

地震 Pn 断层扫描研究回顾

Contents

摘要 2

引言 2

地震首波走时..... 2

 1. 常速平层 Pn 波的走时 2

 2. 非常速非平层 Pn 波的走时 2

 3. 球状地球和地幔顶部速度梯度对 Pn 波的走时的影响..... 3

数据清理和背景理论..... 4

 1) 震源项 4

 2) 地震台的地壳结构..... 4

应用和结果分析..... 4

 1) 西藏地震重新定位..... 5

 2) 西藏上地幔顶部速度梯度..... 5

 3) 西藏 Pn 波速分布 5

讨论 5

结论 6

致谢 6

参考文献 7

图 12

 图 1， 二维地球结构..... 12

 图 2： 有限差分方法合成地震图..... 13

 图 3： 西藏地震深度为重新定位..... 14

 图 4： 西藏地震起始时间误差..... 15

 图 5： 上地幔顶部速度梯度校正..... 16

 图 6： 西藏 Pn 波速分布图 17

摘要

引言

Mohorovičić【1】研究 1909 十月八日发生萨格勒布东南 39 公里处的地震，发现了 Pn 波和莫和。Muskat [2] (1933) 发现 Pn 波走时 和距离的线性关系。Pn 波理论则有 Jeffreys [3][4] 奠定。傅承义先生[5](1944)加州理工学院的博士论文给出了首波入射角的数学证明，基于波动方程的特征和解。

区域地震， 300-1600 公里，Pn 波最先到达，所以其走时是区域结构的不可多得的资料。Pn 波速的研究一直很活跃，一是区域结构和 Pn 波的频谱在核监测的应用；二是地震定位和地震预警都需要更精确的区域的构造；三，Pn 波速度可提供地球动力学的直接证据，如西藏地区， 美西的盆地和山脊地区。

近四十年来，计算机的应用，数字化台网，分析方法的发展，如断层扫描，为发展 Pn 波速度的全球模型成为可能。如 Humpheys 等 (1984) 【6】用断层扫描研究南加州地幔结；Hearn (1985) 【7】用南加州台网 (200 台) Pn 和 Pg 走时研究地壳结构；赵 (1993)[8] 美西的盆地和山脊地区的 Pn 波速分布；赵和谢(1993)[9] 研究西藏地区 Pn 波速分布.和 Myers 等 (2010) 【10】发展的欧亚和北美区域地震走时模型 (RSTT)。

由于 Pn 波速和断层扫描的研究文章很多，本文不一一赘述全球每个区域结构的研究，而以西藏地区为例，探讨 Pn 走时修正和结果分析作一回顾。

地震首波走时

1. 常速平层 Pn 波的走时

当地球结构为常速平层时，地震首波又 Pn 波的走时可写为：

$$t = \sum_{i=1}^{i=s} \eta_i h_i + \sum_{i=1}^{i=r} \eta_i h_i + p * x \quad (1)$$

其中 x 为震中距, p 射线参数，首波的射线参数为地幔顶部速度的倒数； h_i 为第 i 层的厚度；

$\eta_i = \sqrt{\frac{1}{v_i^2} - p^2}$, v_i 为第 i 层的速度。1980 年前后的 Pn 波速度的研究大都用这个公式。

2. 非常速非平层 Pn 波的走时

当地球结构速度不是常速时，公式 (1) 不再适用。实践上大都用公式：

$$t = \sum_{i=1}^{i=s} \eta_i h_i + \sum_{i=1}^{i=r} \eta_i h_i + \gamma + \int S dl \quad (2)$$

其中 γ 为地幔顶部速度不均匀的贡献， $\int S dl$ 中的 S 地幔顶部速度的倒数。后来的 Pn 波速 Tomography 断层扫描大都用公式 (2)。

该公式只是一个经验公式。Zhao 1993 【8】 用有限差分方法模拟图 1 的结构，得到图 2 的合成地震图。公式 (2) 的走时和的合成地震图的走时在地壳厚度变化激烈的地方有 0.3 秒的不同，

波动方程在结构如图 1 没有解析解。由于有限元和有限差分对计算的要求，用到实际问题尚有困难 (Zhao, 1985 【11】)。Zhao & Harkrider 【12】 (1992) 给出球型空腔中偏心核爆的解析解。

3. 球状地球和地幔顶部速度梯度对 Pn 波的走时的影响

当为震中距大于 500 公里时，我们应该考虑到地球的球状和地幔顶部速度梯度对 Pn 波的走时的影响。如果地幔顶部速度为 v_0 ，速度梯度为 c ，地幔速度分布为：

$$v = v_0(1 + c * z)$$

其中 z 为深度。由于地球的球状，我们观察到的 Pn 波速 【8, 9】：

$$v_{\text{观察}} = v_0 \left(1 + \frac{c^2 X^2}{24} \right) \quad (3)$$

其中 X 为 Pn 在地幔中走的距离。

Myers 等 【10】 把该公式用在断层扫描上，以得到上地幔速度梯度。他们的断层扫描公式：

$$\begin{bmatrix} x_1^1 & \dots & x_N^1 & -\frac{x_1^1(X_m)^3}{24V_oX_m} & \dots & -\frac{x_N^1(X_m)^3}{24V_oX_m} & \sum_{p=1}^Q \frac{l_{1p}^1}{v_{1p}} & \dots & \sum_{p=1}^Q \frac{l_{Np}^1}{v_{Np}} \\ \vdots & & & & \ddots & & & & \vdots \\ x_1^K & \dots & x_N^K & -\frac{x_1^K(X_m)^3}{24V_oX_m} & \dots & -\frac{x_N^K(X_m)^3}{24V_oX_m} & \sum_{p=1}^Q \frac{l_{1p}^K}{v_{1p}} & \dots & \sum_{p=1}^Q \frac{l_{Np}^K}{v_{Np}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_N \\ c_1^2 \\ \vdots \\ c_N^2 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^1 \\ \vdots \\ t^K \\ \text{Regularization} \end{bmatrix} \quad (4)$$

他们用 600,000 条 Pn 走时, 得到了区域地震走时 (RSTT, regional seismic travel time) 模型, 地区包括欧亚和北美。RSTT 软件包 (地球模型和计算走时) 在核监测有广泛的应用【13, 14, 15】。USGS 地震定位加入了 RSTT 模型【16】。

一维地球模型的地震 P 波 (走时 残差约 1 秒) 定出的位置给出的 Pn 走时残差约 5 秒【17】。而 2.5 维 RSTT 地球模型, Pn 走时 残差降到约 1 秒。所以, 近几年来, 全球的学者们在推进资料共享和改进 RSTT 地球模型上做了很大的努力。如 CTBTO(Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization) 在 2017, 11 月 13 日组织了一次训练课程 (<https://ctnw.ctbto.org/DMZ/event/3800>), 目的之一为学习使用 RSTT 以得到更好的区域地震定位和资料共享。

Begnaud[18]为提高地震定位的精度, 搜集了 113000 地震或核爆, 11 000 地震台的, 12, 000, 000 P, Pn 走时, 研究三位地球结构。

数据清理和背景理论

由于观测的 Pn 波的走时有来自源和地震台的地壳结构的贡献, 即公式 (2) 的第 1, 2 项。

1) 震源项

Pn 波走时对震源的深度的精确度要求很高。源深度和地壳结构可通过区域地震研究得到相对可靠的结果【17, 19, 20, 21, 22】。模拟远震 P 波波型 (P, pP, sP 震相) 可得到相对可靠源深度[17, 22]. Zhao & Helmberger【17】曾用模拟 P 波波型得西藏 (1964-1984) 地震的深度, 比 ISC 的深度平均浅 25 公里, 图 3。

2) 地震台的地壳结构

地震台的地壳结构同样通过区域地震研究得到相对可靠的结果【21】。我发展的 VFSA 方法可得到地震台的平层地壳结构【23, 24】。由于计算速度的限制, 我【23】当时在算法中用 9 条贡献最大的广义射线。近来 Chong 等[25], Agrawal 等[26], 提出的联合反演接受函数和雷利波。Chong 等 (2017)【27】使用接受函数的 HV 比。使用地震测线(reflection seismology)[28](Wang 2013), 地震测声 (deep seismic sounding) 可得到比较好的地壳结构【29】(Li 2006)。

应用和结果分析

我曾上述的讨论用于研究西藏 [9] 和美国西部盆地和山脊[8]的 Pn 波结构。

1) 西藏地震重新定位

[9] 用的图 3 中的 44 地震, 用 P, pP, sP 重新定位[17]。它们的深度和起始时间都有变化, 图 4. 新的深度比 ISC 的深度平均浅 25 公里。单从深度的结果, 我们知道在此之前得到的西藏的 Pn 波速度偏高。

2) 西藏上地幔顶部速度梯度

用最小二乘法, 拟合公式 (3) 得到西藏上地幔顶部速度梯度 $4.4 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$, 包括地球的球状的贡献, 图 5.

3) 西藏 Pn 波速分布

图 6 给出西藏 Pn 波速分布【9】。平均速度为 7.93 公里/秒, 比之前的结果小 5%。Wang 等【28】(2013) 报道塔里木盆地到四川盆地 7.9-8.0 公里/秒, 使用地震测线。Li 等【30】(2012) 的 Pn 走时断层扫描得到东藏到龙门山断裂带西小于 7.8 公里/秒, 他们的方法可减小震中和起始时间的错误对结果的影响。

讨论

好的模型来自于好的数据。在反演之前, 对资料进行校正。在可能的情况下, 对所用的地震和核爆做重新定位, 对所用的地震台做走时校正。我和谢家康博士【9】没有对地震台做走时校正。Ritzwoller 等(2002)【31】, Bueller 和 Shearer(2010)[32]做了对源和地震台校正。

另一方法是用区域地震波形拟合【21】和反演[33,34]同时定位地震和地震台的地壳结构。该方法的弱点是 1) 结构为均匀平层; 2) 两端地壳结构贡献较小, 得到结构来自于整个途径。地震波形反演的挑战为计算速度, 和结果收敛局部极小。

高密度台网【35, 36, 37】为地壳结构研究提供了丰富的资料, 和较好的结果。临时台网【38】mooney 1998, 高密度台阵【39】liu, 2017 针对性研究结果会更精确。

接收函数得到的地震台的地壳结构的误差较大【23】, 例如, AMDO, 地壳厚度 65-80 公里, 下地壳 P 波速度 6.5 ± 0.7 , 下地壳 6.15 ± 0.3 。【24】对分辨率进行了研究, 下地壳的 P 波速度的误差分布的底是较平, 分辨率低; 低信噪比的资料对下地壳的 P 波速度和厚度分辨率很低。原因为接收函数用远震 P 波, 地壳 P 波速度变化对结构的影响约为厚度的 1/3。Sun 等【37】用一条线上多个台的接收函数提高分辨率。近来接收函数被用在西藏地壳结构的研究上【37, 40, 41, 42, 2014-2017 有一百篇以上英文文章】。

用 P, pP, sP 波形做地震重新定位, 的偏差源于结构的已知, 和接收函数正好向反。

数字高密度台网使得收集资料变的容易。由于数据量大, 我们对我们用的资料往往没有足够的了解, 所以校正是必要的。好的结果来自于对所研究问题的理解和对资料的理解。

如 Gutenberg 发现核幔界面【43】，1913 年 1800 英里，比 100 年后的 1796 英里多 4 英里。

结论

致谢

感谢著名地球物理学者李幼铭先生的邀请，为他的八十寿辰纪念专刊写一篇文章。我很荣幸。作为李幼铭先生的好友，早年曾受惠于李幼铭先生的教导和帮助，我义不容辞。由于离开地球物理研究有二十余年，有点心虚，怕浪费李幼铭先生纪念专刊的纸张。花了几个星期的研究，发现地球物理学并没有忘记我。2014-2018 一月，我的第一作者的文章引用次数：1994 定震源的文章【19】147；1996 的结受函数【24】20；1993 的西藏 Pn 波断层扫描【9】11，1993 美西盆地和山脊 Pn 波断层扫描【8】6，1991 西藏地震定位【17】3，1993 大西洋上地幔结构（本文没引）3，1991 宽频地震图模拟【21】2，【20】1。于是，本文题在 Pn 波断层扫描，着点于西藏和结受函数，因为引用集中在【8，9】Pn 波断层扫描和的结受函数【23，24】。

参考文献

- [1] A. Mohorovičić (1910). "Epicenters of earthquakes in Croatia and Slavonia (Epicentra potresa u Hrvatskoj i Slavoniji)". Yearly report of the Zagreb meteorological observatory for the year 1909.
- [2] morris Masket, The Theory of Refraction Shooting, Journal of Applied Physics 4, 14-18(1933)
- [3] H. Jeffreys, On compressional waves in two superposed layers, Proc. Cambridge Philos. Soc. vol. 23 (1926) pp. 472-481.
- [4] H. Jeffreys, The formation of Love waves (Querwellen) in a two-layer crust, Gerlands Beitrage zur Geophysik vol. 30 (1931) pp. 336-350.
- [5] Fu, Cheng Yi, 1944, Studies on seismic waves, Ph.D Thesis, California Institute of Technology, https://thesis.library.caltech.edu/7326/1/Fu_cy_1944.pdf
- 【6】 Eugene Humphreys, Robert W. Clayton and Bradford H. Hager, A TOMOGRAPHIC IMAGE OF MANTLE STRUCTURE BENEATH SOUTHERN CALIFORNIA, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 11, NO. 7, PAGES 625-627, JULY 1984
- 【7】 Thomas Martin Hearn, 1985, CRUSTAL STRUCTURE IN SOUTHERN CALIFORNIA FROM ARRAY DATA, Ph. D Thesis, California Institute of Technology, https://thesis.library.caltech.edu/7982/2/Hearn_tm_1985.pdf.
- 【8】 LS Zhao Lateral variations and azimuthal isotropy of Pn velocities beneath Basin and Range province; J.Geophys.Res.,SolidEarth, Vol 98, B12, 22,109-22,122, 1993;
- 【9】 Lian-She Zhao and Jiakang Xie, Lateral variations in compressional velocities beneath the Tibetan Plateau from Pn travelttime tomography, Geophys. J. Int. Vol 115, 1070-1084, 1993;
- 【10】 Stephen C. Myers, Michael L. Begnaud, Sanford Ballard Michael E. Pasyanos W. Scott Phillips Abelardo L. Ramirez Michael S. Antolik Kevin D. Hutchenson John J. Dwyer Charlotte A. Rowe Gregory S. Wagner A Crust and Upper-Mantle Model of Eurasia and North Africa for Pn Travel-Time Calculation Bulletin of the Seismological Society of America (2010) 100 (2): 640-656.
- 【11】 赵连社, 弯曲界面 SH 波散射, 1985, 中国科学院地球物理研究所硕士论文;

【12】 LS Zhao, DG Harkrider Wave fields from an off-center explosion in an embedded solid sphere, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 82, No. 4, pp. 1927-1955, 1992

【13】 Stephen C. Myers, Michael L. Begnaud, Sanford Ballard, Abelardo L. Ramirez, W. Scott Phillips, Michael E. Pasyanos, Harley Benz, Raymond P. Buland; REGIONAL SEISMIC TRAVEL TIME MODEL FOR NORTH AMERICA; 2010 Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies, 308-317;

【14】 Stephen C. Myers, Michael L. Begnaud, Sanford Ballard, W. Scott Phillips, and Michael E. Pasyanos, EXTENDING REGIONAL SEISMIC TRAVEL TIME (RSTT) TOMOGRAPHY TO NEW REGIONS, 2011 Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies, 342-351;

【15】 石建芳 许进 王娟 张波 崔甲甲 李健 邱宏茂 基于三维地球模型和地震层析成像区域地震走时校正方法研究《核电子学与探测技术》2013 年 第 3 期 354-358

【16】 John M. Patton, Michelle R. Guy, Harley M. Benz, Raymond P. Buland, Brian K. Erickson, and David S. Kragness, Hydra—The National Earthquake Information Center’s 24/7 Seismic Monitoring, Analysis, Catalog Production, Quality Analysis, and Special Studies Tool Suite, Open-File Report 2016–1128, <https://pubs.usgs.gov/of/2016/1128/ofr20161128.pdf>, 2016

【17】 LS Zhao, DV Helmberger, Geophysical implications from relocations of Tibetan earthquakes; hot lithosphere, Geophys. Res. Lett., Vol. 18, No. 12, 2205-2208, 1991;

【18】 Michael Begnaud, Sandy Ballard, Ilim Hipp, Chris Young, Marcus Chang, Andre Encarnacao, Ben Lawry, Scott Phillips, Charlotte Rowe, A Global 3D Seismic Velocity Model for Improving Location Accuracy, <http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-11-02263>, 2011

【19】 LS Zhao, DV Helmberger, Source estimation from broadband regional seismograms; Bulletin of Seismological Society of America, Vol 84, No. 1, PP. 91-104, 1994;

【20】 LS Zhao, DV Helmberger Source retrieval from broadband regional seismograms: Hindu Kush region; Physics of the earth and planetary interiors, Volume 78, Issues 1–2, June 1993, Pages 69-95

【21】. LS Zhao, DV Helmberger , Broadband modelling along a regional shield path, Harvard recording of the Saguenay earthquake, Geophys. J.Int. Vol 105, 301-312, 1991;

[22] Risheng Chu, Lupei Zhu, and Don V. Helmberger, Determination of earthquake focal depths and source time functions in central Asia using teleseismic P waveforms, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 36, L17317, 2009;

【23】 LS Zhao, C Frohlich Teleseismic body waveforms and receiver structures beneath seismic stations; Geophys. J. Int. (1996) 124,525-540

【24】 Lian-She Zhao, Mrinal K. Sen, Paul Stoffa and Cliff Frohlich, Application of very fast simulated annealing to the determination of the crustal structure beneath Tibet, Geophys. J. int. (1996) 125, 355-370

[25]Jiajun Chong, Sidao Ni, Risheng Chu, and Paul Somerville, Joint Inversion of Body-Wave Receiver Function and Rayleigh-Wave Ellipticity, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 2, pp. 537–551, April 2016, doi: 10.1785/0120150075

[26] Mohit Agrawal, Jay Pulliam,1 Mrinal K. Sen, Utpal Dutta, Michael E. Pasyanos and Robert Mellors, Crustal and uppermost mantle structure in the Middle East: assessing constraints provided by jointly modelling Ps and Sp receiver functions and Rayleigh wave group velocity dispersion curves, Geophys. J. Int. (2015) 201, 783–810

【27】 J. Chong, R. Chu, S. Ni, Q. Meng and A. Guo: Receiver function HV ratio: a new measurement for reducing nonuniqueness of receiver function waveform inversion, Geophys. J. Int ,VOL. 212 NO. 2 FEBRUARY 2018 1475-1485, 2017

【28】 Youxue Wang , Walter D. Mooney, *, Xuecheng Yuan , Nihal Okaya Crustal Structure of the Northeastern Tibetan Plateau from the Southern Tarim Basin to the Sichuan Basin, China; Tectonophysics 584 (2013) 191–208;

[29] Songlin Li, Walter D. Mooney , Jichang Fan, Crustal structure of mainland China from deep seismic sounding data, Tectonophysics 420 (2006) 239–252

【30】 Zhiwei Li , Sidao Ni a,n , Tianyao Hao b , Yi Xu b , Steven Roecker c, Uppermost mantle structure of the eastern margin of the Tibetan plateau from interstation Pn travelttime difference tomography, Earth and Planetary Science Letters, Volumes 335–336, 15 June 2012, Pages 195-205;

【31】 Michael H. Ritzwoller, Mikhail P. Barmin, Antonio Villasenor, Anatoli L. Levshin, E. Robert Engdahl, Pn and Sn tomography across Eurasia to improve regional seismic event locations, *Tectonophysics* 358 (2002) 39 – 55;

【32】 JS Buehler, Shearer, P M, Pn Tomography of the western United States using USArray, *J. of Geophys. Res, Solid Earth*, Vol 115, issue B9, Sep. 2010, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009JB006874/full>;

【33】 LI Shao-Hua,, WANG Yan-Bin,, LIANG Zi-Bin,, HE Shao-Lin, ZENG Wen-Hao, Crustal Structure in Southeastern Gansu from Regional Seismic Waveform Inversion, *地球物理学报*, Volume 55, Issue 2, March 2012 , Pages 206–218;

[34] Yanyang Chen, Yanbin Wang , Yuansheng Zhang, Crustal velocity structure of central Gansu Province from regional seismic waveform inversion using firework algorithm, *Earthquake Science*, April 2017, Volume 30, Issue 2, pp 81–89

【35】 江为为, 姜迪迪, 胥颐, 郝天珧, 胡卫剑, 余景锋, 南北构造带及邻域地壳、岩石层速度结构特征研究, *地球物理学报*, Vol. 57, No. 12, 3945-3956

【36】 Zhen Guo, Y. John Chen, Jieyuan Ning, Yongge Feng, Stephen P. Grand, Fenglin Niu, Hitoshi Kawakatsu, Satoru Tanaka, Masayuki Obayashi, James Ni, High resolution 3-D crustal structure beneath NE China from joint inversion of ambient noise and receiver functions using NECESSArray data *Earth and Planetary Science Letters* 416 (2015) 1–11

【37】 Sun, X., X. Bao, M. Xu, D. W. Eaton, X. Song, L. Wang, Z. Ding, N. Mi, D. Yu, and H. Li (2014), Crustal structure beneath SE Tibet from joint analysis of receiver functions and Rayleigh wave dispersion, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1479–1484

【38】 Walter D. Mooney, Crustal Structure of China and Adjacent Areas: A Final Report of the Detailed Compilation of Data and Results, <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/234599.pdf>, 1998

【39】 Zhen Liu, Xiaobo Tian *, Rui Gao, Gaochun Wang, Zhenbo Wu, Beibei Zhou, Ping Tan, Shitan Nie a, Guiping Yu, Gaohua Zhu, Xiao Xu , New images of the crustal structure beneath eastern Tibet from a high-density seismic array, *Earth and Planetary Science Letters* 480 (2017) 33–41, 2017

【40】 Singh, A., Ravi Kumar, M., Mohanty, D. D., Singh, C., Biswas, R., & Srinagesh, D. (2017). Crustal structure beneath India and Tibet: New constraints from inversion of receiver functions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 7839–7859. <https://doi.org/10.1002/2017JB013946>

【41】 Lili Xu, Stéphane Rondenay, Robert D.van der Hilst, Structure of the crust beneath the southeastern Tibetan Plateau from teleseismic receiver functions

Physics of the Earth and Planetary Interiors

Volume 165, Issues 3–4, 14 December 2007, Pages 176-193

【42】 Danian Shi a,*, Wenjin Zhao b, Simon L. Klemperer c, Zhenhan Wu b, James Mechie d, Jianyu Shi a, Guangqi Xue a, Heping Su a, West–east transition from underplating to steep subduction in the India–Tibet collision zone revealed by receiver-function profiles, *Earth and Planetary Science Letters* 452 (2016) 171–177;

【43】 Heuberger, Brian. "What Is the Gutenberg Discontinuity?" *Sciencing*, <http://sciencing.com/gutenberg-discontinuity-8747365.html>. 25 April 2017.

图

图 1，二维地球结构

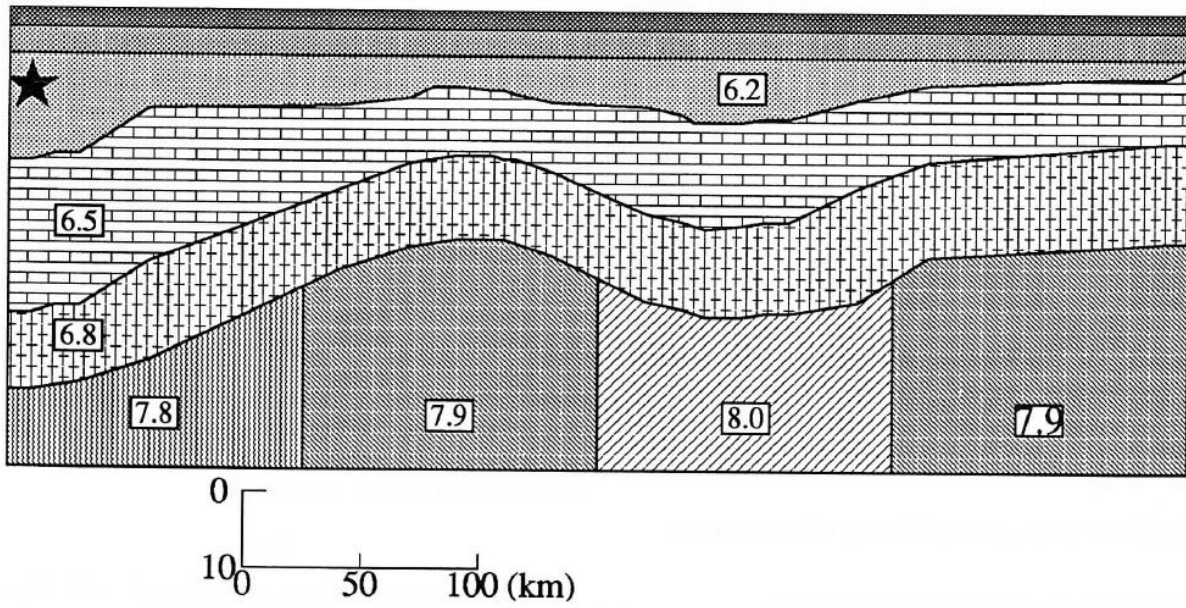


图 1：地表层的速度 5.2km/sec, 下面为 6.0km/sec. 五角星是震源。

图 2：有限差分方法合成地震图

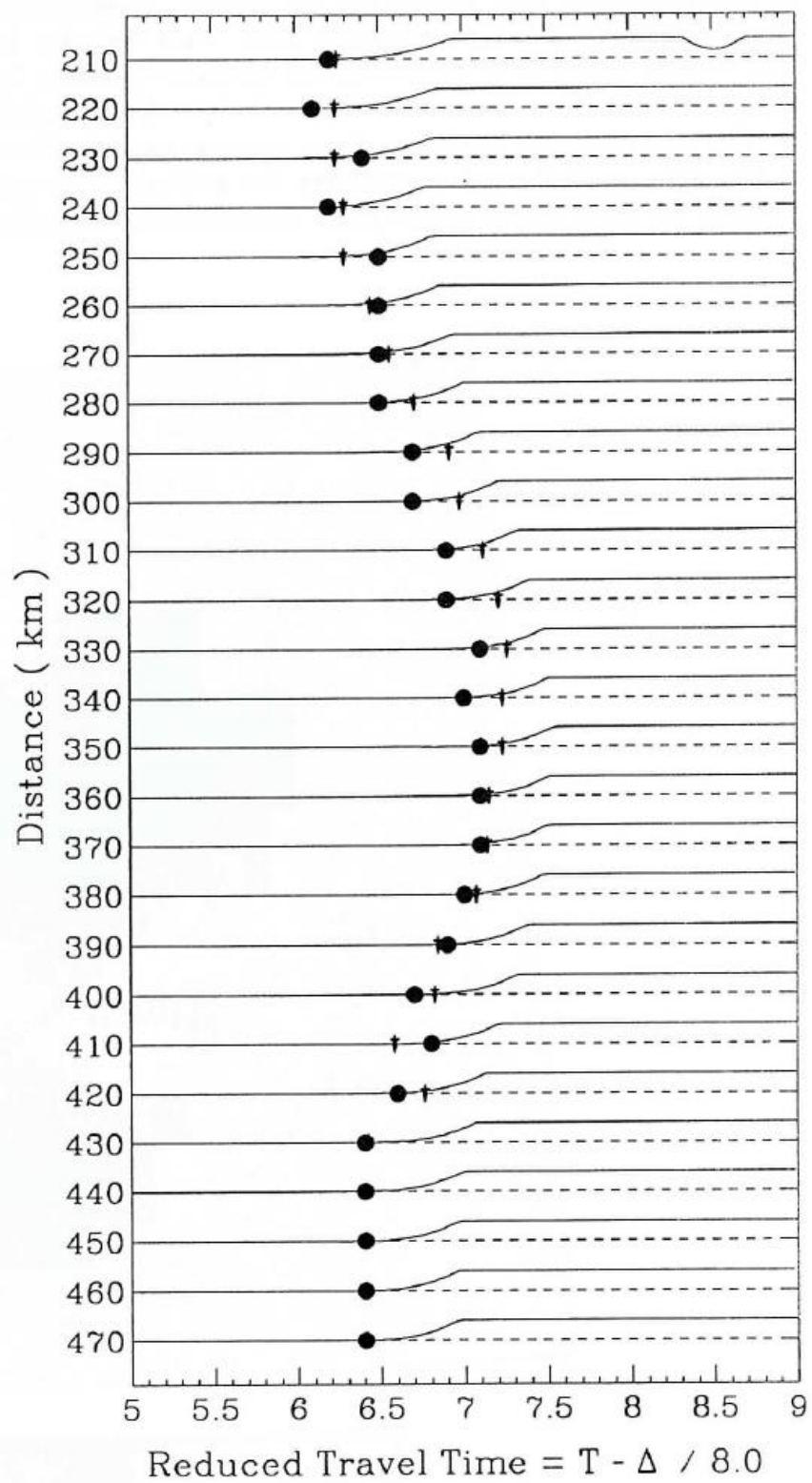


图 2：合成 Pn 波走时（黑点）和公式（2）计算的走时（小剑头）的比较。

图 3：西藏地震深度为重新定位

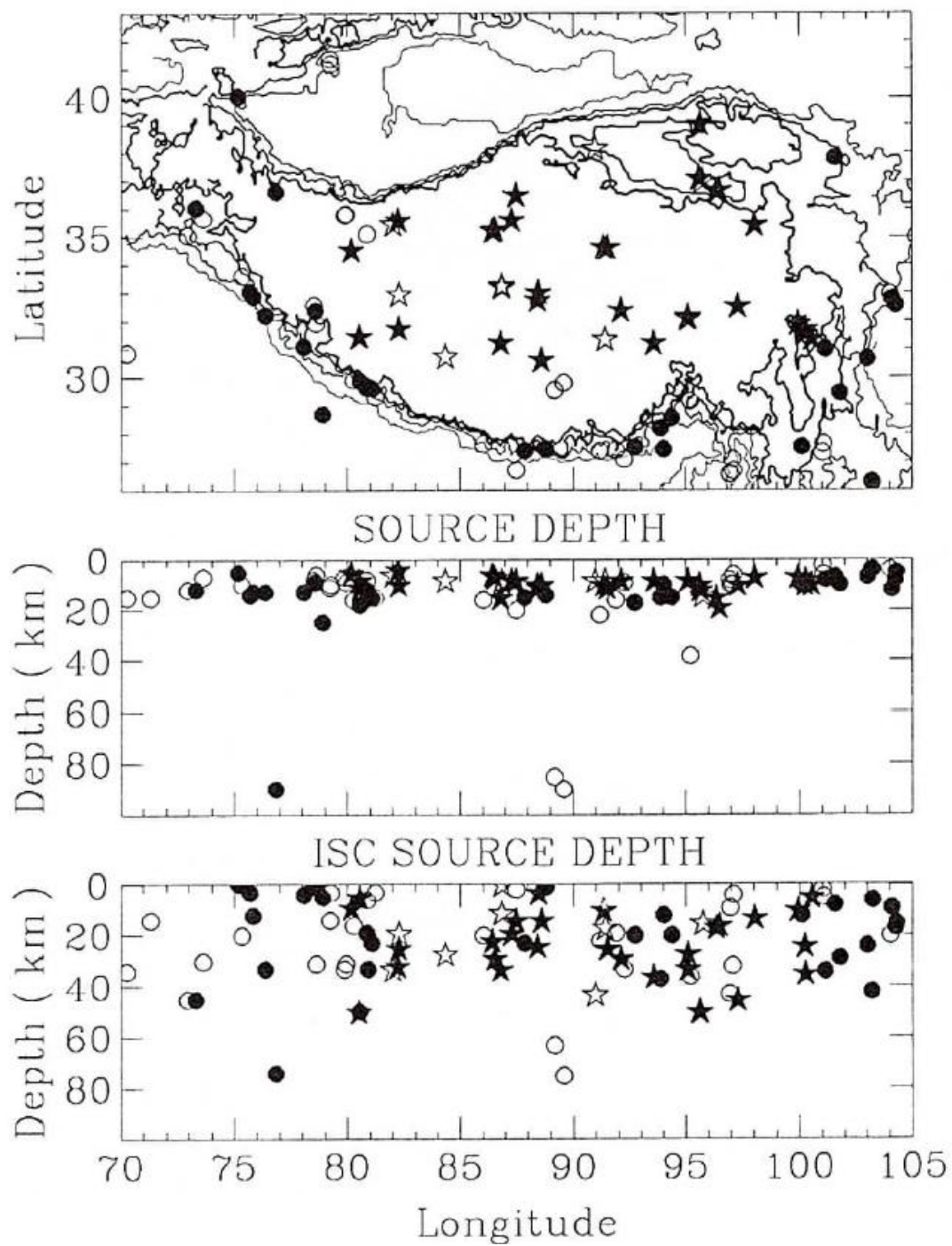


图 3：中间的深度为重新定位的，下面的是 ISC 的深度。五星为西藏内部的地震，圆为西藏边界上的地震。

图 4： 西藏地震起始时间误差

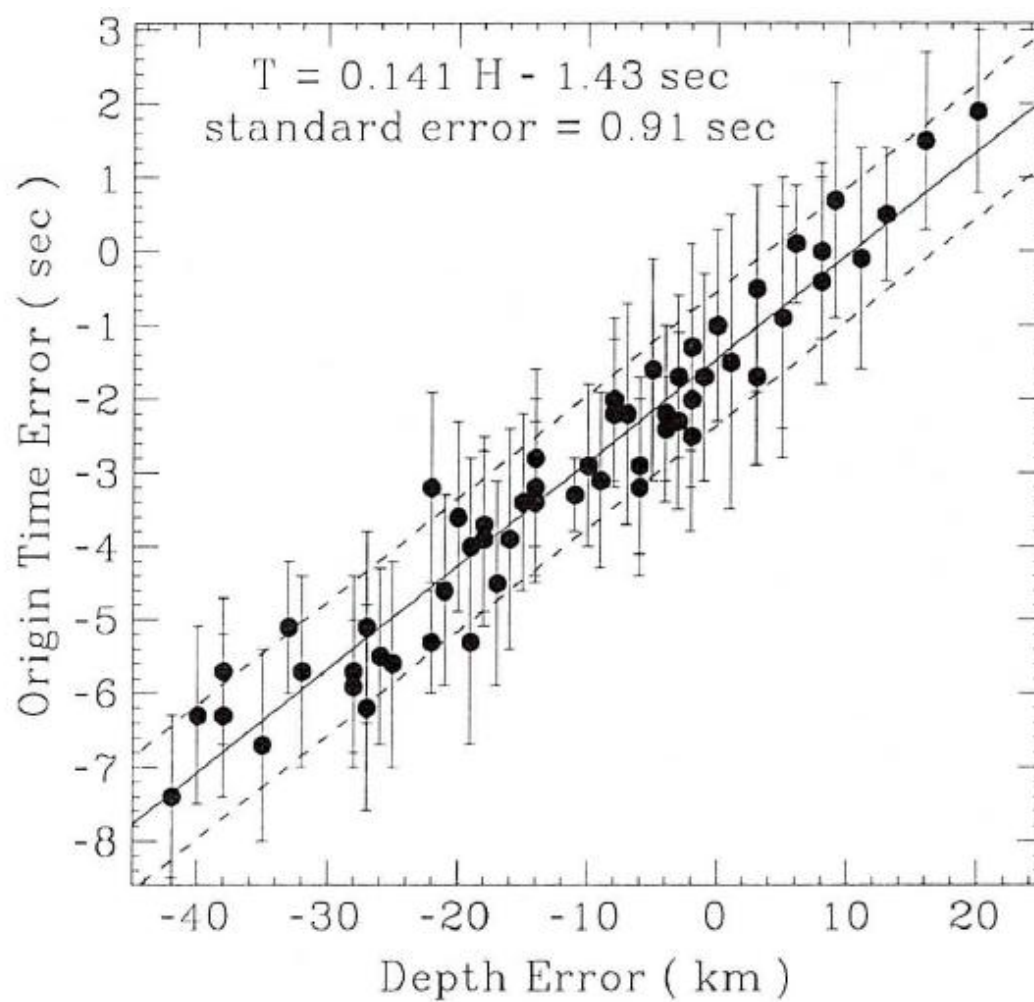


图 4： 起始时间误差：负的为提前。

图 5：上地幔顶部速度梯度校正

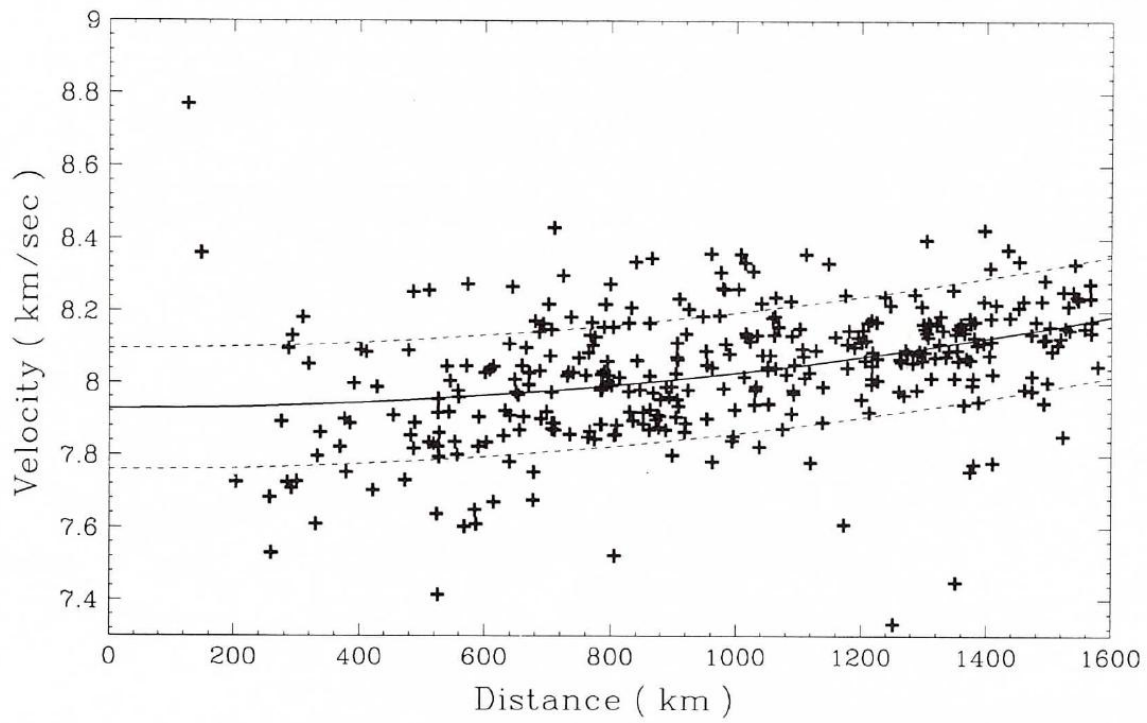


图 5。西藏 Pn 波速度为 7.93 公里/秒，上地幔顶部速度梯度 $4.4 \times 10^{-3} \text{ 秒}^{-1}$ 。

图 6: 西藏 Pn 波速分布图

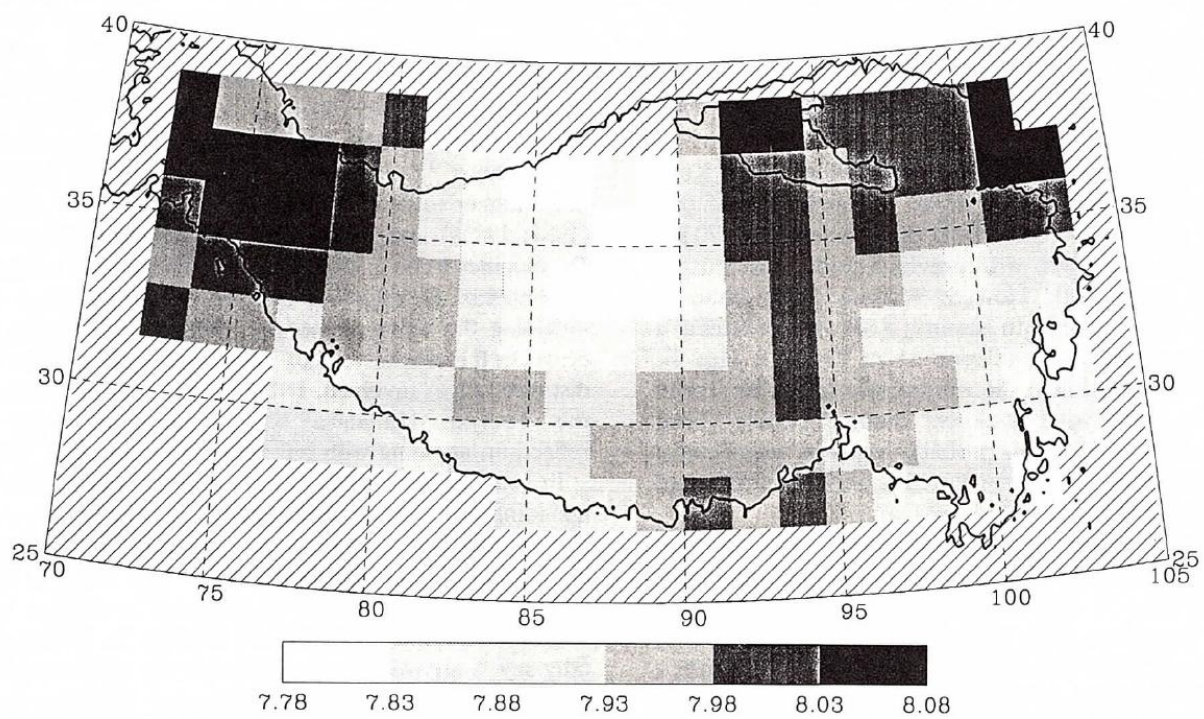


图 6: 西藏 Pn 波速分布图.