

文章编号 1001-8166(2004)03-0364-04

长白山火山的起源和太平洋俯冲板块之间的关系

雷建设, 赵大鹏

(爱媛大学地球动力学研究中心, 日本松山市 790 - 8577)

摘 要 近年来, 尽管不同学科通过不同手段对长白山火山进行过广泛研究, 然而, 目前人们对它的起源仍不清楚。利用全球地震层析成像和区域层析成像结果, 综合分析了长白山火山的起源。结果表明, 它的起源既不同于夏威夷等板内热点火山, 也不同于日本等岛弧火山, 而是一种与太平洋俯冲板块在地幔转换带内的滞留和深部脱水等过程密切相关的弧后板内火山。

关键词 长白山火山, 板内火山, 俯冲板块, 地震层析成像

中图分类号 P315.63 文献标识码 A

0 引言

在中国大陆有 3 个著名的活火山: 五大莲池、长白山和腾冲火山。腾冲火山位于中国西南部, 五大莲池和长白山位于中国东北部。这 3 个活火山在历史上都曾多次喷发, 如五大莲池于 1719—1721 年间^[1], 腾冲火山于 1465—1620 年间^[1], 长白山于公元前 1120 年、公元 1050、1413、1597、1668 和 1702 年喷发过^[2]。然而, 这些火山的起源人们都还不清楚。

长白山火山也叫天池或白头山火山, 位于中国东北部和朝鲜接壤的长白山上。地质学、地球物理学和地球化学等多种不同学科不同方法都已被用于对长白山火山起源的研究。例如, 大地电磁测深结果表明长白山之下的地壳为低阻层^[3]; 地震爆破实验结果表明长白山火山之下的地壳与上地幔顶部存在低速异常, 这说明在该异常区有岩浆囊存在^[4]。有些学者认为长白山火山为热点火山^[5], 而有些研究结果却表明它是一种弧后火山^[6]。为进一步澄清长白山的成因, 本文通过综合分析全球地震层析成像和区域层析成像结果来系统地讨论长白山火山的起源。

1 全球地震层析成像

图 1 显示了一个全球 P 波地震层析成像^[7]从

西太平洋至东亚的纵剖面结果。这个模型除使用直达 P 波外, 还使用了 pP、PP、PcP 和 Pdiff 等多种后续震相, 并考虑了莫霍面、410 和 660 km 间断面的起伏变化对射线路径和走时的影响^[8]。由图 1 可以清楚看到, 在上地幔中的俯冲太平洋板块成像为非常清晰的高速异常带, 而且深至 600 km 的板块内部也有地震发生。由于在全球模型中采用了较大间距的网格节点, 高速异常带厚度看似 150 ~ 200 km。而在高分辨率区域地震层析成像中, 板块厚度仅 100 km 左右, P 波速度比周围地幔高达 5% ~ 6%^[8,9]。在中国东北部, 俯冲太平洋板块在地幔转换带内呈现为滞留状态(图 1)。在滞留板块之下的下地幔, 可以看到高速异常碎片。在其它的全局模型^[10-12]中, 也可以发现类似的异常结构特征。这些结果表明, 太平洋板块在俯冲过程中遇到了 670 km 间断面的强大阻力, 因而在地幔转换带中变弯并在此长期积累(超过 1 亿年之久), 最后因相变引起的极大重力不平衡而下落至核幔边界。

图 1 还显示了长白山火山之下地震波速呈现极强的低速异常, 它也正好位于在地幔转换带中滞留的太平洋板块之上。这一结果和斐济—汤加地区的地震层析成像细结构结果非常类似, 即斐济弧后火山正好处于汤加板块地幔楔的极低波速异常区之上^[9]。

收稿日期 2004-04-09, 修回日期 2004-04-19.

作者简介: 雷建设(1969-), 男, 山西运城人, 博士后, 主要从事地震层析成像的理论和应用研究. E-mail: leijs@sci.ehime-u.ac.jp

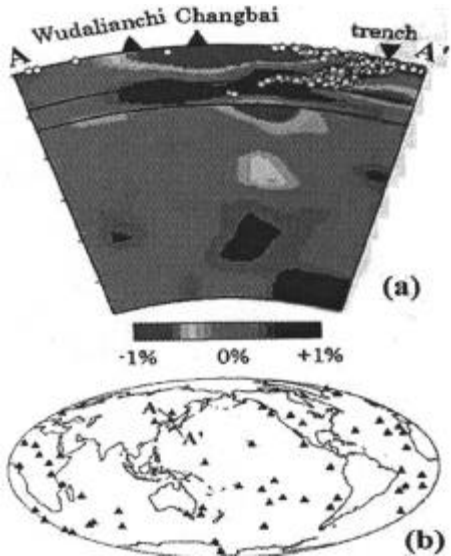


图 1 (a)全球三维速度模型^[7]中沿长白山和五大莲池火山纵剖面(AA')P波速度结构

Fig 1 (a) Vertical cross section of P-wave velocity image determined by the global tomographic inversion (Zhao, 2001) along the Changbai and Wudalianchi volcanoes (a) 白色圆圈为距剖面 150 km 范围内的地震 红色和蓝色分别代表低速和高速异常,色标在图底 (b) 显示了纵剖面 AA' 的位置,黑三角为全球热点火山(中国东北除外)

(a) Red and blue colors denote low and high velocities, respectively. The velocity perturbation scale is shown below the cross section. Black triangles on the top of the cross section denote volcanoes. The inverted triangle shows the location of the Japan Trench. White dots show the earthquakes within 150 km of the profile. (b) Map showing the location of the cross section in (a). The triangles show hotspot volcanoes except those in northeast Asia

2 区域层析成像

美国纽约州立大学吴大铭教授领导的研究组于 1998 年夏在中国东北部长白山附近设置了 19 个临时地震台站用于观测远震地震波形^[13]。目前这些波形资料已用于接收函数研究,其结果表明在长白山之下的太平洋俯冲板块在地幔转换带内呈现为滞留状态,并经过长期积累一部分下落至下地幔^[14,15]。然而,这些新资料还没用于区域地震层析成像研究。最近,雷建设等从 19 个临时地震台站和 3 个 CDSN 台站(牡丹江、北京和海拉尔)记录到的、围绕长白山有较好分布的 68 个远震波形中精确地读取了 548 个 P 波和 380 个 S 波高质量到时资料,然后用远震层析成像方法^[8]对长白山火山之下的

地壳上地幔的地震波速度结构进行了详细成像研究。

结果表明,在长白山火山之下的上地幔,P波和S波速度异常分别达到-3%和-4%,异常体呈柱状,其宽度约为200 km,深度方向由地表延伸至400 km左右(图2)。该异常体呈现为倾斜柱体,这种倾斜可能与地表其它火山分布有关。长白山火山之下的地幔转换带被成像为高速异常,并有深源地震在此发生。我们确信该高速异常体是太平洋俯冲板块。详细的分辨率及误差分析表明这些结果是十分可信的。

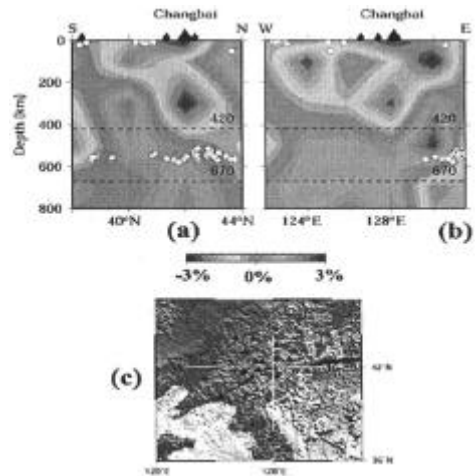


图 2 通过长白山火山的南北向(a)和东西向(b)纵剖面P波速度结构

Fig 2 North-south (a) and east-west (b) vertical cross sections of P-wave velocity anomalies, respectively. 黑三角为火山;白色圆圈为距离剖面 200 km 范围内的地震;图(c)显示了两个纵剖面(白线)的位置,黑三角为 19 个临时地震台站,白色钻石符号为牡丹江台站,红三角为板内火山。

等值线为俯冲太平洋板块深度

The velocity perturbation scale is shown below the cross sections. White dots show the earthquakes within 200 km of the profiles. The locations of the cross sections are shown in the insert map (c)

3 讨论

地球上的火山基本分为 4 种:洋中脊火山、俯冲带火山、板内热点火山以及与岩石圈破裂和软流圈上涌相关的板内火山^[16,17]。显然,长白山火山不是第一种火山。由于在它下面存在太平洋滞留板块,因而它不同于夏威夷、冰岛和欧洲的艾费尔高原(Eifel)板内热点火山^[17,18,19]。最近研究结果表明,有些板块边界是一个很宽的形变带,而不像最初板

块理论提出时假想的非常狭窄的变形带^[20]。长白山火山距离日本海沟约 1 000 km,并位于滞留板块之上,因而长白山火山的起源也不同于距离海沟很近的千岛及日本列岛上的岛弧火山。弧后低速异常通常与地幔楔内因俯冲板块深部脱水而引起的岩浆作用和火山作用相关^[8,21]。这些过程导致了中国东北部软流圈物质大尺度上涌、大陆岩石圈破裂以及板内火山作用等大地构造运动(图 3a)。因而,本

文认为长白山火山是一种与太平洋俯冲板块滞留及深部脱水等过程紧密相关的一种弧后板内火山。Tatsumi 等^[16]首先提出用软流圈热物质上涌来解释五大莲池和长白山火山起源。然而,他们当时还不知道在中国东北之下的地幔转换带中存在太平洋俯冲板块。因此,我们现在将其模型进行了修正(图 3b),并认为地幔转换带中的太平洋滞留板块在东亚大陆板内火山形成过程中起了极为重要的作用。

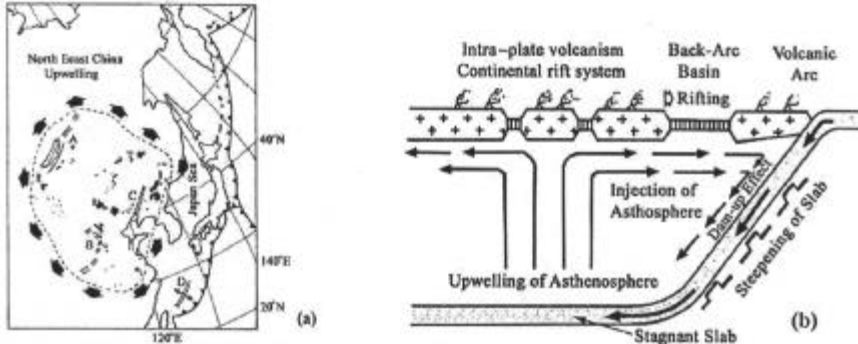


图 3 (a) 西北太平洋至东北亚的地表构造特征 (b) 东北亚上地幔东西向纵剖面示意图

Fig 3 (a) Tectonic features on the surface in Northwest Pacific and Northeast Asia;

(b) A schematic east-west vertical section showing the upper mantle structure beneath northeast Asia

(a) 箭头为水平方向,小黑块为新生代玄武岩,A 代表贝加尔裂谷,B 代表山西地堑,C 代表郯庐断裂带,D 代表冲绳海槽。(b) 俯冲太平洋板块在地幔转换带中滞留,深部脱水和地幔楔内的热物质对流循环过程导致了软流圈中的热物质上涌,从而形成了东北亚的大陆断裂和板内火山

(a) Black patches denote the Cenozoic basalts. A, Baikal rift; B, Shanxi graben; C, Tancheng-Lujiang fault zone; D, Okinawa trough.

(b) The subducting Pacific slab becomes stagnant in the mantle transition zone. The deep dehydration process of the slab and convective circulation process in the mantle wedge cause the upwellings of high-temperature asthenospheric materials, leading to the formation of the continental rift system as well as intraplate volcanoes in northeast Asia

4 结 语

通过对全球地震层析成像和区域层析成像结果的综合分析,本文认为长白山火山不是象夏威夷那样的热点火山,而是与太平洋俯冲板块在地幔转换带中的滞留与深部脱水等过程紧密相关的一种弧后板内火山,可以说和日本、千岛等西太平洋的岛弧火山有着亲缘关系。

在全球三维速度模型中,五大莲池火山之下的上地幔也为低速异常区,其下的地幔转换带中也存在太平洋滞留板块,因此它很有可能与长白山火山有相同的成因。尽管如此,我们还是希望能在五大莲池火山周围建立一些临时数字化地震台站,观测一些远震,像上述探测长白山火山下的深部结构和起源一样,用高分辨率区域层析成像的方法进一步探测五大莲池火山的成因。

参考文献(References):

- [1] Liu Ruoxin(刘若新). Chinese Active Volcanoes [M]. Beijing: Seismological Press, 2000. 11-44 (in Chinese).
- [2] Simkin T, Siebert L. Volcanoes of the World [M]. Washington DC: Geoscience Press, 1994. 111-111 (in Chinese).
- [3] Tang Ji(唐吉), Deng Qianhui(邓前辉), Zhao Guoze(赵国泽), et al. Electric conductivity and magma chamber at the Tianchi volcano area in Changbaishan mountain [J]. Seismology and Geology(地震地质), 2001, 23(2): 191-200 (in Chinese).
- [4] Zhang Chengke(张成科), Zhang Xiankang(张先康), Zhao Jinren(赵金仁), et al. Study on the crustal and upper mantle structure in the Tianchi volcanic region and its adjacent area of Changbaishan [J]. Chinese Journal of Geophysics(地球物理学报), 2002, 45(6): 862-871 (in Chinese).
- [5] Turcotte D, Schubert G. Geodynamics, Applications of Continuum Physics to Geological Problems [M]. New York: John Wiley and Sons Press, 1982. 44-44.
- [6] Zhao D, Lei J. Seismic ray path variations in a 3-D global velocity

- model [J]. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 2004, 141: 153-166.
- [7] Zhao D. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192: 251-265.
- [8] Zhao D, Hasegawa A, Kanamori H. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 22 313-22 329.
- [9] Zhao D, Xu Y, Wiens D, et al. Depth extent of the Lau back-arc spreading center and its relation to subduction processes [J]. *Science*, 1997, 278: 254-257.
- [10] Zhou H. A high-resolution P wave model for the top 1 200 km of the mantle [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 27 791-27 810.
- [11] Bijwaard H, Spakman W, Engdahl E R. Closing the gap between regional and global travel time tomography [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 30 055-30 078.
- [12] Fukao Y, Widiyantoro S, Obayashi M. Stagnant slabs in the upper mantle transition region [J]. *Reviews of Geophysics*, 2001, 39: 291-323.
- [13] Wu F, Hetland E. The Changbaishan, China, PASSCAL experiment [A]. In: 21st Seismic Research Symposium: Technologies for Monitoring the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty [C]. Las Vegas, NV, USA, 1999.
- [14] Ai Y, Zheng T, Xu W, et al. A complex 660 km discontinuity beneath northeast China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 212: 63-71.
- [15] Li X, Yuan X. Receiver functions in northeast China-implications for slab penetration into the lower mantle in northwest Pacific subduction zone [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 216: 679-691.
- [16] Tatsumi Y, Maruyama S, Nohda S. Mechanism of backarc opening in the Japan Sea: Role of asthenospheric injection [J]. *Tectonophysics*, 1990, 181: 299-306.
- [17] Yin A. Mode of Cenozoic east-west extension in Tibet suggesting a common origin of rifts in Asia during the Indo-Asian collision [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 21 745-21 760.
- [18] Wolfe C, Barnason I, VanDecar J, et al. Seismic structure of the Iceland mantle plume [J]. *Nature*, 1997, 385: 245-247.
- [19] Ritter J, Jordan M, Christensen U, et al. A mantle plume below the Eifel volcanic fields, Germany [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 186: 7-14.
- [20] Stein S, Freymueller J. Plate boundary zone [M]. Washington DC: American Geophysical Union, 2002. 1-26.

THE RELATIONSHIP BETWEEN THE ORIGIN OF THE INTRAPLATE CHANGBAI VOLCANO AND THE SUBDUCTING PACIFIC SLAB

LEI Jian-she, ZHAO Da-peng

(Geodynamics Research Center, Ehime University, Matsuyama 790-8577, Japan)

Abstract: We used global seismic tomography and regional tomography to study the deep structure and origin of the Changbai intraplate volcano in Northeast China. Our results reveal a low-velocity anomaly extending to 400 km with a velocity reduction of up to 4%. High velocity anomalies are visible in the mantle transition zone, and deep-focus earthquakes occur at depths down to 600 km under the region, suggesting that the subducting Pacific slab is stagnant in the mantle transition zone under Northeast Asia. These results suggest that the intraplate Changbai volcano is not a hotspot like Hawaii but a kind of back-arc volcano related to the deep subduction and stagnancy of the Pacific slab under Northeast Asia.

Key words: Changbai volcano; Intraplate volcanoes; Subducted slab; Seismic tomography.