科学通报 2011 年 第 56 卷 第 27 期：2328 ~ 2334
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

西藏东部地区层析成像及东南部裂谷成因讨论

张衡, 赵俊猛, 徐强

中国科学院青藏高原研究所, 大陆碰撞与高原隆升重点实验室, 北京 100085
E-mail: zhangheng415@163.com

2011-03-23 收稿, 2011-05-17 接受
国家重点基础研究发展计划(2008CB425704, 2006CB202301)和国家自然科学基金重点项目(40930317)资助

摘要 利用西藏东部南迦巴瓦地区的 51 个临时地震台站所记录的 169 个远震事件, 从中提取出 4767 条 P 波射线, 通过反演计算得到了西藏东部地壳和上地幔的 P 波速度结构. 水平剖面显示, 在西藏东南部裂谷附近从近地表到 250 km 的深度范围均表现为低速异常; 从纵剖面结果看, 这个低速异常非垂直地向下延伸到约 400 km 深度. 综合分析认为, 此低速异常可能意味着地幔高温物质上涌, 从而为该区裂谷成因的探讨提供了地震学的证据; 在此低速异常的东侧出现明显的高速异常, 深度从 40 km 延伸到 200 km, 该高速异常可能是大陆闭合遗留的产物, 并非俯冲的印度板块; 在 250~400 km 的深度范围内, 嘉黎断裂以北为低速异常区, 以南为高速异常区. 该高速异常可能反映了印度板块的北部边界, 并在此发生了拆沉. 同时表明, 在西藏东部印度板块的俯冲未超过嘉黎断裂.

关键词
层析成像
地幔上涌
印度板块俯冲
南北向裂谷
西藏地区

作为世界上平均海拔最高的地区, 青藏高原始终是地球科学研究的热点区域. 自从印度和欧亚板块在约 50 Ma 前碰撞以来[1], 这个地区发生了强烈的构造变形-地壳缩短、岩石圈增厚、高原隆升、喜马拉雅山崛起. 如果说雅鲁藏布、班公-怒江、金沙江等近东西向分布的缝合线是高原形成前特提斯演化的痕迹, 那么分布于藏南的数个南北向构造则为我们提出了挑战, 它们是裂谷, 是地堑[2], 还是深大断裂? 无疑, 这些近南北走向的构造是青藏高原南部最显著的构造活动特征, 但到目前它们的属性仍不清楚, 其形成机制、深浅部构造关系[3]仍是认识青藏高原形成与演化的关键问题.

为研究青藏高原的隆升机制, 在青藏高原上已开展一系列的国际探测研究计划, 如 INDEPTH 计划、Hi-CLIMB 计划和 ANTILOPE 计划等, 这些计划为该区域的深部构造研究提供了许多重要的地震学证据[4~7].

近 20 年来, 随着宽频带地震仪器的大规模使用, 在青藏高原上开展了大量的地震学方面的研究. 面波探测结果认为, 整个青藏高原下方是相对温度较低的岩石圈地幔[8]; 走时成像结果认为, 印度板块向北俯冲穿过了整个青藏高原[9]; 还有学者发现[10,11], 在西藏中部和北部的上地幔中存在较低的 S 波速度异常. Chen 等人[12]则认为由于印度板块俯冲到亚洲板块之下, 从而在西藏大部分地区都产生强烈的径向各向异性. 利用反射地震学方法, Zhang 等人[13,14]提出在 31.5°N 附近的地壳厚度沿东西向有变化, 但是在 29°N 附近的地壳厚度则无明显变化, 并认为印度板块在俯冲过程中由高角度俯冲转变为低角度俯冲.

但这些计划和台站大多集中在西藏高原中部和南部地区, 东部地区的宽频带地震台站很少, 且这些台站多数是沿垂直于印度板块俯冲方向(即南北向)以线性方式架设. 这种线性布台的方式有利于接收函数方法的研究, 而对走时成像的效果并不理想. 本文利用南迦巴瓦地区的宽频流动台阵资料, 得到了西藏东部的地壳与上地幔的速度结构, 为揭示西藏

英文版见: Zhang H, Zhao J M, Xu Q. Seismic P-wave tomography in eastern Tibet: Formation of the rifts. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4577-x

东南部裂谷的成因以及印度板块在此地区的俯冲前缘位置提供了地震学方面的证据.

1 资料与方法

本研究使用 2003~2004 年位于南迦巴瓦地区的 51 台宽频地震仪(图 1)记录的远震 P 波到时数据. 所选地震用下列准则进行严格筛选, 以确保结果的准确性. 具体为: (1) 地震震级大于 5.5 级; (2) 每个 P 波到时需要同时被 5 个以上的台站记录; (3) 震中距严格控制在 30°~90°之间. 研究中全部使用的是 P 波初至数据, 拾取精度大约在 0.1~0.4 s.

本次研究中所使用的全部地震震源信息来自美国地质调查局(United States Geological Survey), 它们的方位如图 2 所示. 可以看出绝大部分地震位于研究区域的东边, 也就是太平洋板块俯冲区, 这也反映在相应的射线分布图上(图 3). 研究区域东部的射线覆盖程度要好于西部, 但整个地区的射线分布效果均较为理想.

在走时成像的方法中, 将实际到时与理论到时相减得到绝对走时残差用于反演计算, 这里我们应用 iasp91 标准模型[15]进行相应的理论走时计算. 近震成像中直接使用绝对走时残差进行计算, 但由于射线路径都位于模型中, 因而对地震定位有较高的要求; 在远震中, 则使用相对走时残差(即对每个台站记录到的绝对走时残差求平均值, 再用每个绝对残差减去这个平均值)进行计算, 该方法的优点是对震源位置精度要求不高, 不用进行重新定位. 由于西藏地区的特殊性—— 巨厚的地壳和 5 km 的平均海拔, 因此需要将这些影响因素考虑到走时校正中; 同时在地壳中, 由于远震射线近垂直入射, 使得反演结果

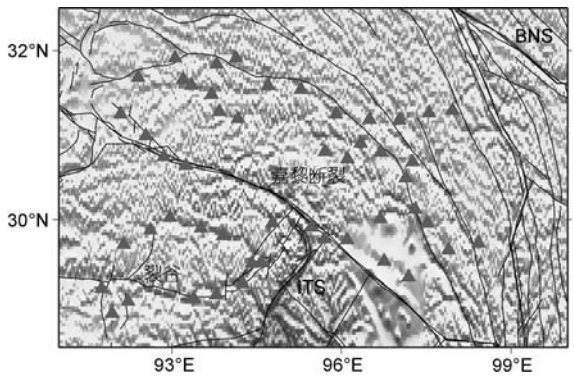

图 1 台站分布及构造示意

三角形代表台站位置; ITS, 雅鲁藏布江缝合带; BNS, 班公怒江缝合带

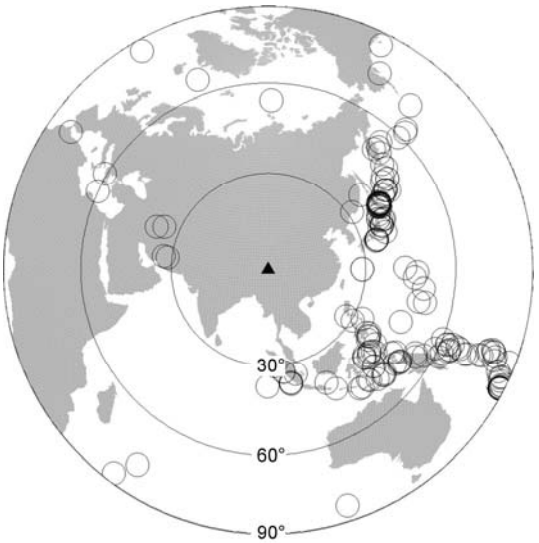

图 2 研究所用地震震中分布

空心圆圈代表地震位置, 实心三角形表示台站中心位置

不是太好, 故而我们使用一种新的校正方法[16]来去除一部分影响.

本次研究采用 Zhao 等人[17]的成像方法, 得到了西藏东南部地区的 P 波速度结构. 通过多次检测板实验, 确定了模型的划分在横向上为 0.5°, 垂向上为 30~50 km, 这样的网格划分可以获得最佳的解析精度. 通过射线追踪, 得到了关于速度扰动的大型稀疏矩阵, 并采用带阻尼系数和光滑系数[18]的 LSQR[19]算法求解该矩阵.

2 结果

检测板实验[20]在这里被用来衡量成像结果的质量(图 4). 从图像上可以看出, 无论是水平剖面(图 4(a))还是按照纬度划分的剖面(图 4(b)), 均有较为理想的分辨还原结果, 只是在水平剖面上的 400 km 处效果不太理想, 原因是 400 km 是我们设置的模型底界面.

水平剖面的反演结果如图 5 所示. 在地壳深度范围内(40~70 km), 可以明显看到以 93°E 为界的高低速异常分布, 低速异常在地表直接对应着该地区裂谷的位置, 且与这些裂谷的走向基本一致. 在 100 km 剖面图上这条高低速异常分界线依然明显, 只是高低速异常的幅度有所减小. 从 150~200 km 剖面上, 近东西向的高低速异常分布特征几乎消失, 转而为近南北向分布, 嘉黎断裂以南主要为低速异常, 以北则主要为高速异常. 从 250 km 直到 400 km 深度剖面

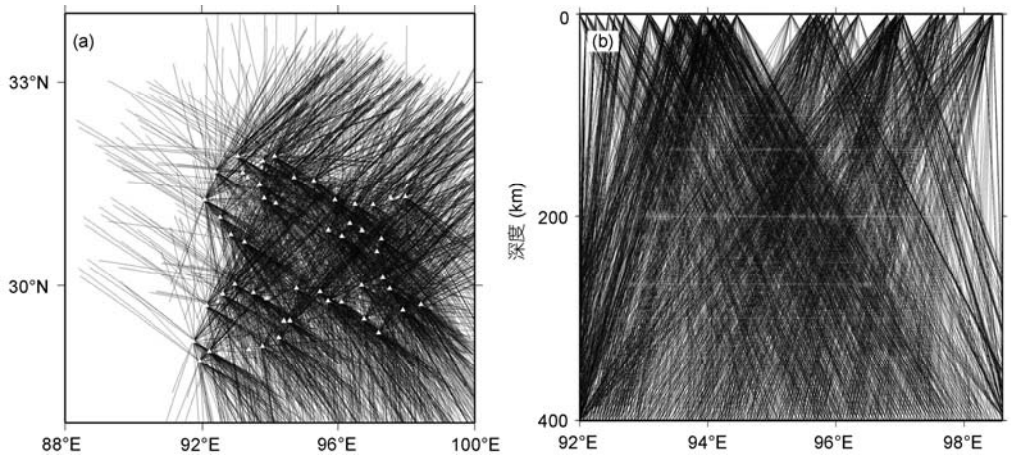

图 3 研究区域射线分布

(a) 水平剖面; (b) 垂向剖面

图 4 水平(a)和纬度(b)剖面检测板实验

(尽管 400 km 剖面位于模型边界处, 但主要地区的分辨率依然较好), 这种以嘉黎断裂为分界线的近南北向分布的高低速异常特征越加明显, 只是嘉黎断裂以南主要呈现出高速异常, 而以北则是低速异常为主.

以分辨率最好的 30°N 剖面(图 4(b))为例, 观察西藏东部地下结构的东西向变化(图 6). 该图像从西至东依次呈现出高-低-高速异常, 92°E 附近的高速异常只存在于 200~400 km 之间; 位于图中部的低速异常从地表一直延伸到 400 km, 且在约 200 km 处开始向东倾斜; 在这条东倾的低速带之上(0~200 km), 呈现出明显的高速异常.

3 分析

图 5 的浅层(40~70 km)速度异常分布与该地区的很多地球物理研究结果类似, 比如 Pn 波成像结果显示[21], 这条明显的低速带大约位于 91°E; 在对中国及周边地区的大范围成像结果中[22], 高原东部的这条低速异常带的位置与我们的结果几乎一致. 上述两项结论均未使用南迦巴瓦台站的数据, 但是在相近的位置同样发现了这样一条低速异常带. 在使用了此地区台站数据后, 全球体波成像结果显示[23], 在 90°E 附近, 雅江以北的位置存在一条由地表至 310 km 的低速异常带; 而面波研究[24,25]也得出了相似结果. 除了这条明显的低速异常带, 在该异常带的

图 5　成像结果水平剖面

东边(0~200 km)呈现出明显的高速异常. 在相同地区的走时成像结果中[26], 印度板块俯冲的前沿位置仅到达 30°N 附近, 且越靠近东边俯冲的距离越短. 利用相同的地震台站数据, Ren 等人[27]使用有限频成像技术也发现了这样的高速异常, 并提出与 Pn 波成像结果[21]类似的解释, 认为在西藏东部地区, 靠近东侧的印度板块俯冲距离更长. 在地壳深度范围内, 与同区或相近区域的地球物理结果相比, 此高速异常均不明显, 甚至是存在明显低速异常(这可能与方法和数据本身的局限有关). 比如, Makovsky 等人[28]通过对人工源地震数据资料进行处理, 认为亚东-谷露裂谷附近的中下地壳之中存在自由水; 使用 Rayleigh 波成像技术和该地区地震资料, Fu 等人[29]在较浅深度(Moho 面深度之上)并未发现此高速异常, 该结论与 Bai 等人[30]和赵国泽等人[31]的大地电磁成果较为吻合, 同时也与 Zhang 等人[13]通过反射地震方法得到的结果比较一致(嘉黎断裂附近出现部分熔融); 在该地区同样利用 Rayleigh 波和 Love 波成像技术(但使用不同的数据), Chen 等人[32]也发现了极低速异常(7%~10%), 从而认为此处满足中下地壳流动的条件. 而在 70~200 km 深度, 本文图像与 Fu 等人[29]都发现了明显高速异常. 关于此高速异常, Kumar 等人[33]以及 Fu 等人[29]等人均认为是亚洲岩石圈的俯冲造成. 对比于一些该地区的其他成像结果, 如 Li 等人[26]在

Burma 和腾冲附近的成像没有在 98°E 以西发现到这样的高速异常; 藏东南地区的龙门断裂附近的走时成像结果[34,35]也并无证据表明亚洲岩石圈直接俯冲到了青藏高原东部. 综上所述, 并且同以往的结果相比[21,22,36], 在这条低速带以西并未发现明显的高速异常, 故而认为这种高速异常并非由现在的印度板块俯冲造成, 而是由于地幔物质上涌, 带动已经下沉的大陆闭合时的物质随之上升产生的. 从 200 km 开始, 嘉黎断裂以南表现出的明显高速异常(图 5), 以北则表现出明显的低速异常. 由此认为, 印度板块的俯冲没有越过嘉黎断裂, 而是在喜马拉雅地体下方产生了拆沉. 另外, 虽然在 100 km 以上不能以明显的速度异常分界线确定嘉黎断裂, 但是从 150 km 处开始, 以嘉黎断裂为界, 速度结构呈现出明显的南北向趋势. 关于产生这种现象的原因, 还需要进一步的研究.

利用接收函数方法, Singh 等人[37]发现了该地区的明显低速异常是由于拆沉至 410 km 间断面之下的高速物质(印度岩石圈地幔)所引起的. 尽管我们认为造成该地区裂谷的主要原因是地幔物质上涌, 但是从图 6 来看, 这种上涌的趋势并非是简单的垂向上涌, 而是呈现出一种向东倾斜的态势. 这种倾斜的上涌模式在冰岛、夏威夷、贝加尔等地都被发现过[36], 虽然这个地区的裂谷范围不如贝加尔裂谷明显, 相关的研究也很少, 但是从检测板实验(图 4(b))的结果来看, 这个剖面的还原度非常好; 除此之外, 通过计算机模拟, 得出地幔的流动会使地幔柱产生倾斜[38], 而青藏高原的地幔物质具有向东流动的趋势[4]; 并且通过 P 波速度与 S 波速度比值的比较, 其结果指出这里的低速物质并非是简单的由于地幔的温度升高而引起[27]. 综上所述, 认为这种倾斜的地幔上涌是存在的.

在这条低速带的西边(94°E 以西), 有一处由 100 km 深度延伸至 400 km 的高速异常体. 虽然靠近成像边界处会有一定的边界效应, 但是总体位置(92°~94°E)的还原度还是可信的. 从该高速体的位置, 以及与 INDEPTH 计划的一些结果相比较[5], 将这个高速块体解释为俯冲的印度板块, 并认为可能是由于俯冲而导致了临近区域的地幔柱上涌.

图 6 30°N 剖面

本次研究中, 由于流动地震台站的位置限制, 仅能得出西藏东南部裂谷的地下结构, 而该地区的裂谷成因能否推广到整个西藏南部的南北向裂谷, 还有待于进一步的研究. 为了能更深入地研究这些裂谷的成因和地下结构, 尚需布设更多的地震流动台站.

4 结论

本次研究使用了西藏东部南迦巴瓦地区流动地震台站的数据, 通过远震层析成像方法得到了该地区地壳与上地幔的速度结构. 在深度 100 km 以上, 该地区的速度结构呈现出明显的东西向分布特征; 在 150~400 km 的范围, 这种速度异常的分布由近东西向转变为近南北向, 且以嘉黎断裂为界. 研究认为, 印度板块俯冲至喜马拉雅地体下发生了拆沉, 深度大约在 200~350 km 之间, 俯冲前缘并未超过嘉黎断裂. 出现在 92°E 附近的低速异常(其强弱达到 2%)是地幔物质的倾斜上涌造成的, 这也是地表裂谷的主要原因; 而产生这种倾斜上涌则是由于地幔物质的横向流动造成的.

致谢 文中所使用原始数据来自南迦巴瓦地区临时地震台站, 并通过 IRIS 数据中心下载. 感谢日本东北大学赵大鹏教授提供的 Tomog3d 程序.

参考文献

1 Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. Annu Rev Earth Planet Sci, 2000, 28: 211–280
2 吴中海, 张永双, 胡道功, 等. 西藏错那-拿日雍错地堑的第四纪正断层作用及其形成机制探讨. 第四纪研究, 2008, 28: 232–242
3 Jimenez-Munt I, Platt J P. Influence of mantle dynamics on the topographic evolution of the Tibetan Plateau: Results from numerical modeling. Tectonics, 2006, 25, doi:10.1029/2006TC001963
4 Zhao J M, Yuan X H, Liu H B, et al. The boundary between the Indian and Asian tectonic plates below Tibet. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, 107: 11229–11233
5 Tilmann F, Ni J, Team I I S. Seismic imaging of the downwelling Indian lithosphere beneath central Tibet. Science, 2003, 300: 1424–1427
6 Nabelek J, Hetenyi G, Vergne J, et al. Underplating in the Himalaya-Tibet Collision Zone Revealed by the Hi-CLIMB Experiment. Science, 2009, 325: 1371–1374
7 苏伟, 王椿镛, 黄忠贤. 青藏高原及邻区的 Rayleigh 面波的方位各向异性. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38: 674–682
8 Priestley K, Debayle E, McKenzie D, et al. Upper mantle structure of eastern Asia from multimode surface waveform tomography. J Geophys Res, 2006, 111, doi:10.1029/2005JB004082
9 Zhou H W, Murphy M A. Tornographic evidence for wholesale underthrusting of India beneath the entire Tibetan plateau. J Asian Earth Sci, 2005, 25: 445–457
10 Rapine R, Tilmann F, West M, et al. Crustal structure of northern and southern Tibet from surface wave dispersion analysis. J Geophys Res, 2003, 108, doi:10.1029/2001JB000445
11 Lebedev S, van der Hilst R D. Global upper-mantle tomography with the automated multimode inversion of surface and S-wave forms. Geophys J Int, 2008, 173: 505–518
12 Chen Y, Badal J, Zhang Z J. Radial anisotropy in the crust and upper mantle beneath the Qinghai-Tibet Plateau and surrounding regions. J Asian Earth Sci, 2009, 36: 289–302
13 Zhang Z J, Klemperer S. Crustal structure of the Tethyan Himalaya, southern Tibet: New constraints from old wide-angle seismic data. Geophys J Int, 2010, 181: 1247–1260
14 Zhang Z J, Klemperer S L. West-east variation in crustal thickness in northern Lhasa block, central Tibet, from deep seismic sounding data. J Geophys Res, 2005, 110, doi:10.1029/2004JB003139
15 Kennett B L N, Engdahl E R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification. Geophys J Int, 1991, 105: 429–465
16 江国明, 赵大鹏, 张贵宾. 远震层析成像中的地壳校正研究及应用. 地球物理学报, 2009, 52: 1508–1514
17 Zhao D P, Hasegawa A, Horiuchi S. Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events. J Geophys Res, 1994, 99: 22313–22329
18 Paige C C, Saunders M A. LSQR: An Algorithm for Sparse Linear-Equations and Sparse Least-Squares. ACM Trans Math Softw, 1982, 8: 43–71
19 Zhao D. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes. Earth Planet Sci Lett, 2001, 192: 251–265
20 Humphreys E, Clayton R W. Adaptation of back projection tomography to seismic travel time problems. J Geophys Res, 1988, 93: 1073–1085
21 Liang C T, Song X D. A low velocity belt beneath northern and eastern Tibetan Plateau from Pn tomography. Geophys Res Lett, 2006, 33, doi:10.1029/2006GL027926
22 Huang J L, Zhao D P. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. J Geophys Res, 2006, 111, doi:10.1029/2005JB004066
23 周华伟, Murphy M A, 林清良. 西藏及其周围地区地壳、地幔地震层析成像——印度板块大规模俯冲于西藏高原之下的证据. 地学前缘, 2002, 9: 285–292
24 孙若昧, 张中杰, 滕吉文. 青藏高原物质侧向流动的讨论——面波层析成像的证据. 见: 张中杰, 高锐, 吕庆田, 等, 编. 中国大陆地球深部结构与动力学研究. 北京: 科学出版社, 2004. 872–880
25 张雪梅, 孙若昧, 滕吉文. 青藏高原及其邻区地壳、岩石圈和软流层厚度研究. 科学通报, 2007, 52: 332–338
26 Li C, Van der Hilst R D, Meltzer A S, et al. Subduction of the Indian lithosphere beneath the Tibetan Plateau and Burma. Earth Planet Sci Lett, 2008, 274: 157–168
27 Ren Y, Shen Y. Finite frequency tomography in southeastern Tibet: Evidence for the causal relationship between mantle lithosphere delamination and the north-south trending rats. J Geophys Res, 2008, 113, doi:10.1029/2008JB005615
28 Makovsky Y, Klemperer S L. Measuring the seismic properties of Tibetan bright spats: Evidence for free aqueous fluids in the Tibetan middle crust. J Geophys Res, 1999, 104: 10795–10825

29 Fu Y Y V, Li A B, Chen Y J. Crustal and upper mantle structure of southeast Tibet from Rayleigh wave tomography. J Geophys Res, 2010, 115, doi:10.1029/2009JB007160
30 Bai D H, Unsworth M J, Meju M A, et al. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging. Nat Geosci, 2010, 3: 358–362
31 赵国泽, 陈小斌, 王立凤, 等. 青藏高原东边缘地壳"管流"层的电磁探测证据. 科学通报, 2008, 53: 345–350
32 Chen Y, Badal J, Hu J F. Love and Rayleigh wave tomography of the Qinghai-Tibet Plateau and surrounding areas. Pure Appl Geophys, 2010, 167: 1171–1203
33 Kumar P, Yuan X H, Kind R, et al. Imaging the colliding Indian and Asian lithospheric plates beneath Tibet. J Geophys Res, 2006, 111, doi:10.1029/2008JB005615
34 韦伟, 孙若昧, 石耀霖. 青藏高原东南缘地震层析成像及汶川地震成因探讨. 中国科学: 地球科学, 2010, 40: 831–839
35 李志伟, 胥颐, 黄润秋. 龙门山地区的 P 波速度结构与汶川地震的深部构造特征. 中国科学: 地球科学, 2011, 41: 283–290
36 Zhao D P. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: Insight into deep Earth dynamics. Phys Earth Planet Inter, 2004, 146: 3–34
37 Singh A, Kumar M R. Seismic signatures of detached lithospheric fragments in the mantle beneath eastern Himalaya and southern Tibet. Earth Planet Sci Lett, 2009, 288: 279–290
38 Steinberger B. Plumes in a convecting mantle: Models and observations for individual hotspots. J Geophys Res, 2000, 105: 11127–11152