照其功能来表述的。从地质灾害学的角度，热机带控制着全球 95%以上的壳内强震和 80%以上的活火山，是地质灾害的主体，而冷机带则只有浅源地震和少量火山，表现为对热机带灾害活动的调制作用。地球是一部庞大的热机，因此热机带和冷机带的划分相当于内燃机的缸体活塞与冷却系统，前者的功能是做功，后者的功能则是保证做功系统的卡诺循环。

图 1 中的深黄色方块表示目前比较确认的 71 个地幔柱(mantle plume) [4]。地幔柱最深可达 2850 km，大多分布在冷机带。热机带的热柱体则主要以地震柱的形式存在。作者所搜集到的地震层析成像证据表明，地震柱是 P 波高速异常体，地幔柱则是 P 波慢速异常体[8]，可见地震柱和地幔柱是两类不同性质的地幔热柱体，因而其地震活动[9] [10]和火山活动也有明显的差异。

图 1(a)的三角形为 1900 年至 2015 年 5 月的全球火山分布，图 1(b)的三角形为 1 万年以来全新世的火山分布。本文将通过热机带和冷机带的火山活动与地幔深部热柱体(地震柱或地幔柱)的关系研究，探讨火山的成因及其预测方法。

## 3. 火山活动的基本特征

### 3.1. 全球火山活动的一般分布状态

图 1 按照 2 个不同时期展现了全球火山活动的分布。两个时期火山分布统计如表 1 所示。由表 1 可见，两个时期的火山分布状态基本一致，热机带的火山占全球火山总数的 82%以上，冰岛、夏威夷和非洲中南部的火山超过 10%，两者合计约占 94%。这些火山中，90%以上火山的历史最大喷发指数(Volcanis Explosivity Index—VEI)都在 2 以上。

图 1 的 2 张图上沿大洋中脊带的火山极少，可能与大洋里的火山遗漏较多有关。因此，冷机带已发现的火山集中在冰岛、夏威夷和非洲中南部三地的有人地区，唯有冰岛才真正属于大洋中脊带上的火山活动。当然，热机带同样也有不少火山遗漏，尤其是海底的休眠火山。

图 1(a)显示热机带内的火山活动严格受到地震柱的控制。唯有一地例外，即日本本州至九州的火山似乎连为一气，然而被地震柱的划分隔开了。由地震活动研究已知，2011 年日本本州东北部的 9 级地震是属于日本地震柱的独立活动，与周边的地震柱没有牵连[11] [12]。这里的矛盾有待进一步的研究。其它地区的火山活动均被相关的地震柱构造一一分割，图像是清晰的。

比较图 1 的 2 张分图，发现北美洲、地中海－喜马拉雅、贝加尔湖以及非洲的西部，20 世纪以来的火山活动明显低于全新世 1 万年以来的总体活动，或者说内陆地区的火山活动明显低于历史水平，而沿

**Table 1.** Statistics of volcanoes in the hot engine belt and the cooling seismic belt.
**表 1.** 全球热机带和冷机带火山活动统计

| 活动时期 | 全球 | 热机带 | | 冰岛、夏威夷、非洲 | | 合计 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 火山 | % | 火山 | % | 火山 | % |
| **1900~2015** | 512 | 429 | 83.789 | 52 | 10.156 | 481 | 93.945 |
| **全新世** | 1555 | 1286 | 82.701 | 191 | 12.283 | 1477 | 94.984 |

海地区的活动则与历史水平基本相当，说明新时期以来内陆地区火山活动的动力不足。

### 3.2. 热机带火山活动的一般特征

热机带是一个深部变异体(详后)，火山活动十分活跃。作者研究表明，全球热机带内的 24 个地震柱，历史上都曾有火山活动[13]-[22]。

#### 3.2.1. 热机带火山活动与地震柱的关系

- 由图 1 可见，全球 80%以上的火山都密集分布在各个地震柱内。
- 由附录的图 A1~图 A3 可见，各个地震柱内的火山活动，几乎都位于地震柱柱体或其分支柱体的顶端，即地震柱柱体或其分支柱体的出地点附近，充分说明火山对地震柱柱体的依赖性。

这里列举两个例子。

1) 尽管北美洲的壳下地震活动水平较低，按照表 2 和图 2 的资料显示，火山的活动依然与 20km 深度以下的地震活动密切相关，即与 F3 号北美洲地震柱的活动有关。黄石公园火山的情况比较特殊，似乎与地震柱的活动和地幔柱的活动都有牵连。

2) 印尼从苏门答腊岛到班达海的巽他火山带自 1963 年以来有 43 座火山活动(表 3)。该火山带呈弧形条带展布，有专家认为是印澳板块向北俯冲的产物。这只是一种表象。

沿着该火山带的中轴线，将 16 号印尼地震柱 4 级以上的中、深源地震与活火山投影到同一条纬度线上，画面如图 3(a)所示。图 3(b)为火山与地震活动的地理分布。图 3 的地震颜色表示不同深度，档次相同。

**Table 2.** Volcanic eruptions (including Yellowstone National Park) since 1900 in the United States
**表 2.** 美国本土 1900 年以来的火山喷发(含黄石公园火山)

| 编号 | 火山名称 | 火山坐标 | 喷发号 | VEI | 喷发时段 |
|---|---|---|---|---|---|
| **321050** | St. Helens 圣海伦 | 46.2˚, −122.18˚ | 20560 | 2 | 2004.10.1-2008.1.27 |
| | | | 20559 | 3 | 1990.11.5-1991.2.14 |
| | | | 20558 | 2 | 1989.12.7-1990.1.6 |
| | | | 20557 | 5 | 1980.3.27-1986.10.28 |
| | | | 20556 | | 1921.3.18 |
| | | | 20555 | | 1903.9.15 |
| **322010** | Hood 胡德 | 45.374˚, −121.695˚ | 20576 | | 1907.8.28 |
| **323020** | Medicine Lake 梅迪辛湖 | 41.611˚, −121.554˚ | 20649 | 1 | 1910.1 |
| **323080** | Lassen Center 拉森 | 40.492˚, −121.508˚ | 20657 | 3 | 1914.5.30-1917.6.29 |
| **325010** | Yellowstone 黄石 | 44.43˚, −110.67˚ | | | (1350 BCE) |
| **331020** | CoAxial Segment (海底) | 46.52˚, −129.58˚ | 20712 | 0 | 1993.6.26-1993.7.4 |
| | | | 20711 | 0 | 1986 |
| **331021** | Axial Seamount 轴海山 | 45.95˚, −130˚ | 20922 | 0 | 1976 |
| | | | 20921 | 0 | 2011.4.6-2011.4.12 |
| | | | 20713 | 0 | 1998.1.25-1998.2.5 |
| **331030** | Cleft Segment (海底) | 44.83˚, −130.3˚ | 20719 | 0 | 1986.8 |
| | | | 20718 | 0 | 1982 |
| **331031** | North Gorda Ridge (海底) | 42.67˚, −126.78˚ | 20722 | 0 | 1996.2.28-1996.3.15 |

**Table 3.** Volcano activity list in the Sundanese volcano belt since 1963
**表 3.** 巽他火山带 1963 年以来的火山活动一览表

| 编号 | 火山名称 | 纬度 | 经度 | 海拔 | 最新喷发 |
|---|---|---|---|---|---|
| 261030 | PeuetSague 佩埃察戈耶 | 4.914 | 96.329 | 2801 | 2000 |
| 261080 | Sinabung 锡纳朋 | 3.17 | 98.392 | 2460 | 2015 |
| 261120 | Sorikmarapi 索里梅拉皮 | 0.686 | 99.539 | 2145 | 1996 |
| 261140 | Marapi 马拉皮 | −0.381 | 100.473 | 2891 | 2014 |
| 261160 | Talang 塔朗 | −0.978 | 100.679 | 2597 | 2007 |
| 261170 | Kerinci 葛林芝 | −1.697 | 101.264 | 3800 | 2009 |
| 261220 | Kaba 卡巴 | −3.52 | 102.62 | 1952 | 2000 |
| 261230 | Dempo 登波 | −4.03 | 103.13 | 3173 | 2009 |
| 262000 | Krakatau 喀拉喀托 | −6.102 | 105.423 | 813 | 2014 |
| 263090 | Tangkubanparahu 唐库班珀拉胡 | −6.77 | 107.6 | 2084 | 2015 |
| 263100 | Papandayan 帕潘达扬 | −7.32 | 107.73 | 2665 | 2002 |
| 263140 | Galunggung 加隆贡 | −7.25 | 108.058 | 2168 | 1984 |
| 263180 | Slamet 史拉默 | −7.242 | 109.208 | 3428 | 2014 |
| 263200 | Dieng Volcanic Complex 迪恩 | −7.2 | 109.92 | 2565 | 2009 |
| 263210 | Sundoro 孙多罗(巽多罗) | −7.3 | 109.992 | 3136 | 1971 |
| 263250 | Merapi 默拉皮(梅拉比) | −7.542 | 110.442 | 2968 | 2014 |
| 263280 | Kelut 克卢德(克鲁特) | −7.93 | 112.308 | 1731 | 2014 |
| 263290 | Arjuno-Welirang | −7.725 | 112.58 | 3339 | 1991 |
| 263300 | Semeru 赛美乳塞梅鲁 | −8.108 | 112.92 | 3676 | 2014 |
| 263310 | Tengger Caldera 腾格尔布罗莫 | −7.942 | 112.95 | 2329 | 2012 |
| 263340 | Raung 拉翁 | −8.125 | 114.042 | 3332 | 2008 |
| 263350 | Ijen 卡瓦伊真(伊金) | −8.058 | 114.242 | 2799 | 2002 |
| 264010 | Batur 巴杜尔 | −8.242 | 115.375 | 1717 | 2000 |
| 264020 | Agung 阿贡 | −8.342 | 115.508 | 3142 | 1964 |
| 264030 | Rinjani 林贾尼(林加尼) | −8.42 | 116.47 | 3726 | 2010 |
| 264040 | Tambora 坦博拉 | −8.25 | 118.00 | 2850 | 1967 |
| 264050 | SangeangApi 桑厄昂亚比 | −8.2 | 119.07 | 1949 | 2014 |
| 264071 | Ranakah | −8.62 | 120.52 | 2350 | 1991 |
| 264090 | Inielika 伊涅利卡 | −8.73 | 120.98 | 1559 | 2001 |
| 264100 | Ebulobo 厄布洛博 | −8.82 | 121.18 | 2124 | 1969 |
| 264110 | Iya | −8.897 | 121.645 | 637 | 1971 |
| 264140 | Kelimutu | −8.77 | 121.82 | 1639 | 1968 |
| 264150 | Paluweh 帕鲁维赫罗卡滕达 | −8.32 | 121.708 | 875 | 2014 |
| 264160 | Egon 埃贡 | −8.67 | 122.45 | 1703 | 2008 |
| 264180 | Lewotobi 勒沃托比 | −8.542 | 122.775 | 1703 | 2014 |
| 264200 | Leroboleng 勒罗博伦 | −8.358 | 122.842 | 1117 | 2003 |
| 264220 | Iliboleng 伊利博伦 | −8.342 | 123.258 | 1659 | 1993 |
| 264230 | Lewotolo 勒沃托洛(列沃多洛) | −8.272 | 123.505 | 1423 | 2012 |
| 264250 | Iliwerung 伊利沃龙 | −8.53 | 123.57 | 1018 | 2013 |
| 264260 | Tara, Batu 孔巴岛(塔拉-巴图) | −7.792 | 123.579 | 748 | 2015 |
| 264270 | Sirung 锡龙 | −8.508 | 124.13 | 862 | 2012 |
| 265060 | Nila 尼拉 | −6.73 | 129.50 | 781 | 1968 |
| 265090 | Banda Api 班达阿皮 | −4.525 | 129.871 | 640 | 1988 |

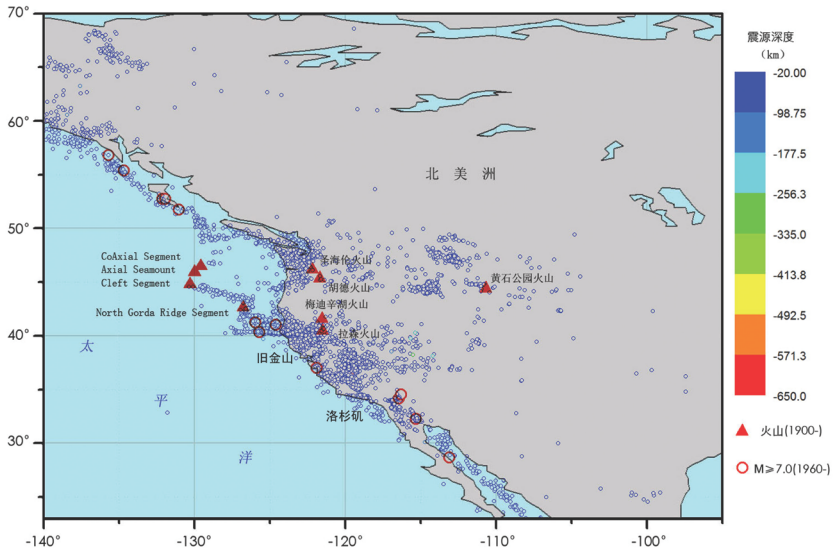



**Figure 2.** The relationship between the volcanic activity and the subcrustal earthquakes depth below 20 km in the United States (The earthquakes are from ANSS earthquake catalog, M ≥ 2.0, 1960-2015; and the volcanoes are from GVP web)
**图 2.** 美国火山活动与 20 km 深度以下壳下地震活动的关系(地震据 ANSS 地震目录；火山据 GVP 火山月报)

印尼地震柱自 1963 年至 2015 年 7 月 4 日发生 4 级以上地震 38402 次，最大深度 676 km，中、深源地震形成多个近于直立的分支柱体，一字排开，地表的活火山则成族地与壳下分支柱体一一对应。这里的中、深源地震活动呈“自下而上逐层驱动”之势，并无“俯冲”的迹象[23]。况且，在 500 km 深度以下的“超级能动层”(super active layer [9] [10])，从 6.5˚S、105˚E 至 8.5˚S、126˚E 存在一条 2000 多千米长、异常活跃的中、深源地震活动条带。整个图 3 的画面，恰如一幅烧杯里的水被加热的平面画——676 km 深度以下在加热，气泡在向上翻滚。这是大自然 50 多年来一幅漂亮的画作。作者所设计的“开水实验”，正是为了复制和描述这种场景[6]。

因此，图 3 的图像展示了活火山与地震柱的高度依存性。印尼地震柱中、深源地震活跃，才是印尼多地震、多火山、高强度、大灾难的根本原因。

### 3.2.2. 意大利 Etna 火山与美国 Yellowstone 火山的熔岩囊比较

地中海 EMSC 地震目录与美国 ANSS 地震目录具有同等的精度，很好地描述了地中海地区的壳下地震活动状态。

采用 EMSC 地震目录 2.0 级以上地震，就 Etna 火山的局部地区，分别沿地理经度和纬度方向做地震震源深度分布图，如图 4 所示[24]。由图 4 可见，在 Etna 火山直下 50~150 km 深度范围内，存在一个壳下地震活动空区，粗略估计其体积约为 $2.0 \times 10^6$ km$^3$。

采用 ANSS 地震目录 2.0 级以上地震，就黄石公园火山做同样图像，如图 5 所示。图 5 上黄石公园火山就找不到类似 Etna 火山的熔岩囊图像。这里的壳下地震活动较弱，最大震源深度 76 km。当然，科学家们或许还有其他方法来探明其熔岩囊的性质与规模[25]。

### 3.2.3. 热机带的火山喷发

热机带的火山喷发，大致有如下几种类型：

- 斯特朗博利型火山喷发(Strombolian Eruption)：粘性熔岩流可以间歇性的爆破活动(如在斯特朗博利火山)，或是连续地溢出(如像墨西哥的帕里库丁火山) [3] [26]。喷发次序是以潜水水汽爆炸开始，紧随

着为熔渣的喷出，最后是熔岩流出地面。

- 乌尔坎诺型喷发(Vulcanian Eruption)：粘性的、富含气体的岩浆伴随火山灰抛出地面，形成烟柱强烈喷发[3] [27] [28]。烟柱最高可达 40~50 km 高空。熔岩流较少或没有。
- 培雷型火山喷发(Pelean Eruption)：粘性的岩浆喷发，开始阶段由新喷出的多气体岩浆产生火山发光云，随之为最猛烈又具破坏性的火山喷发[3] [29]。
- 普里尼型火山喷发(Plinian Eruption)：粘性大的岩浆特别强烈的连续的气体爆炸性喷发类型。初始是

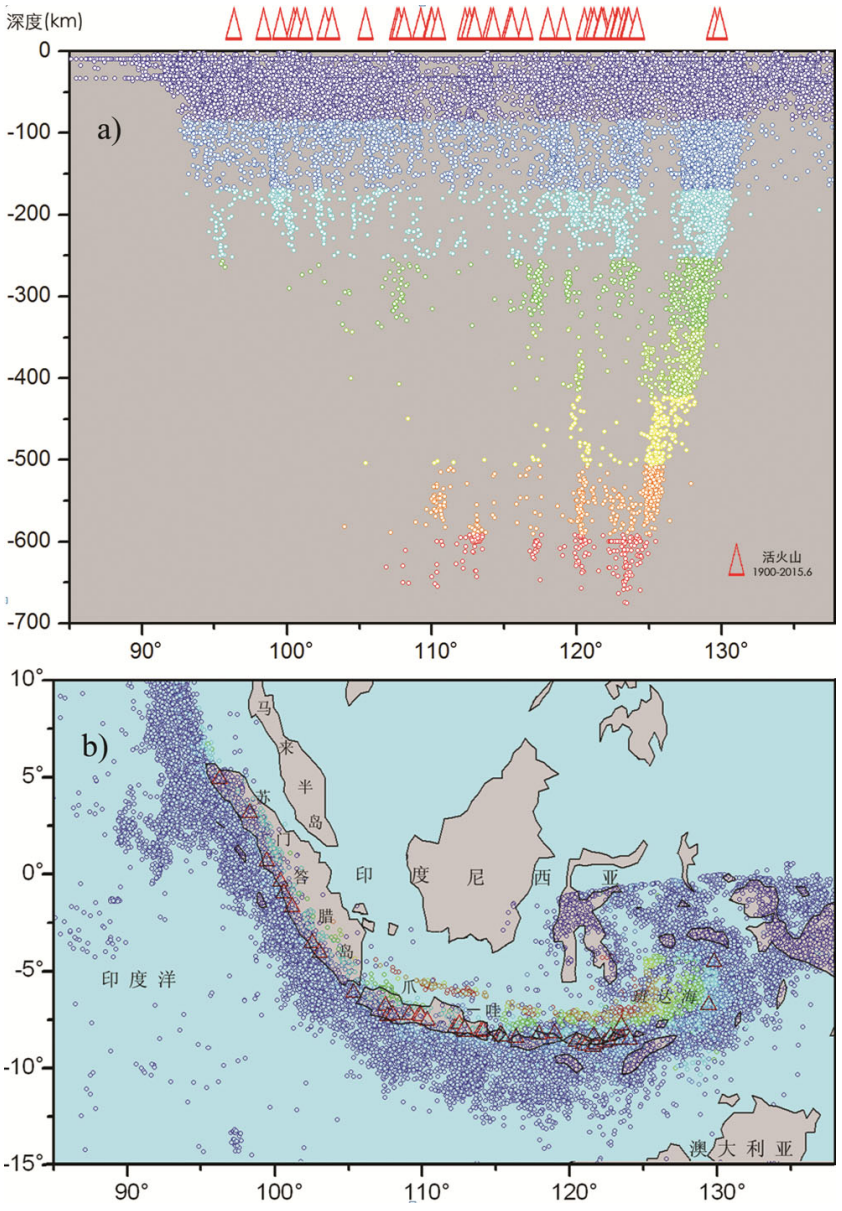



**Figure 3.** Relation between the Sundanese volcano belt and Indonesia seismic cone. a) volcano and earthquake are projected to the same longitude, b) geographical distribution of volcanoes and earthquakes (The earthquakes are from ANSS earthquake catalog, 1963-2015.7.4, M ≥ 4.0, and the volcanoes are from GVP web, 1900-2015.7)

**图 3.** 巽他火山带活火山与印尼地震柱的关系；a) 火山与地震投影到同一经线，b) 火山与地震的地理分布(地震据 ANSS 地震目录，1963~2015.7.4，M ≥ 4.0；火山据 GVP 火山月报，1900~2015.7)

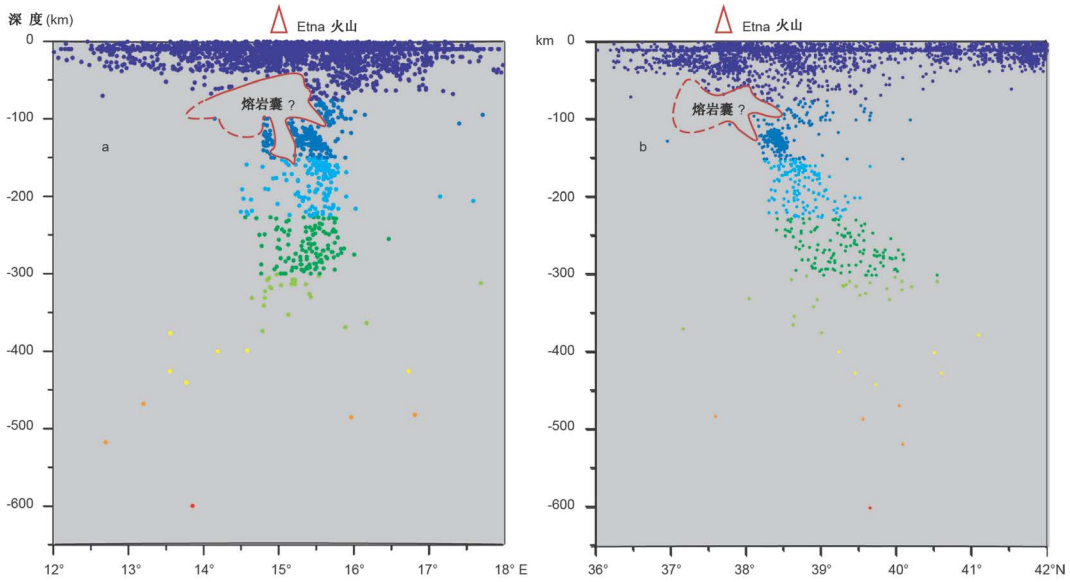



**Figure 4.** The lava sick of Etna volcano in Italy. (The earthquakes are from EMSC earthquake catalog, 2004.10.1-2014.5.28, M ≥ 2.0; and the volcanoes are from GVP web) (The earthquakes are from ANSS earthquake catalog, 1963-2015.7.4, M ≥ 4.0; and the volcanoes are from GVP web, 1900-2015.7)
**图 4.** 意大利 Etna 火山的熔岩囊(地震据 EMSC 地震目录，M ≥ 2.0，2004.10.1~2014.5.28，火山据 GVP 火山月报)

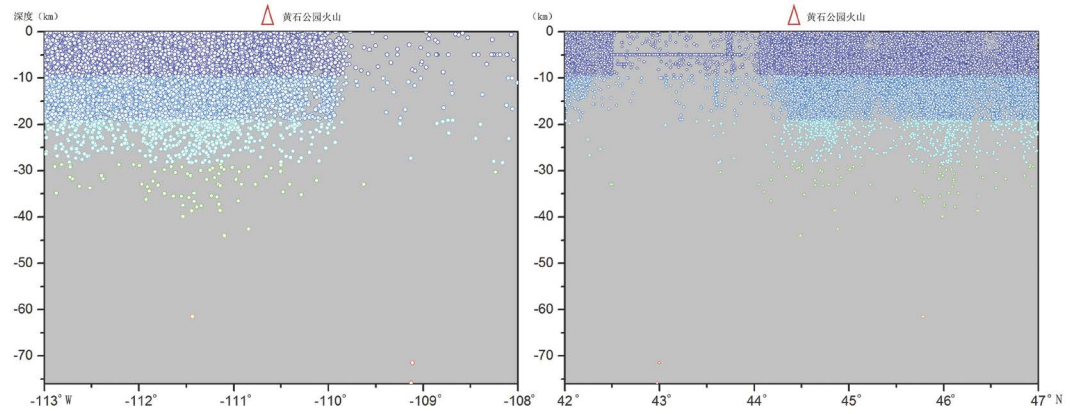



**Figure 5.** The relationship between the volcano and the subcrustal seismic activity in Yellowstone National Park, USA. (The earthquakes are from ANSS earthquake catalog, 1960-2014.5.28，M ≥ 2.0；and the volcanoes are from GVP web)
**图 5.** 美国黄石公园火山与壳下地震活动的关系(地震据 ANSS 地震目录，M ≥ 2.0，1960~2014.5.28，火山据 GVP 火山月报)

- 短期的富含气体的硅质岩浆喷发，随后是平静的玄武质熔岩流；另一些则是长期的、大量的浮石爆破，形成浮石雨和发光云(火山灰和浮石流) [3] [30]。
- 卡特迈型火山喷发(Katmai Eruption)：极粘性的酸性熔岩物质，以碎屑物组成的火山灰流在火山口附近堆积，使地面变得比较平坦，形成火山灰台地。1912 年阿拉斯加的卡特迈火山喷发属此类型[31]。

以上可归纳为地震柱型火山喷发。

作者的研究表明，热机带自下而上可划分为 5 个地层[9] [10]，即超级能动层(深度大于 500 km)、恆热层(深度 300~500 km)、次级能动层(深度 150~300 km)、储能层(深度 50~150 km)和耗散层(深度 0~50 km)，如图 6 所示。图 6 中 10~20 年不等的准周期性中、深源地震活动，作者称之为地幔年代际振荡(Mantle

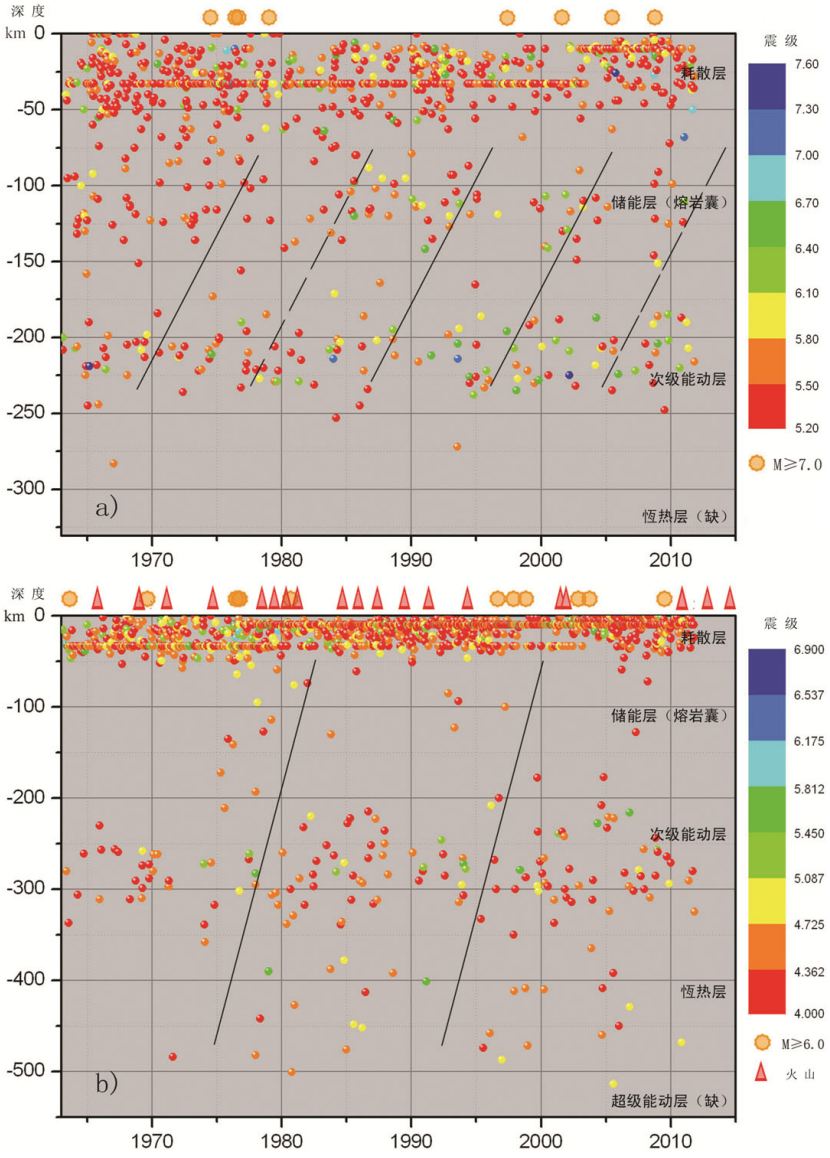



**Figure 6.** Typical time sequence chart in seismic cones; a) Hindu Kush cone, b) Italian offset of Mediterranean cone (From ANSS catalog, 1963-2011, M ≥ 4)
**图 6.** 典型的地震柱活动时序图; a) 兴都库什地震柱, b)地中海地震柱意大利分支(据 ANSS 地震目录，1963~2011，M ≥ 4)

Decadal Oscillation—MDO) [32]。于是，热机带的热能由中、深源地震携带着，在 MDO 的作用下，自下而上逐层驱动，周而复始，间歇性地为耗散层内的壳内强震和火山活动带来能量和热物质的补给。超级地震柱由于恆热层的存在，其活动图像不如图 6 典型，但也表现出同样的趋势。

在这种高温高压的环境下，地震柱型喷发全部是高粘度、富含气体的岩浆喷发，只是由于地震柱规模差异而表现为若干喷发差异。

### 3.3. 冷机带火山活动的一般特征

所谓冷机带，泛指热机带以外的区域。冷机带的地震活动主要沿大洋中脊分布，火山活动似乎也有类似情形。

#### 3.3.1. 冷机带火山活动与地幔柱的关系

地幔柱(mantle plume)或称热点(hotspot)的概念目前在国际上还没有统一的定义，一般趋向于认为是自核幔边界上升、在地幔中演化、到近地表与地壳发生壳幔相互作用的圆柱状地质体，最深可达2850 km，目前主要通过地球物理的方法识别出来[33]-[38]。关于地幔柱的结果还具有很大的不确定性，但地幔柱的存在、地幔柱是地壳和岩石圈能量与物质交换的供给者之一似乎是不容置疑的。

由图 1 可见，热机带内极少发现地幔柱，其热点是以地震柱的形式存在。图 1 中的火山分布，除热机带内以外，主要集中于冰岛、夏威夷和非洲的中南部，与相关地区的地幔柱分布一致。一些散在的火山也靠近相关的地幔柱。

#### 3.3.2. 冷机带的火山喷发

冷机带的火山喷发类型，大致有如下几种情形。

- 夏威夷型的火山喷发(Hawaiian Eruption)：低粘度的玄武岩熔岩宁静式从山顶破火山口内的喷口溢流喷出，一般属裂隙型[3] [39]。典型火山有夏威夷冒纳罗亚火山(Mauna Loa)，基拉韦厄火山(Kilauea)等。普通意义的喷发为熔岩溢流或熔岩喷泉型，遇海水发生爆炸，烟云可高达数百米。
- 冰岛型的火山喷发(Icland Eruption)：大量喷出易流动的玄武岩质熔岩，形成表面较平坦的熔岩台地[40]。典型火山有冰岛埃亚菲亚德拉冰盖火山(Eyjafjallajökull)，由于冰盖融化水的涌入而发生爆炸[3]，烟云高度可达 10km 以上。
- 非洲的火山喷发也为熔岩溢流或熔岩喷泉型，典型火山有刚果的尼亚穆拉吉拉火山(Nyamuragira)和尼拉贡戈火山(Nyiragongo)等[3]。

以上可归纳为地幔柱型火山喷发。地幔柱型喷发皆为低粘度物质，表现为熔岩溢流或熔岩喷泉型。

### 3.4. 火山活动的兴衰史

火山是具有生命的地质体，可以成生、间歇性喷发、休眠或者消亡。举 2 个例子。

1) 意大利火山

地震柱是一个倒立的圆锥体，如果比作一个树型构造，则具有树根、树干和树冠(详见附录)。意大利地震柱是一个单树型构造，只有一个树根、树干和树冠，已知最大震源深度 514 km。该地震柱目前的出地点约处在 38˚~39˚N，15˚~16˚E 位置。Etna 火山处在该区域的边缘。由图 7 可以看到，目前已休眠火山的最后喷发时间，距离出地点越远休眠时间越早。由此我们可以设想，在迄今 2000 年以前，沿着意大利西海岸曾经存在一个规模很大的熔岩囊。由于某种原因，从 100BC 开始，这个熔岩囊由西北向东南方向逐渐运移，20 世纪初期运移至 37˚~41˚N，13˚~16˚E 的位置，20 世纪 70 年代以后运移至当前的出地点。随着熔岩囊的运移与萎缩，那些历史火山就像油尽灯枯一样相继熄灭，或者休眠了[41]。

2) 夏威夷火山

据 GVP 记载，夏威夷共有火山 8 座，其中 1900 年以来有过喷发的 5 座。地图上呈北西方向展布的夏威夷岛链，其岛屿生成年代自西北向东南渐新(百万年)，岛链上火山的喷发年代也因此随之渐新[42]。图 8 展示了夏威夷岛链和火山的生命过程。

有学者解释，夏威夷火山岛的形成是由于太平洋板块向北西方向移动，经过一个固定的热点(Hot Spot)，地幔岩浆穿過洋壳而噴发。作者对此不敢苟同。热点应该是高温高压的热异常体，是地球上最容易变形，最容易转移的地质体。作者逆向思维，可能恰恰是热点的移动才造就了夏威夷的火山岛链，甚至包括从勘察加到夏威夷这个大拐弯的岛链。如果让“热点”来移动，比偌大一个洋壳的移动就省力多了[43]。大自然的运动总是以最省力的方式进行的。

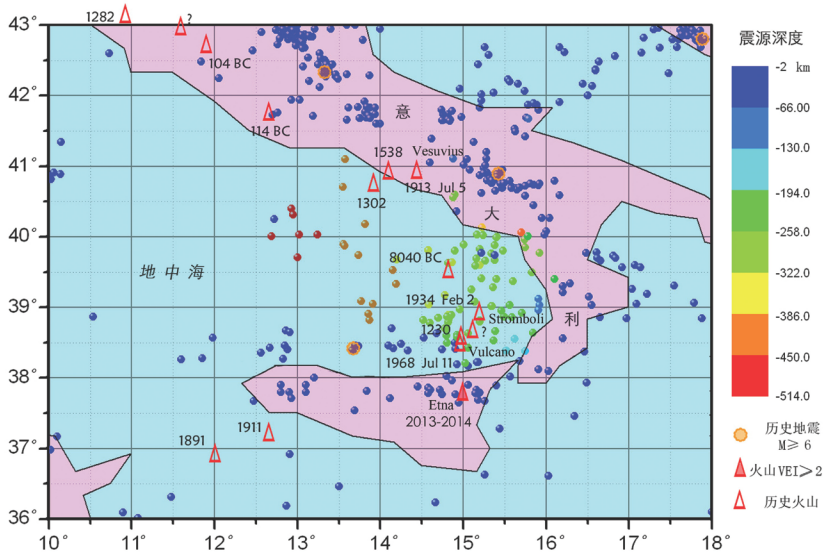



**Figure 7.** The evolution history of volcanic activities in Italy
**图 7.** 意大利的火山活动演变史

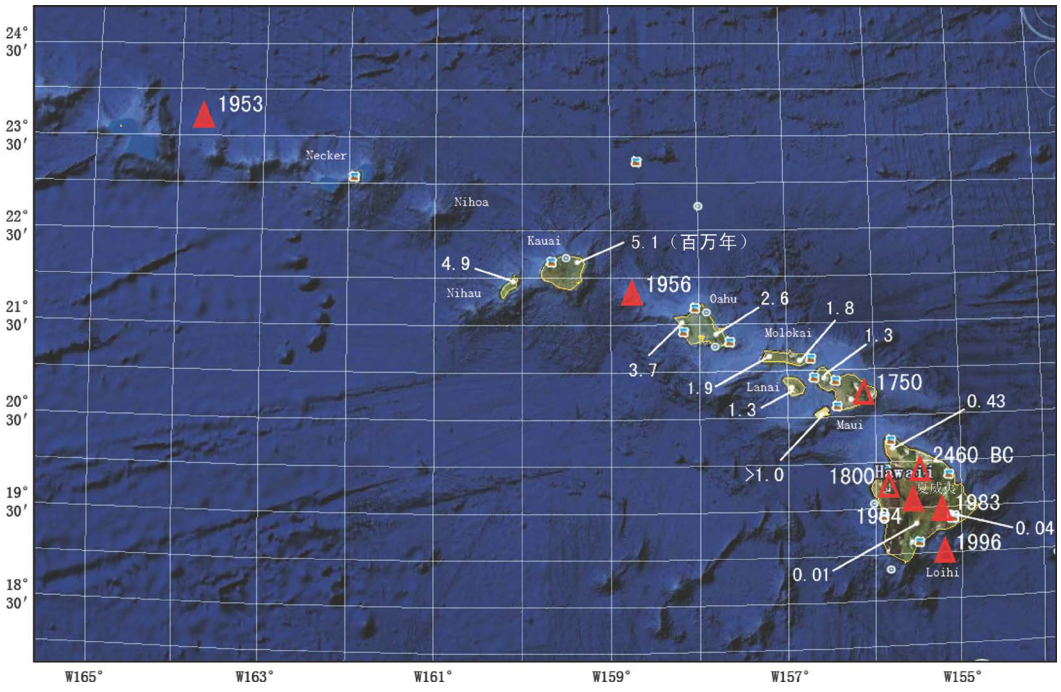



**Figure 8.** Rise and fall of the volcanoes in Hawaii islands
**图 8.** 夏威夷岛链与火山的兴衰过程

由是观之，图 7 和图 8 似乎都表明，“热点”是可以移动、可以变形的。

## 3.5. 热机带与冷机带火山活动的比较研究

以上诸节讨论了热机带和冷机带火山活动的一般特征，其共性和差异已可见一斑。

全球火山活动的共性在于，它们都完全依赖于某种地幔热点，地震柱，或者地幔柱，表明了它们的成生机制。它们的兴衰史也颇为相似，说明热点是可以移动、可以变形的。意大利和夏威夷的火山不约

而同地由西北向东南方向衰变，北美洲也可以见到类似的情形，似乎是某种与地壳运动有关的共同因素在制约着[44]。

全球火山活动的差异在于，大致可以分为两类不同性质的火山：地震柱型火山和地幔柱型火山，分别对应于地幔的高速异常体和慢速异常体，因而也构成了地震柱型火山喷发和地幔柱型火山喷发两大不同的喷发类型。地震柱型火山喷发物是高粘度、富含气体的岩浆，地幔柱型火山喷发物是低粘度的岩浆。喷发物的差异正反映了地震柱和地幔柱物性的差异。

人们通常认为，高速异常体对应的是冷物质，而慢速异常体对应的是热物质。这就引出了一个问题：为什么地壳(冷的)内的地震波速会低于地幔(热的)呢？

通过本文对火山喷发物质的辨析，作者以为地震波速的高低可能与热点内介质的物态有关[45]-[47]。我们知道，地震柱型火山喷发物是一种气态－固态－液态三相态混合岩浆，地幔柱型火山喷发物则只是固态－液态的两相态混合岩浆。于是我们可以假定：地幔的平均状态是某种(气－)固－液混沌状态，其地震波速高于单纯固态的地壳和地核。由于某种原因，地幔内部发生分异，由气－固－液的三相聚集态岩浆组成了地震柱而由固－液两相聚集态的岩浆组成了地幔柱。如此，就构成了由三相－两相－单相态介质内地震波速由高到低的系列变化，于是可以合理地解释整个地球地震波速的深度剖面。

由此，作者联想到为什么只有地震柱内才会出现中、深源的地震活动。既然地震柱是气－固－液三相聚集态的岩浆，沿用传统的断层模型来判断中、深源地震的震源机制就不合适了。假如地震柱物质以固、液、气三种聚集态存在着，有利于介质内的相变与空化，深源地震的活动则可能与空泡的溃灭有关。因此，似乎应该引入空泡动力学的理论来探讨中、深源地震的成因及其震源机制解[48]-[52]。

全球火山活动的差异还在于，由于地震柱内有中、深源地震活动，可以用来作为地震柱的活动指标预测未来的壳内强震与火山活动趋势，而地幔柱型火山则难以寻找到类似的活动性指标。

## 4. 讨论

本文通过对全球热机带和冷机带的比较研究，可以引出一些深层次的思考。

### 4.1. 关于火山成因的讨论

前面说到，热机带是一个地幔深部变异带，由科学家们所做的地震波速层析图像可以找到依据。

图 9 根据参考文献[53]和[54]的结果编制而成，显示了深度为 500 km 至 2850 km 地幔层中地震波速层析图像[55]。图 9(a)和图 9(c)是 V. Courtillot 等(2003)采用剪切波 Vs 的速度层析，变化幅度为±2%，图 9(b)是在深度为 1800 km 至 2800 km 的 1000 km 范围内 R. Montelli 等(2003)采用 P 波竖向平均速度层析，最大变化为±1%。地震波速的负异常区即为慢速异常区。图中还标注了根据 Vs 波速度层析结果所得出的 49 个热点，其中 7 个基本热点(primary)为红色圆圈并以其名称的首字母标示。

由图 9 可见，在南太平洋的不同深度层面上都显示为超级的地幔柱(super plume),而非洲的中南部可能在 1500 km 以下深度也是一个超级的地幔柱。这两个超级地幔柱在地理位置上大体呈球对称。其他如北美、冰岛、西印度洋，则在不大的深度层面上就发现有巨大的地幔柱。

图 9 展示了地幔层内两种性质不同的深部变异体，即 p(s)波的高速异常体(层)和慢速异常体(层)。对比图 1 可以看到，高速异常体对应着地震柱的分布，对应着热机带的整个条带，而慢速异常体则对应着地幔柱的分布。在图 9(c)的深部是如此，在图 9(a)的浅部也是如此。

图 9(a)中的玫瑰色圆圈为全球 24 个地震柱构造，其编号与名称参见图 1。由图可见，图 9(a)中的高速异常体条带，与当今热机带的分布极为吻合。太平洋西海岸、南美洲的滨海地带，分布着深度为 600 km 以上的超级地震柱，同纬度的中美洲、台湾及琉球、地中海－喜马拉雅等地的地震柱，深度皆在 600 km

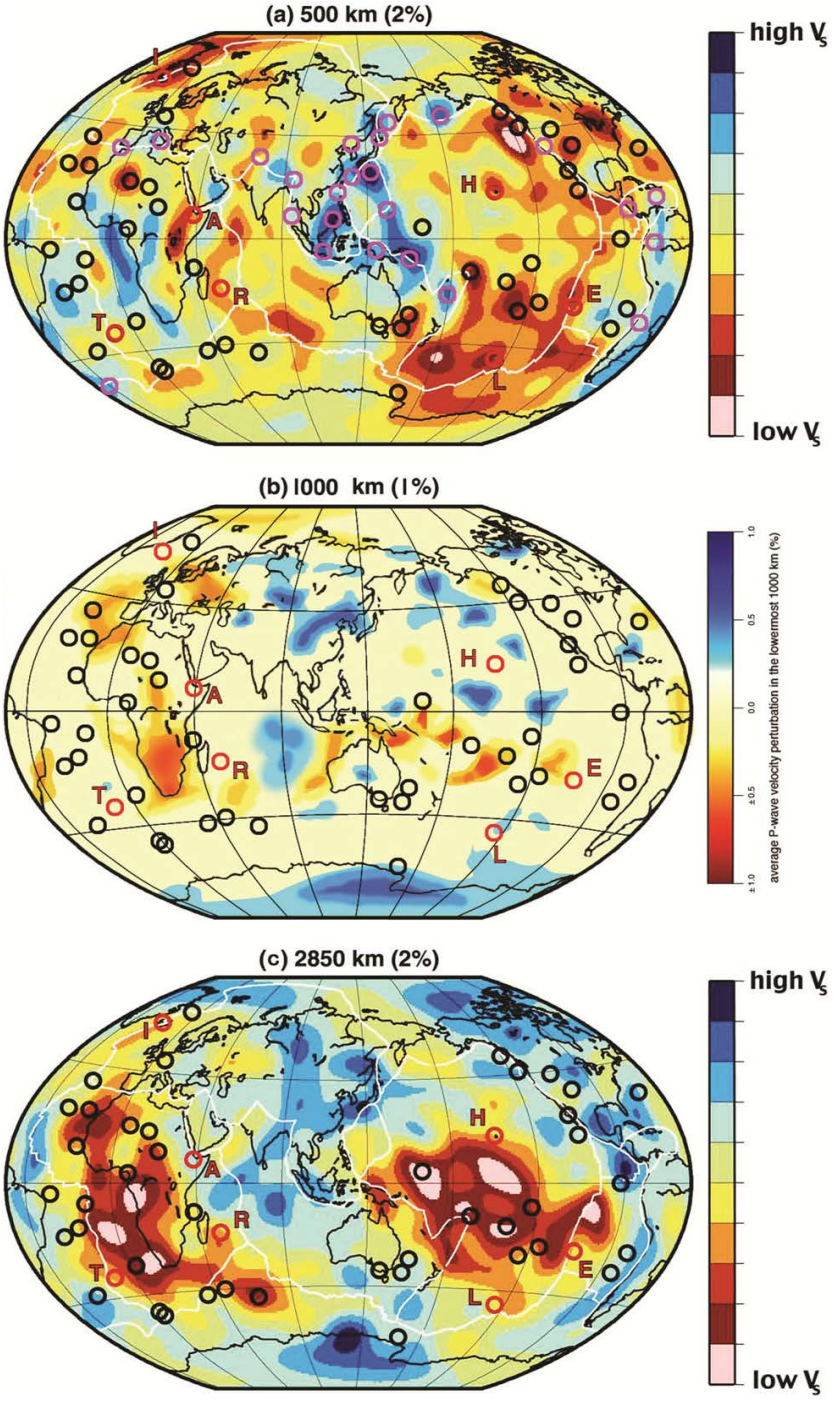



**Figure 9.** The sketch map of layer analyses results of velocity of seismic wave in Mantle (Compilation by literatures [53] and [54])
**图 9.** 全球不同深度地幔层地震波速度层析结果示意图(据文献[53]和[54]编绘)

以内，其活动性显然弱于前者。唯有非洲中南部的西海岸的高速异常条带没有地震柱的活动。北美洲的F3 号地震柱深度不到 100 km，似乎是地震柱和地幔柱在共同起着作用。

因此，地球上的火山活动与这两类异常体对应，形成两类不同性质的火山，即热机带上的地震柱型火山和冷机带上的地幔柱型火山。两者的喷发方式与喷发物质皆不相同，前者以高粘度、富含气体的岩

浆喷射活动为主，而后者则以纯岩浆的溢流活动为主。

热机带内也有地幔柱型火山存在的可能。美国黄石公园火山(Yellowstone, 44˚N, 111˚W)在图 2 上表现为地震柱型而在图 1(b)和图 9(a)上则表现为地幔柱型，似为混合型火山。据新华网 2015 年 4 月 24 日报道，美国研究人员发现黄石公园下方除了已知的一个岩浆库外，更深处还掩藏着一个更加巨大的岩浆库。研究人员表示，深层岩浆库主要成分为玄武岩熔岩，粘性较低，喷发时通常以流体形态溢出，危害不大，而浅层岩浆库主要成分为流纹岩，粘性较高，一旦喷发会比较剧烈[25]。目前，北美洲地震柱活动水平较低，出现地震柱型喷发的可能性较小，不宜过高估计黄石公园火山可能喷发的破坏力。

## 4.2. 关于热机带火山活动预测的可能性

热机带的火山活动与人类的生命和财产休戚相关，人们自然关注其预测的可能性。

对于已知的、人类监视比较周全的火山预测，刘嘉麒(1999)和洪汉净(2013)等介绍了很好的火山活动预测方法，包括地震活动、地壳形变前兆、火山地球化学异常与深部气体释放、周期预测，以及火山的预警机制，等等[2] [3]。

热机带的大量火山位于人类监管不力的地方。对于这类火山活动的中短期预测，作者在 2012 年的 3 年期预测卡片 0419 卡给出了好的例子[56]。图 10 中红色虚线圆圈为未来 3 年的火山危险区，蓝色虚线圆圈为壳内强震危险区。3 年验证结果表明，凡与地震柱活动有关的火山，基本上都发生在这些危险区内(或其边界附近)，漏报的不多[57]。

对于火山活动的短临预测，陈立军等(2015)研究意大利 Etna 火山喷发的时间预测时给出了很好的例子[24]。由于火山活动多发生在地震柱柱体的出地点附近，地震柱的柱体内地震活动月频次或者壳下地震活动的月频次，都能很好地预示未来 1~3 个月内火山可能喷发的信息。

意大利地震柱的柱体取 36˚~42˚N、12˚~18˚E，即地震柱柱体出地点附近区域，不含地震柱的影响区。柱体地震活动的月频次与火山喷发的关系见图 11。图 11 中的实曲线为柱体内的总频次，虚型曲线为 35 km 深度以下的壳下地震月频次。两条曲线的总体趋势一致。柱状的实线表示火山喷发时间及其喷发指数(表 4)。实曲线和虚型曲线的灰色合集是火山爆发的前兆。火山的前兆与火山的喷发事件是基本吻合的[41] [58]。

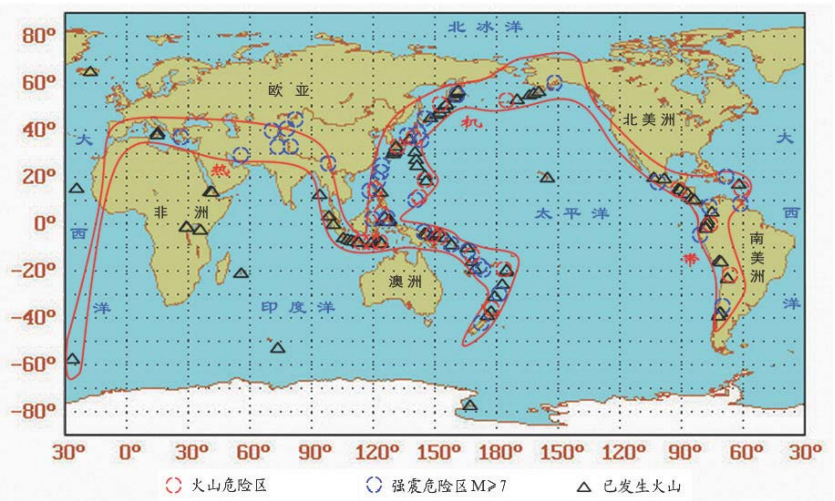



**Figure 10.** Check up of the predictive card 0419 for the prediction of volcanoes in past 3 years (The volcanoes according to the GVP monthly, 2012.4-2015.4)
**图 10.** 作者的 0419 预测卡片对 3 年内火山预测的检验(火山据 GVP 火山月报，2012.4~2015.4)

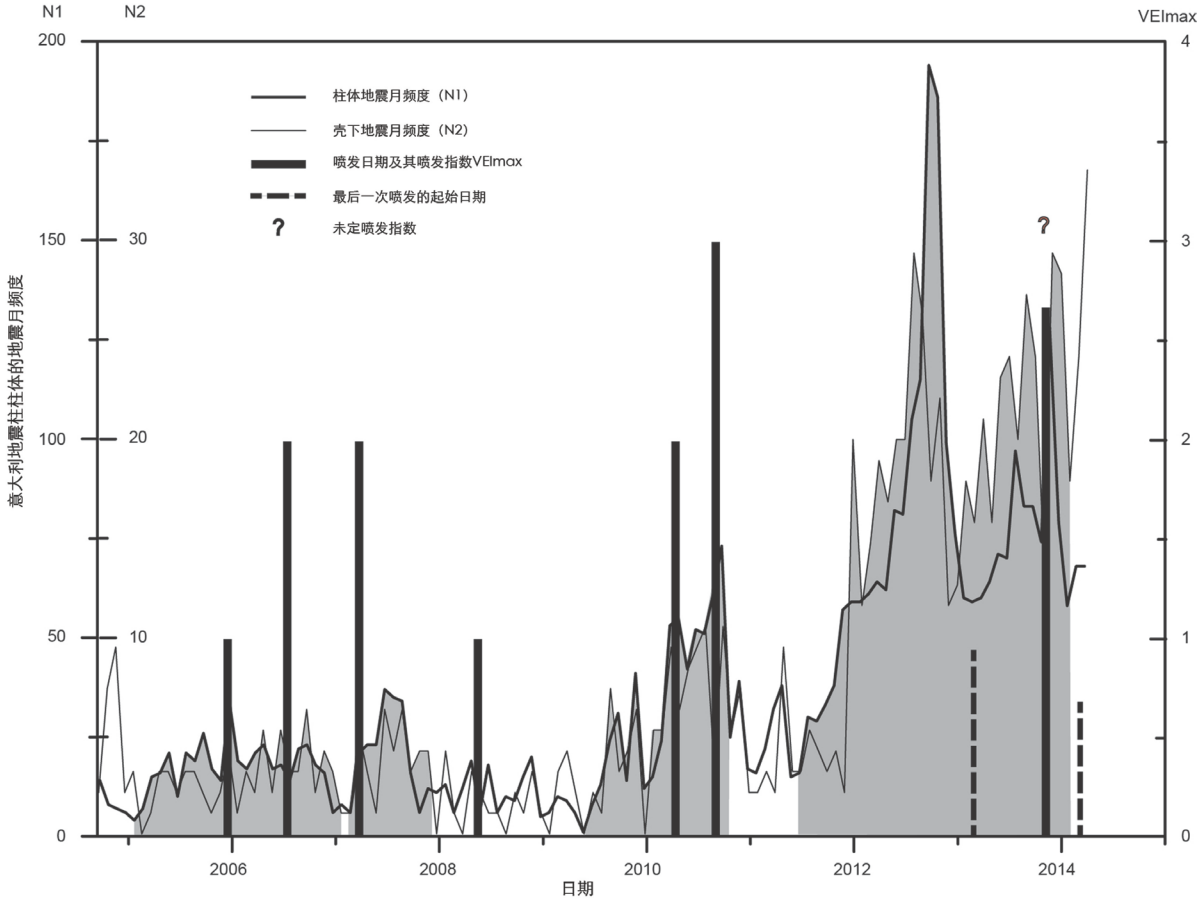



**Figure 11.** The relationship between frequency monthly of earthquake activity and volcano activities in Italy cylinder (By EMSC earthquake catalog, M ≥ 2.0, 2004.10.1-2014.4.26, the GVP monthly, 2012.4-2015.4)
**图 11.** 意大利地震柱地震活动的月频次与火山活动的关系(据 EMSC 地震目录，2004.10.1~2014.4.26，M ≥ 2.0)

**Table 4.** Etna volcano eruption since 2005*
**表 4.** 埃特纳火山 2005 年以来的喷发记录*

| 起始日期 | 终止日期 | VEI | 活 动 地 点 |
|---|---|---|---|
| 2013 Sep 3 | 2014 Feb 27 (?) | ? | New Southeast Crater (NSEC) |
| 2010 Aug 25 | 2013 Apr 27 | 1 | BoccaNuova, NE and SE Craters |
| 2010 Apr 8 | 2010 Apr 8 | 2 | SE Crater |
| 2008 May 13 | 2009 Jul 4 | 1 | East base of NE Crater (3000 - 2650 m) |
| 2007 Mar 19 | 2008 May (?) | 2 | BoccaNuova, SE Crater and flank vents |
| 2006 Jul 14 | 2006 Dec 15 | 2 | SE Crater & flank vents; NE Crater |
| 2005 Dec 16 | 2005 Dec 22 | 1 | BoccaNuova |

*据 http://www.volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=211060.

作者关于热机带的地震地热说火山预测方法包含 4 条原则：

- 按照本地地震活动水平确定壳下地震的深度下限，发现壳下地震活动密集区；
- 确定密集区是否靠近地震柱柱体的出地点；
- 按照地震柱震源深度时序图，估计火山活动时段与活动强度(以年、月计)；

- 按照地震柱柱体地震活动月频次，估计火山喷发日期(以月、旬、天计)。

图 10 和图 11 的结果，说明这种预测方法是大致可行的。本预测方法所采用的地震数据需要满足两个基本条件：第一是区域地震台网能够有效监测 2 级以上地震，第二是测定震源深度的方法和精度与 ANSS 地震目录和 EMSC 地震目录接轨。

## 5. 结论

本文的研究，以及陈立军等(2015)关于“全球热机带和冷机带的地震活动对比研究”[9] [10]结果(姊妹篇)都表明，试图按照某种地表的地质构造模式来解释中、深源地震活动和火山活动的成因与活动机制是没有意义的，必须从地幔深部的构造和结构出发，才有可能获得真谛。

本文根据地震地热说的工作方法，采用 Smithsonian Institution 的火山资料、mantleplumes 网页的地幔柱资料以及作者的地震柱资料，以地震柱或地幔柱为构造单元和统计单元，对比分析了火山活动与热机带和冷机带的依存性、火山的喷发类型、火山的兴衰史，并讨论了火山的成因和热机带火山预测的可能性，从而为地震地热说火山预测方法的研究奠定了理论基础。

研究结果表明，火山的成因与地幔内的地震柱和/或地幔柱有关，火山活动的能量与热物质的补给可能来自地幔的深部，从而构成两类性质差异的火山群落，地震柱型火山和地幔柱型火山，各自具有不同的活动方式与活动规律。热机带及其所包含的地震柱，是全球火山活动的主体，也是全球地质灾变的主体，与人类的生存休戚相关。因此，应该拓展火山的预测研究思路，加强对壳下地震活动的监测与研究，或许能解热机带内的火山预测之困。

## 致　谢

本文研究所采用的 ANSS 地震目录来自北加利福利亚地震数据中心(NCEDC)，doi:10.7932/NCEDC，EMSC 地震目录来自欧洲地中海地震中心，火山资料取自 Smithsonian Institution 的 Global Volcanism Program (GVP)网站，地幔柱资料取自 www.mantleplumes.org 网页，谨此一并致谢。

## 基金项目

湖南省地震局 2012 年度地震科研课题(3 年期)资助，编号 201201。

## 参考文献 (References)

[1] Smithsonian Institution (2015) Global volcanism program. http://volcano.si.edu/index.cfm

[2] 刘嘉麒 (1999) 中国火山. 科学出版社, 北京.

[3] 洪汉净 (2013) 火山预测与预警. 地震出版社, 北京.

[4] Anderson, D.L. (2015) The compleate hot spot. http://www.mantleplumes.org/CompleateHotspot.html

[5] 陈立军 (2000) 中国地震震源深度与强震活动状态研究. *地震地质*, **4**, 360-370.

[6] 陈立军 (2012) 地震地热说原理与应用. *内陆地震*, **2**, 108-122.

[7] 陈立军 (2013) 地震柱的概念及其基本特征. *华南地震*, **1**, 1-14.

[8] 陈立军, 胡奉湘, 陈晓逢 (2013) 全球地震柱的地震层析成像证据. *华南地震*, **4**, 1-10.

[9] Chen, L.J., Chen, X.F., Wan, F.F., Li, P.Z. and Shao, L. (2015) Comparative study of global seismicity on the hot engine belt and the cooling seismic belt—Improvement on research ideas of earthquake prediction. *International Journal of Geosciences*, **6**, 741-749. http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2015.67060

[10] 陈立军 (2015) 全球热机带和冷机带的地震活动对比研究(再版). http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-912394.html

[11] 陈立军 (2011) 日本 9.0 级地震百日纪. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-458696.html

[12] 陈立军 (2012) 日本 9 级地震与碰撞和俯冲无关. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-565201.html

[13] 陈立军 (2011) 南美洲和中美洲的火山研究. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-458473.html

[14] 陈立军 (2011) 白令海的火山研究. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-457775.html

[15] 陈立军 (2011) 西太平洋的火山研究. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-458428.html

[16] 陈立军 (2011) 印尼和菲律宾的火山研究. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-456069.html

[17] 陈立军 (2011) 所罗门的火山研究. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-452891.html

[18] 陈立军 (2011) 西汤加的火山研究. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-454760.html

[19] 陈立军 (2011) 东汤加的火山研究. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-454791.html

[20] 陈立军 (2011) 土耳其的火山与地震研究. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-452480.html

[21] 陈立军 (2011)意大利的火山研究. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-452242.html

[22] 陈立军 (2011) 北美洲的火山研究(修订稿). http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-456658.html

[23] 陈立军 (2012) 印尼 9 级地震的成因分析. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-571677.html

[24] Chen, L.J., Chen, X.F. and Shao, L. (2015) Method research of earthquake prediction and volcano prediction in Italy. *International Journal of Geosciences*, **6**, 963-971. http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2015.69076

[25] 新华网 (2015) 黄石公园超级火山下发现巨大岩浆库. http://news.xinhuanet.com/2015-04/24/c_1115080296.htm

[26] 搜狗百科 (2015) 斯特朗博利型火山喷发. http://baike.sogou.com/v72327989.htm

[27] 搜狗百科 (2015) 乌尔坎诺型喷发. http://baike.sogou.com/v70813826.htm

[28] 搜狗百科 (2015) 武尔卡诺型火山喷发. http://baike.sogou.com/v69325711.htm

[29] 搜狗百科 (2015) 培雷型火山喷发. http://baike.sogou.com/v69325705.htm

[30] 搜狗百科 (2015) 普里尼型火山喷发. http://baike.sogou.com/v66496039.htm

[31] 搜狗百科 (2015) 卡特迈型火山喷发. http://baike.sogou.com/v10462672.htm

[32] Chen, L.J. (2013) Mantle decadal oscillation (MDO). http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-665664.html

[33] Davies, G.F. (2005) 地幔柱存在的依据. *科学通报*, **17**, 1801-1813.

[34] Anderson, D.L. (2004) What is a plume? Seismological Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena. http://www.mantleplumes.org

[35] Ito, G., Lin, J. and Graham, D. (2003) Observational and theoretical studies of the dynamics of mantle plume—Mid-ocean ridge interaction. *Reviews of Geophysics*, **41**, 1017. http://dx.doi.org/10.1029/2002RG000117

[36] Niu, Y.L., Michael, J. and O'Hara, M.J. (2007) "Mantle plumes" are NOT from ancient oceanic crust. http://www.mantleplumes.org/NotFromCrust.html

[37] 王登红, 李建康, 刘峰, 陈振宇 (2004) 地幔柱研究中几个问题的探讨及其找矿意义. *地球学报*, **5**, 489-494.

[38] 徐义刚 (2002) 地幔柱构造、大火成岩省及其地质效应. *地学前缘*, **4**, 341-353.

[39] 搜狗百科 (2015) 夏威夷型火山喷发. http://baike.sogou.com/v66514969.htm

[40] 搜狗百科 (2015) 冰岛型火山喷发. http://baike.sogou.com/v10866887.htm

[41] Chen, L.J. (2011) Volcano research in Italy. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-457141.html

[42] 刘忠光 (2007) 夏威夷火山海岛的成因. http://www.alumni.hchs.hc.edu.tw/documents/446.pdf

[43] 陈立军 (2011) 冰岛、夏威夷以及非洲的火山略考. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-459249.html

[44] 陈立军 (2015) 2013 年巴基斯坦 7.7 级地震与兴都库什的地震构造. *内陆地震*, **1**, 15-27.

[45] 陈立军 (2011) 热力学要点. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-471020.html

[46] 陈立军 (2011) 相变 (1). http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-471467.html

[47] 陈立军 (2011) 相变 (2). http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-471781.html

[48] Brennen, C.E. (1995) Cavitation and bubble dynamics. Oxford University Press Inc., New York.

[49] 陈立军 (2011) 相变、成核与空化(1). http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-472526.html

[50] 陈立军 (2011) 相变、成核与空化(2). http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-475517.html

[51] 陈立军 (2011) 相变、成核与空化(3). http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-477723.html

[52] 陈立军 (2011) 相变、成核与空化(4). http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-478764.html

[53] Courtillot, V., Anne, D., Jean, B. and Joann, S. (2003) Three distinct types of hotspots in the earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, **205**, 295-308. www.elsevier.com/locate/epsl http://dx.doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01048-8

[54] Montelli, R., Nolet, G., Dahlen, F.A., Masters, G., Engdahl, E.R. and Hung, S.H. (2004) Geophysics: Finite-frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle. *Science*, **303**, 338-343. http://dx.doi.org/10.1126/science.1092485

[55] 陈立军 (2011) 全球地震、火山和地幔柱的比较研究. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-439534.html

[56] 陈立军 (2015) 全球主要地震柱 3 年期地震与火山预测卡片 0419 卡的有关说明. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-883826.html

[57] 陈立军 (2015) 2012 年 0419 预测卡片的试验总结(网络版). http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-894296.html

[58] 陈立军 (2011) 意大利地震柱的地震层析图像依据. http://blog.sciencenet.cn/blog-552558-505496.html

# 附录(Appendix)

## 1. 地震柱构造概述

地震柱构造的概念，是作者关于地震地热说的基本构造要素。地震柱构造是一种客观存在的自然现象，是一种稳定而具有生命力的地质构造体。由地震柱的概念出发，可以构成全球的热机带和冷机带两大构造体系，可以对壳内强震与火山活动做出预测研究，可以对深源地震成因的研究拓展新的空间，或者还可以对矿产研究提供新的视野。因此，地震柱构造的概念建立，对于地学研究是十分有益的。

### 1.1. 地震柱构造的概念

2011 年 3 月 11 日日本 9 级地震以后，为了解释该地震的成因，作者采用美国地质调查局 USGS 的 ANSS 地震目录的三维坐标，按照全球 7 级以上地震的分布和中深源地震活动的分布，划分全球 24 个地震柱构造。其中，21 个全球性大型地震柱和 3 个次级地震柱。壳内强震 8 级以上者可称超级地震柱。地中海地区的地震柱图像，得到欧洲地中海地震中心的 EMSC 地震目录的一致性印证。地震柱是由中、深源地震的震源体密集所组成的顶点向下的圆锥形的地质体(seismic cone)，已知最大深度 740 km。地震柱(及其影响区)的活动是全球 95%以上浅源强震和 85%以上活火山喷发的主导因素。

### 1.2. 地震柱构造的图像

全球 24 个地震柱的编号及名称如正文图 1 所示，24 个地震柱的三维立体图像分列于图 A1、图 A2 和图 A3 之中。

### 1.3. 地震柱构造的基本特征

地震柱形状类似于树，具有树根、树干(柱体)和树冠(影响区)，姑且称之为树型结构。同一个地震柱内，可以是单树型、双树型或多树型构造。还有树杈型，即同一个树根和树干上带有多个树杈的。不论什么样的结构，地震柱的顶部即树冠部分很大，而其底部，即树根部分则都很小，多呈点状或短线状。由陈立军等(2012~2015)所发表的论文和科学网陈立军的博客(http://blog.sciencenet.cn/seisman)等参考文献中的论述，可概括地震柱的基本特征如下：

#### 1.3.1. 地震柱影响区的特征

- 地震柱影响区比柱体大若干倍。壳内强震和活火山围绕地震柱的出地点及其周边分布。
- 浅源地震活动多为散布，距离出地点远的地震多受构造体系的控制。
- 壳内强震多发生在影响区边部，距离出地点稍远。
- 活火山多出现在地震柱或其分支的出地点附近。
- 地震柱影响区地震分布的特殊形态：一种是爱琴海和所罗门地震柱影响区的环形构造，一种是缅甸地震柱影响区的棋盘格式构造。
- 地震柱的出地点和棋盘格式构造的节点上或有地幔型矿藏分布。

#### 1.3.2. 地震柱柱体的特征

- 地震柱的柱体多数近乎直立，大角度倾斜的只有 01 号南智利地震柱、06 号鄂霍茨克地震柱、12 号菲律宾地震柱。
- 西北太平洋密集若干地震柱，其柱体形状与海沟没有明显的相关性。
- 日本地震柱是全球唯一的双腿地震柱，具有两个树根而只有一个树干、一个树冠。
- 大型地震柱内会有若干分支，比如 16 号印度尼西亚地震柱，19 号地中海地震柱等。这些分支也具

有独立地震柱的所有特征。

- 地震柱最大深度与地震监测能力有关。F3 号北美洲地震柱 2 级地震目录深度可达 600 km 以上，而按照 4 级地震目录则只有 98 km。19 号地中海地震柱 2 级地震目录深度可达 690 km 而按照 4 级地震目录只有 514 km。

### 1.3.3. 地震柱的整体特征

- 地震柱内的地层自下而上大致可划分为 5 层，即超级能动层(深度大于 500 km)、恆热层(深度 300~500 km)、次级能动层(深度 150~300 km)、储能层—熔岩囊(深度 50~150 km)和耗散层(深度 0~50 km)。柱体深入到超级能动层的为超级地震柱。
- 熔岩囊起着储能和承下启上的作用。恆热层可能较少地震活动，火山多发地区的储能层也有类似情形。
- 地震柱的中、深源地震活动时序图呈“自下而上逐层驱动”之势，其动力来源或许是地幔深部的波动，作者称之为地幔年代际振荡(Mantle Decadal Oscillation—MDO)。
- 过地震柱轴面和出地点的任意方位可以画出地震柱内部的本尼奥夫剖面(Benioff section)，可以追踪直下型壳下地震活动。本尼奥夫剖面的底边包络线是地震柱圆锥体的一条母线，只能因地震柱而存在。因此，不能将某个地震柱的本尼奥夫剖面向外延拓或者串联。
- 地震柱均为独立活动，其活动程式各不相同，但又受到某种因素的整体制约。
- 地震柱的活动强度由历史活动水平估计。一般 4 级以上地震组成的柱体规模越大，柱体扎根越深，地震柱的活动强度越高。
- 地震柱内的壳内强震与火山喷发是释放地震柱能量的两种不同活动方式，具有互补特征，因而其预测方法具有同一性。
- 大量证据表明，地震柱是 P 波快速异常体。冰岛和夏威夷与之相反，是 P 波慢速异常体。快速异常体和慢速异常体内介质可能存在物态差异，因而对壳内强震与火山活动的影响也存在差异。
- 诸多迹象表明，地震柱是有生命的地质体，可以新生、间歇性喷发、移动、衰减或消亡。
- MDO 的准周期活动形态可以预测地震柱未来活动的大致时段与大致强度，壳下地震的密集区可能预示未来壳内强震或者火山活动地点或区域。
- 地震柱是一种特殊的地幔柱。各地震柱及其分支，50 年来图像稳定，形状规整，柱面边界清晰。地震柱通过地震目录“3D 打印”而成，毋容置疑。

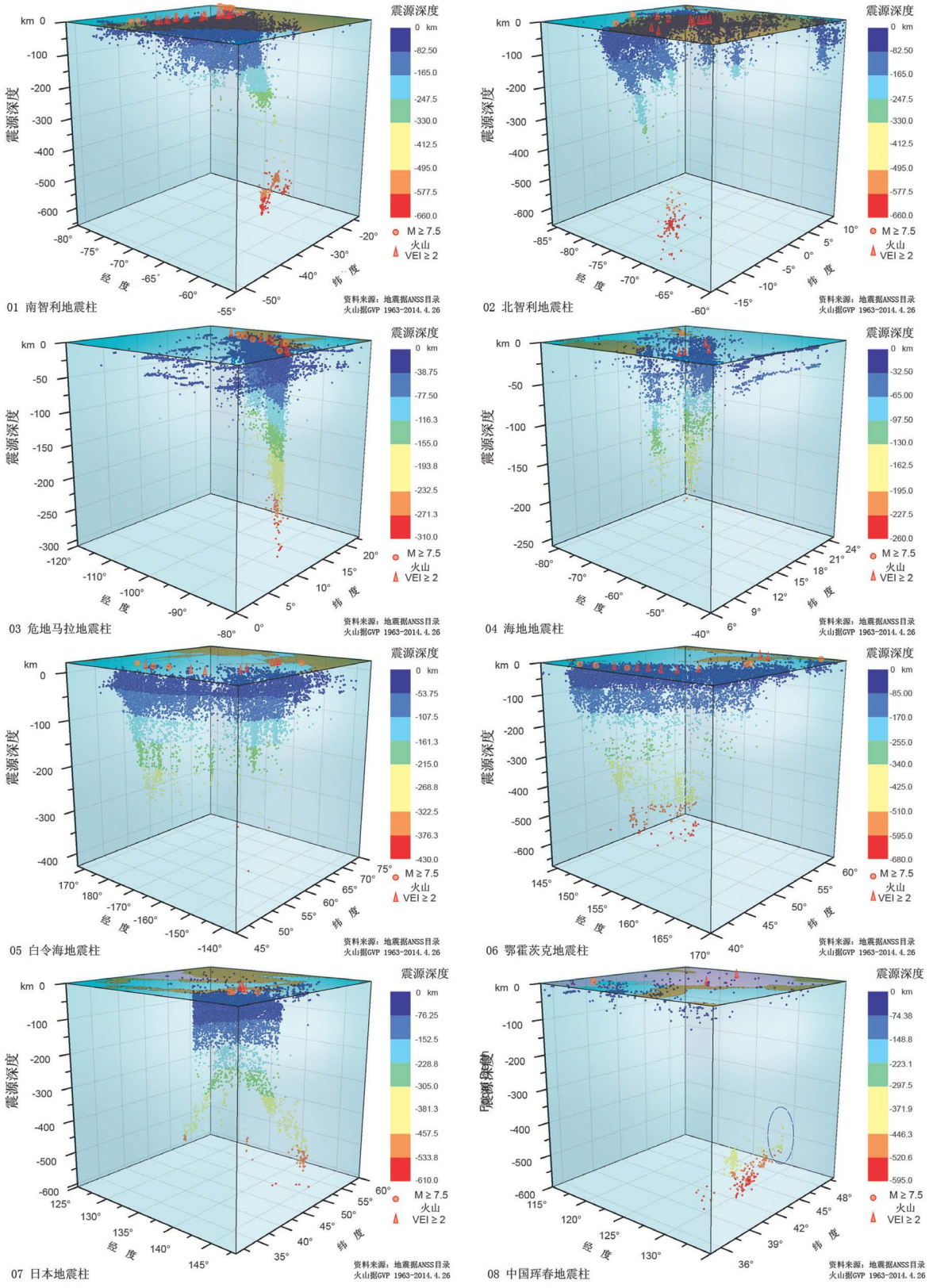



**Figure A1.** D images of seismic cones No.01-No.08
**图 A1.** No.01~No.08 地震柱的三维图像

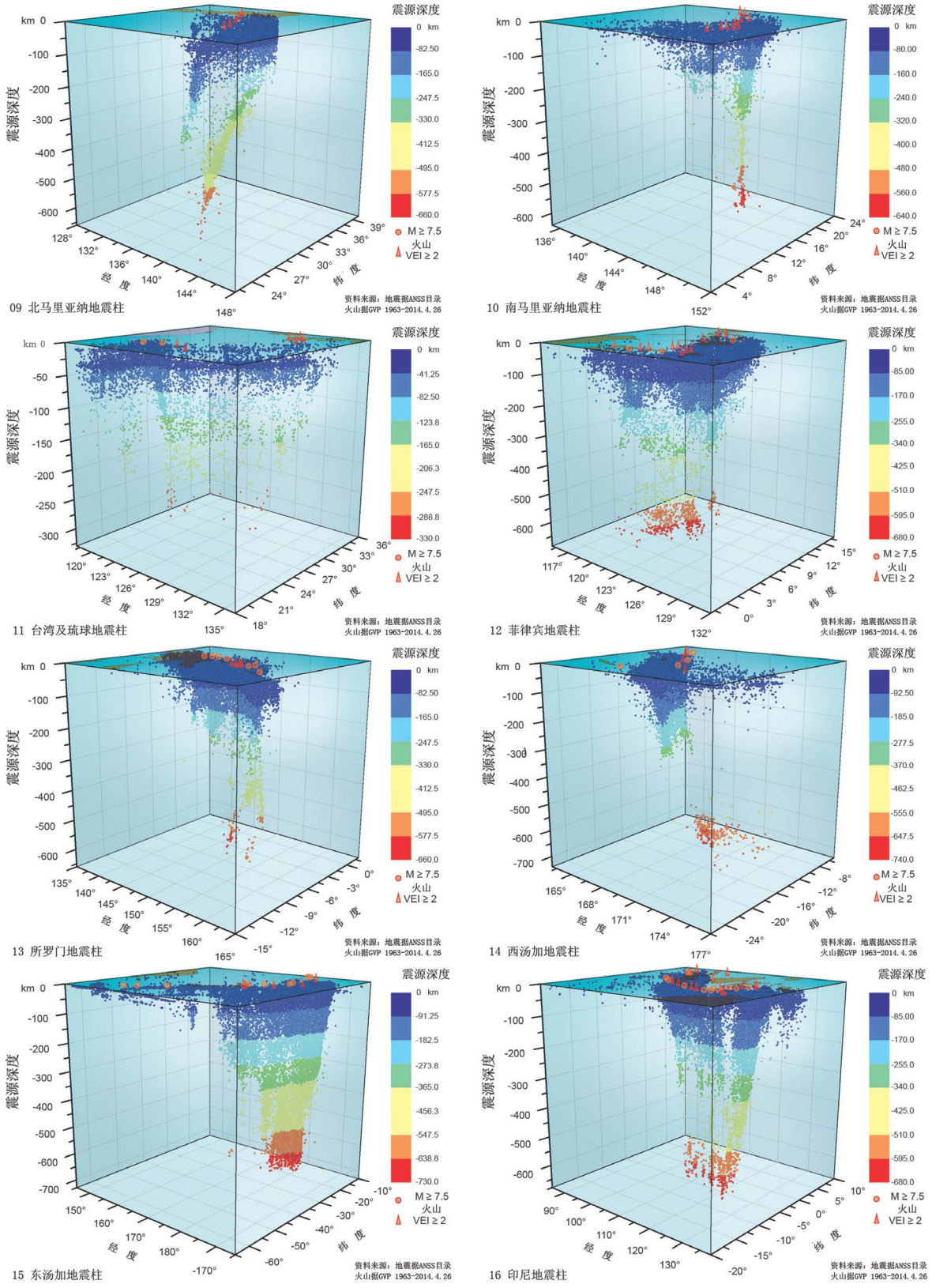



**Figure A2.** D images of seismic cones No.09-No.16
**图 A2.** No.09~No.16 地震柱的三维图像

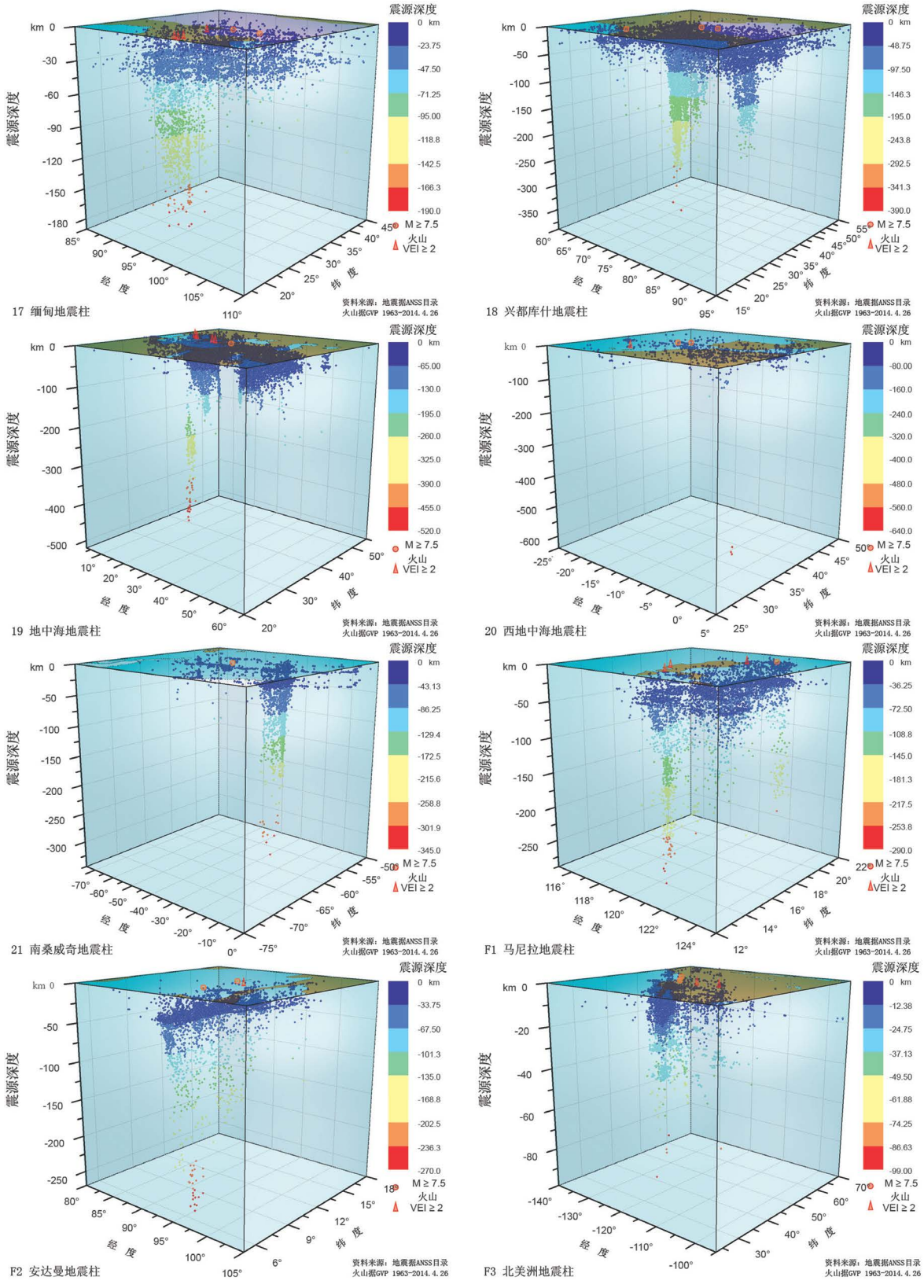



**Figure A3.** D images of seismic cones No.17-F3
**图 A3.** No. 17~F3 地震柱的三维图像