

首都圈平均波速比分析

赵明淳, 刁桂苓, 张学民

(河北省地震局, 河北 石家庄 050021)

摘要:首都圈数字地震台网覆盖京、津和河北中部, 其中自 2002 年 5 月—2003 年 12 月新记录 1 级以上地震 1186 个, 台站记录的纵、横波到时差约 2~25 s。选取被 5 个以上台站所记录到的地震, 震中位于网内或者网缘附近, 计算其平均波速比。分析认为: (1) 通过 HYPODD 修订震源位置, 绝大多数震源深度在 8~10 km, 平均波速比所反映的是地壳上层的状态。(2) 无论是从较长的时间尺度还是从较大的空间范围来看, 平均波速比值都是非常稳定的。(3) 平均波速比的可靠性有赖于较多的台站数目, 以满足拟合精度的要求。少数台站的测定结果往往伴随较大的误差, 单一地震的平均波速比值大幅度的涨落, 不宜表征地壳介质性质的改变。

关键词: 首都圈; 数字地震记录; 平均波速比

中图分类号: P315.3⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2005)03-0246-05

Analysis on Average Velocity Ratios in the Capital Area, China

ZHAO Ming-chun, DIAO Gui-ling, ZHANG Xue-min

(Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: The Capital Digital Seismic Network, covering Beijing, Tianjin and central Hebei province, has recorded 1186 new earthquakes with $M \geq 1.0$ during May 2002 to Dec. 2003, in which the arrival time differences between longitudinal wave and transverse wave are 2~25 s. Choosing the earthquakes recorded by 5 or above 5 stations, and demanding the epicenters are located in the network or near its edge, we calculate the average velocity ratios in this area. It is thought on the analysis that: (1) The majority of earthquakes are at depth of 8~10 km, after relocating the focus by HYPODD, so the average velocity ratio we obtained can only reflect the state in the upper crust. (2) The average velocity ratios are very steady, whatever in the long time scale or large spatial scale. (3) The reliability of average velocity ratios relies on the number of stations to satisfy the fitting precision. The results from fewer stations are always accompanied by larger errors, and single earthquake with big amplitude of change in average velocity ratio is not suitable to represent the property change of crustal media.

Key words: Capital area; Digital earthquake record; Average velocity ratio

0 引言

自上世纪起国际上陆续展开了地震波速比的研究。早在 1928 年日本地震学家和达清夫提出: 对一个地震以一组台站记录的纵波到时 T_p 和纵横波到时差 $T_s - T_p$ 的资料作图, 拟合直线求得斜率, 再加 1 即为波速比 V_p/V_s , 就是现在普遍使用求波速比

的和达法。我国自 1970 年代开展波速比的研究, 首都圈及其邻近地区始终是人们研究的热点地区。张成科^[1]、祝治平^[2]等汇总了多条人工地震剖面资料分析速度结构的特征; Jinli Huang^[3]、于湘伟等^[4]则利用天然地震的 P 波到时资料反演了首都圈 3 维速度结构; 嘉世旭等^[5] 1999 年讨论了邢台震源区波速

收稿日期: 2004-12-15

基金项目: 国家十五科技攻关计划 2004BA601B01-04-03.

作者简介: 赵明淳(1953-), 女(汉族), 河北平山人, 工程师, 主要从事地震监测工作。

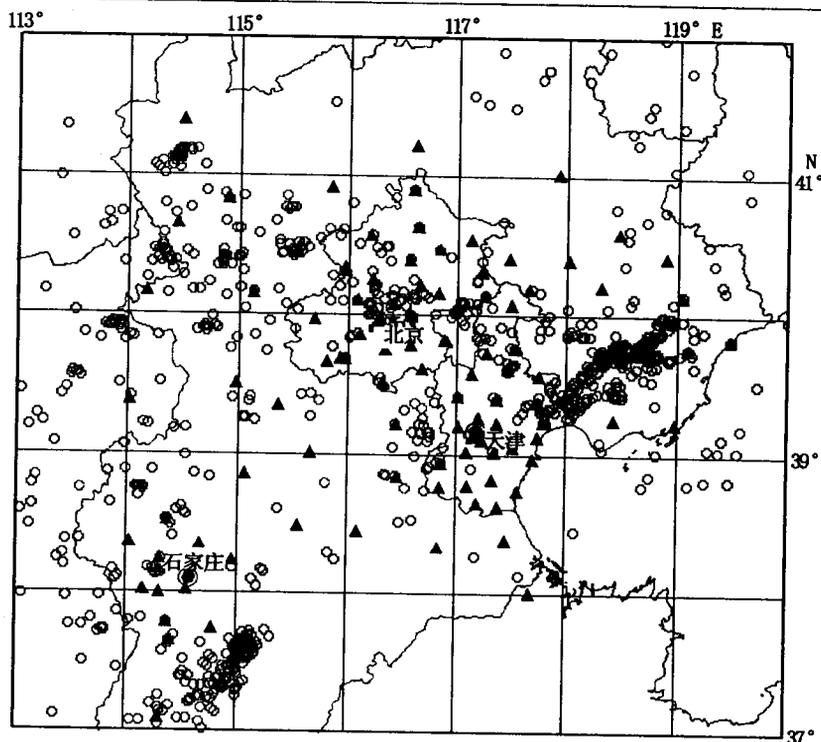


图 1 台站位置和地震震中分布(圈是震中,三角是台站)

Fig. 1 Location of seismic stations (triangle) and epicenters (circle).

比与地震的关系;傅征祥等^[6]测定了北京和张家口地区的平均波速比;栗生平等^[7]采用联合测定波速比方法^[8]把研究范围扩大到山西;黎晓明等^[9]最近计算了首都圈地区的平均波速比,分析了区域的差异。这些工作为更全面的研究首都圈波速比奠定了良好的基础。

1 研究区域及数据处理

首都圈数字地震台网实时传输记录的有 107 个台,覆盖北京市、天津市和河北中部,面积大约 140 000 km²。我们利用首都圈数字地震台网 2002 年 5 月—2003 年 12 月的新资料,计算平均波速比。取河北省地震局编制的《首都圈数字地震台网观测报告》中的震相到时,要求震中位于网内或者网缘附近。2002 年 5 月至 2003 年 12 月该区发生的 1 级以上共计 1 186 个地震事件,台站记录的纵、横波到时差约 2~25 s。为了保证计算结果的可靠性,选取同时被 5 个或 5 个以上台站所记录到的地震(图 1)。

数字地震台网的记录采样率 100 sps。数字波形可以在计算机屏幕拉伸放大,震相到时可以比较准确判断,能够提供高精度的数据。计算过程中剔除了个别显著偏离回归直线的数据。用多台和达法计算波速比时,为了避免各个坐标点挤成一团,所选

台站的震中距离应包括 $t_s - t_p$ 在 20~25 s 的远台和 $t_s - t_p$ 小于 5 s 的近台;为了减少远程传播路径上个别地段介质对波速比的影响,未选用 $t_s - t_p$ 很大的台站。

对于每一个地震,根据记录到清晰的直达 P、S 波的到时 t_p 、 t_s ,按下列公式计算出多台波速比值 γ ,即该地震震源周围介质的平均波速比:

$$\gamma = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - (n \sum_{i=1}^n \Delta t_i)^2}{n \sum_{i=1}^n (\Delta t_i t_{pi}) - \sum_{i=1}^n \Delta t_{pi} \sum_{i=1}^n \Delta t_i}$$

式中 n 为台站个数; t_p 和 t_s 分别为第 i 个台站记录到的直达 P 波和 S 波到时; $\Delta t_i = t_s - t_p$ 。采用和达法由线性最小二乘计算得出波速比 γ 。

最终得到的平均波速比的地震震级范围 $M_L = 1.0 \sim 4.2$ 。全部波速比数据的平均值为 1.696,接近 1.7,稍低于线弹性体的波速比值 1.73。其中 $\gamma > 1.90$ 的 5 次, $\gamma < 1.5$ 的仅仅 8 次。超出均值 10% 的地震仅仅占 1%。详细分析这些地震的数据,发现产生偏离较大的原因为:台站位置偏于震中一侧(台站张角 90°左右)、台站数目少(仅仅 5 个)、无近台(最小台站震中距在 50 km 左右)。最后剔除了这些不稳定数据后作波速比分析。在所选地震中,波速比标准误差大于 1.0 的不予采用。

采用下式计算标准误差：

$$s = \sqrt{\left[\frac{1}{n(n-2)} \right] \left[n \sum y^2 - (\sum y)^2 - \frac{[n \sum xy - (\sum x)(\sum y)]^2}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \right]}$$

图 2 给出波速比标准误差对应的地震次数，峰值在 0.4，低于 0.2 和高于 0.8 的结果仅占 6%。全部数据线性拟合的相关系数 $r^2 > 0.95$ ，其中平均波速比数据在 1.6~1.8 范围者占 94.4%，数据在 1.5~1.9 范围者占 98.9%，结果表明平均波速比值高度集中在均值附近(图 3, 表 1)。

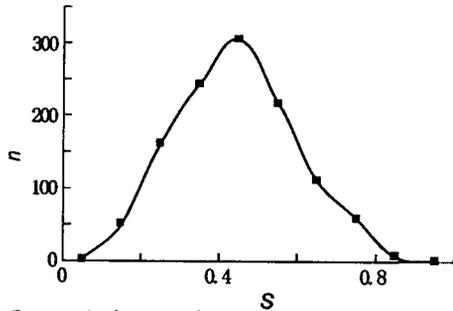


图 2 波速比标准误差对应的地震次数

Fig. 2 Numbers of earthquake corresponding to standard errors of velocity ratio.

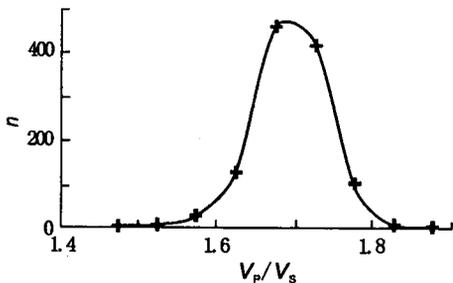


图 3 不同波速比对应的地震次数

Fig. 3 Numbers of earthquake corresponding to different velocity ratios.

表 1 不同波速比对应的地震次数

V_p/V_s	1.475	1.525	1.575	1.625	1.675	1.725	1.775	1.825	1.875
n	7	8	30	130	465	422	104	10	5

2 时间和空间分布分析

我们把已经计算出波速比的地震划分为 5 个区，依次为唐山、京津、晋冀蒙交界、冀晋交界、邢台，然后分区计算出平均波速比，如图 4、表 2 所示。

表 2 地震分区、平均波速比和地震数目

区域	地震数目	V_p/V_s 均值
1 唐山	460	1.691 0
2 京津	178	1.700 6
3 晋冀蒙	192	1.694 6
4 晋冀	109	1.693 3
5 邢台	185	1.687 4

各个地区的地震数目都超过 100 次，从而保证

了样本的数量。各区均值的差异在 0.1% 左右，看来平均值相当稳定，各区域之间不存在显著的差异。当然缩小分区尺度之后应当能够找出细微的差别。

以 2003 年 1—8 月的资料为例，分析发现波速比超出均值 3 倍中误差的数据，大多数的地震台数小于 12 个(图 5(a))。此外，相关系数小于 0.98 的数据的台站数目也都小于 12 个，见图 5(b)。如此看来地震台站数目多少是影响波速比值稳定的重要因素，当台站数目少时误差较大，信度降低；但台站多时往往分布范围大，可能会掩盖波速比的区域。

取地震集中且数目多的唐山、邢台 2 个老震区为例，分析它们的波速比随时间的变化。图 6(a) 是唐山震区 437 次地震的波速比时间分布(按时间顺序排列)。直线为均值；黑线是 5 点滑动平均；虚线是每个地震的波速比值。可见单点涨落稍大，5 点滑动平均波动甚小，一般在 5% 上下。没有出现连续的高值或者低值的情况，其间也没有强余震发生。

图 6(b) 是邢台震区 216 次地震的波速比时间分布(按时间顺序排列)，同样显示单点涨落稍大，5 点滑动平均波动较小，但是比唐山震区的结果似乎大一些。其间也没有强余震发生。

3 讨论和结论

(1) 我们使用相对密集的数字地震台网的地震记录，得到高分辨率的到时数据，从而保证较高的精度。部分数据通过 HYPODD 修订震源位置，绝大多数地震的震源深度在 8~10 km。那么地震波射线经过的路径是从此深度到地表台站，平均波速比所反映的是地壳上层的状态。

(2) 首都圈地区的平均波速比无论是从较长的时间尺度还是从较大的空间范围分析，都是非常稳定的。较大的区域之间没有显著的差别，也不存在呈现长时间的连续低值或者高值的情况。如果要探询平均波速比的细节差异，应当在保证样本数量的前提下，划分出更小的时空区域进行分析。

(3) 为了保证波速比的可靠性，应当保证台站的数目不能少，以满足拟合精度的要求。为了搜索小范围的变化，需要使用近震中的台站数据，此时如果台站稀疏、数目少，则需要认真考证、慎重对待波速比的变化。少数台站的测定结果往往伴随较大的误

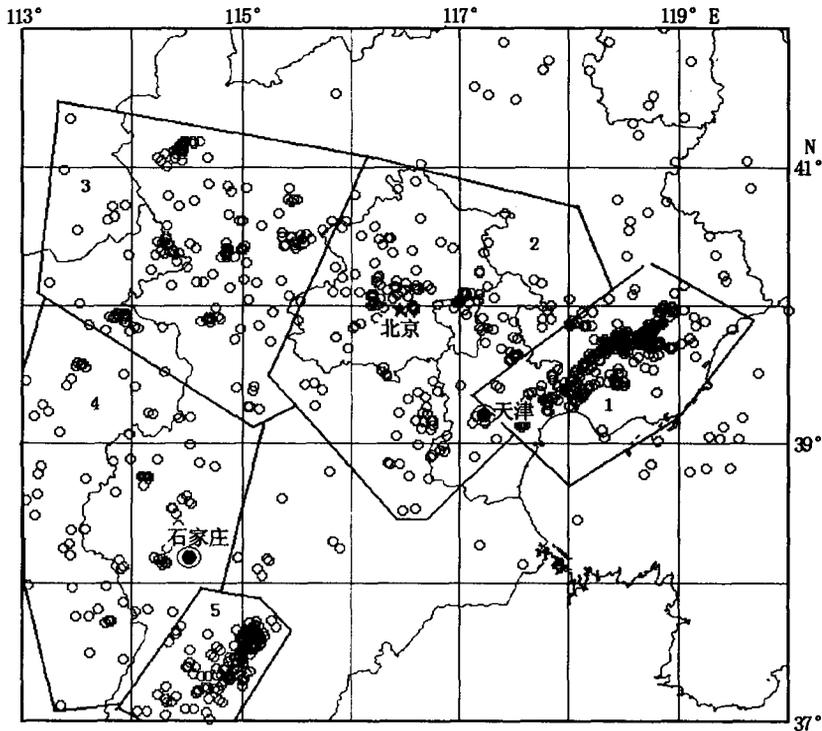
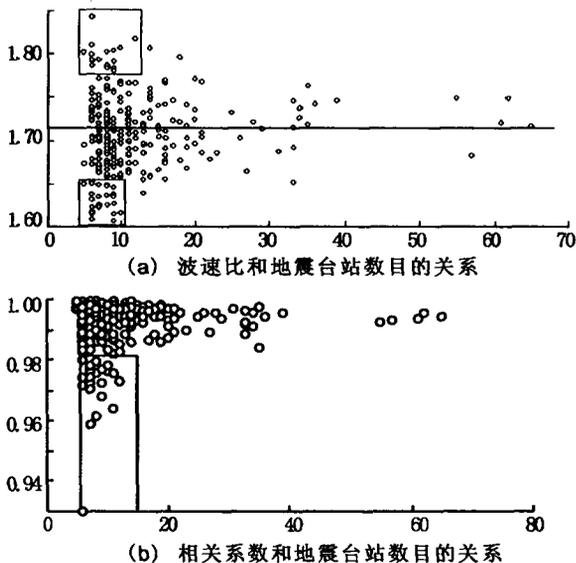


图 4 波速比的地震分区

Fig. 4 Seismic regions with different velocity ratios.



(a) 波速比和地震台站数目的关系

(b) 相关系数和地震台站数目的关系

图 5 波速比和台站数目及关系系数的关系 (方框内为大于 3 倍中误差者)

Fig. 5 The relationships between station numbers, correlation coefficients and numbers of station.

差,给出的是假象。况且单一地震的平均波速比值大幅度的涨落,不宜表征地壳介质性质的改变。

Scholz 撰写的《地震与断层力学》^[10]一书中提到:监测一个未来破坏区物理性质变化的途径之一

是研究穿过该区的地震波的传播特性。首先从事波速比异常变化研究的是 Senmenov^[11],他发现在苏联塔吉克共和国 Garm 地区,一些强震前压缩波与剪切波之比 V_P/V_S 下降。纽约 Blue Mountain Lake 地区一些地震前也观测到了同样的变化^[12]。这种观测到的现象是在围绕破裂带的地区内, V_P/V_S 下降 10% ~ 15%,临近地震前又恢复正常值。这些结果是建立地震前兆扩容—扩散理论的基石。这一理论问世之后,涌现了大量文章,声称发现了这种前兆性波速变化。然而,有些研究提出了相反的结果^[13,14],某些早期观测结果也受到批评。这导致这项手段与建筑于其上的理论受到冷遇。

1981 年冯德益把涉及地震波速用于地震预测的研究成果编辑成书《地震波速异常》^[15],指出“关于波速比异常的争议和讨论是科学研究中十分正常的现象,它正反映了这方面的研究工作还很不够,只有不断提高观测精度,通过反复实践和检验,才能够对波速异常及其物理实质取得客观的认识”。

时间过去 20 多年,对于国内新发生的地震,经常可以见到震前出现波速比异常的报道。至于基本数据的可靠性的论证,往往语焉不详。情况依然是在地震预测中的实践有余,比较客观的检验不足,尤其是由他人进行的从基础资料作起的检验几乎没有。因为国内过去基本采用的是模拟记录资料,震相到

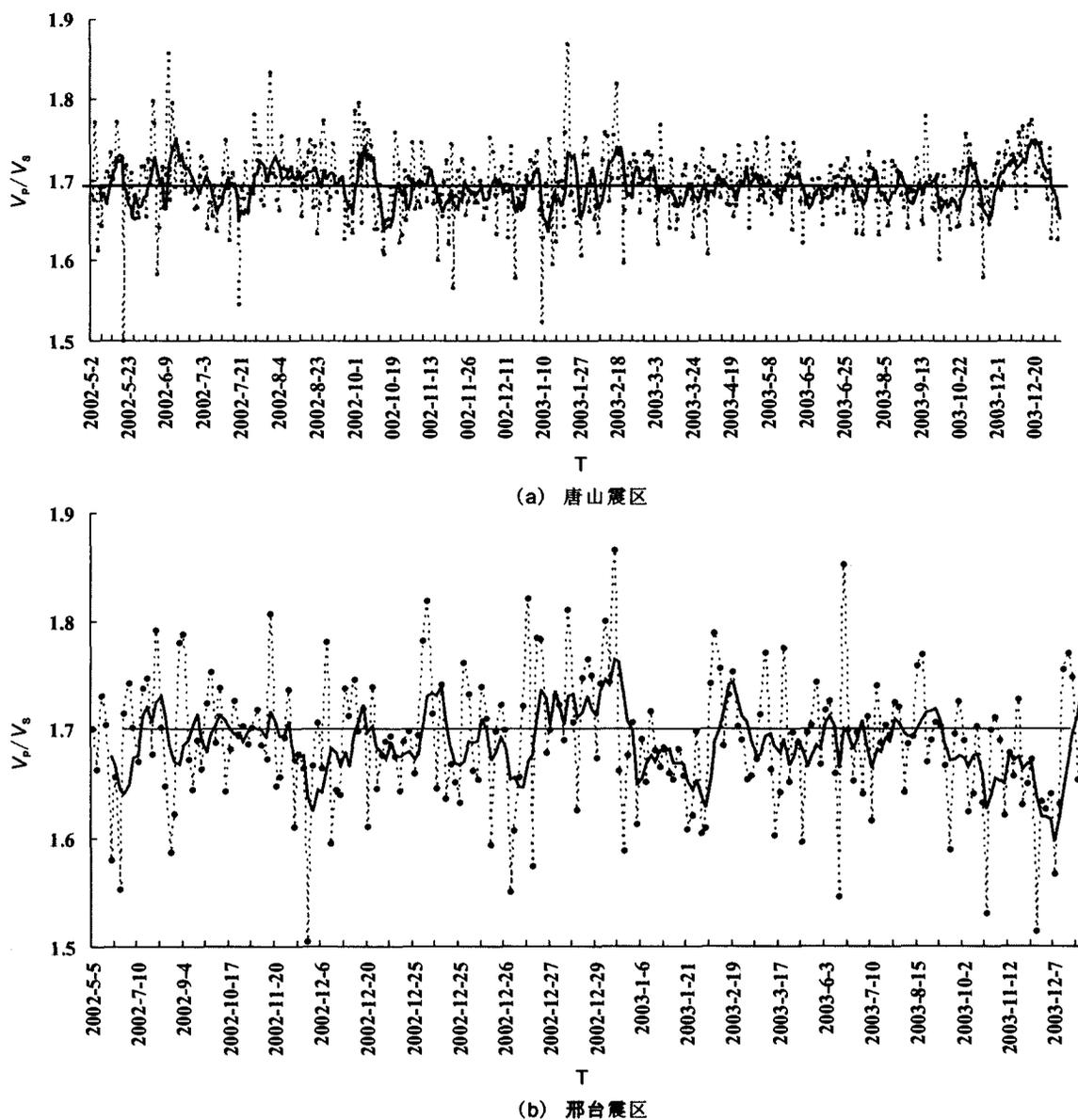


图 6 唐山和邢台地震区平均波速比随时间的变化

Fig. 6 Changes of average velocity ratios with time in Tangshan and Xingtai seismic areas.

时读数误差误差一般大于 0.2 s, 虽然波速比涨落幅度常常很大, 但是连续的低值、高值并不多见, 因此波速比分析结果的可靠性常常受到人们的质疑。

目前地震波速度分布是研究地球结构的主要资料。通常是以速度快而首先到达的 P 波作为分析的重点, 可以给出纵向和横向不均匀的结果。然而 P 波变化往往反映的是介质体积形变特征, 后续到达的 S 波主要体现介质剪切形变特征, 相对与 P 波对于岩体的温度和包含的流体比较敏感。岩体随温度升高和存在流体都会改变其流变性质。张学民等^[16]认为 S 波波速相对异常通常比 P 波更为敏感, 所归纳的大部分研究表明上地幔浅部的 S 波异常与地表构

造明显有关。因此通过深入研究 S 波速度和 P 波速度的相对变化—波速比, 去认识地球结构乃至震源体及其附近的细结构, 受到越来越广泛的重视^[17]。S 波在碰到某些软流层或低阻层时, 速度下降很快, 其敏感性远大于 P 波, 所以人们非常希望得到 S 波速度结构, 进而研究波速比、泊松比等介质物性的差异。剪切波对于低速层及介质的流变性反映比较灵敏, 波速比的高低能够反映一定地区的介质脆韧性变化。因此, 速度结构、波速比及断层分布是确定某一地区地壳演化及地震活动性的重要判别依据。

(下转 254 页)

格爾間 6.7 级地震。依据以上西藏西南部复发地震组内地震的时、空、强特征,可以预测 2005~2006 年距离西藏仲巴地区 70 km 范围有发生 6~7 级地震的可能。

4 结论及讨论

2000 年以来中国大陆(除新疆和东北深震区以外)5 级以上地震具有近源区的相继发震的特征,表明该时段内研究区的应力状态变化不大,发生地震的区域具有继承性。

依据本文的分析可得以下结论:

(1)2000 年以来青海、西藏交界,云南、四川交界,甘肃及西藏西南部地区的 5 级以上地震具有显著近源区的相继发生特征。

(2)依据以上各区域复发地震组内地震的时、

空、强特征,可以预测 2005 年~2006 年西藏安多县及与青海交界地区有发生 5.0~6.5 级地震的可能;2004~2005 年云南大姚附近有发生 6 级左右地震的危险;2005~2006 年西藏仲巴附近有发生 6~7 级地震的可能。

[参考文献]

- [1] 中国地震局预测预防司. 大陆地震预报的方法和理论[M]. 北京:地震出版社,1998. 44.
- [2] 郑文俊,袁道阳,何文贵. 祁连山中东段强震复发概率模型及未来强震地点预测[J]. 西北地震学报,2004,26(3):228-233.
- [3] 陈凌,刘杰,陈顺,等. 地震活动性分析中余震的删除[J]. 地球物理学报,1998,41(增刊):244-252.
- [4] 马永青,赵卫明,任雪梅,等. 中国大陆地震成组活动特征统计分析[J]. 地震,2003,23(1):57-62.

(上接 250 页)

[参考文献]

- [1] 张成科,张先康,赵金仁,等. 渤海湾及其邻区壳幔速度结构研究与综述[J]. 地震学报,2002,24(4), 428-435.
- [2] 祝治平,张先康,盖玉杰,等. 邢台震源区及其邻近地区地壳上地幔速度结构研究[J]. 地震学报,1992,27(3):328-334.
- [3] Jinli Huang, Dapeng Zhao. Crustal heterogeneity and seismotectonics of the region around Beijing, China[J]. Tectonophysics,2004, 385: 159-180.
- [4] 于湘伟,陈运泰,王培德. 京津唐地区中上地壳三维 P 波速度结构[J]. 地震学报,2003,25(1),1-14.
- [5] 嘉世旭,刘昌铨. 邢台震源区波速比异常与地震的关系[J]. 地震学报,1996,39(增刊), 205-215.
- [6] 傅征祥,程燕. 北京和张家口地区地壳平均波速比的联合测定[J]. 地震,1988,(4):28-34.
- [7] 栗生平,傅征祥. 华北地区地震带分段波速比平均值的测定[A]. 见:国家地震局科技发展司,中国大陆 2005 年前强震危险性预测研究[C]. 北京:地震出版社,1997. 96-99.
- [8] Smith E G C. Joint determination of seismic velocity ratios: Theory and application to an aftershock sequence[J]. Bull. Seic. Soc. Am., 1983, 73 (2):405-417.
- [9] 黎晓明,张晓东. 应用多法测定华北地区地壳的平均波速比[J]. 地震,2004,24(1),163-169.
- [10] Scholz C H. 马胜利,等译. 地震与断层力学[M]. 北京:地震出版社,1990. 364.
- [11] Semenov A N. Variations of the travel time of transverse and longitudinal waves before violent earthquakes[J]. Izv. Acad. Sci. USSR, Phys. Solid Earth (Eng. trans.),1969, (3):245-258.
- [12] Aggarwal Y P, Sykes L R, Simpson D W, et al. Spatial and temporal variations of t_s/t_p and in P wave residual at blue Mountain Lake, New York: Application to earthquake prediction[J]. J. Geophys. Res., 1973,80:718-732.
- [13] McEvilly T V, Johnson L R. Stability of p and s velocities from central California quarry blasts[J]. Bull. Seismol. Soc. Am., 1974,64:343-353.
- [14] Mogi K. Earthquake Prediction [M]. Tokyo: Academic Press,1985.
- [15] 冯德益. 地震波速变化[M]. 北京:地震出版社,1981.
- [16] 张学民,刁桂苓,束沛镛,等. 华北地区地下介质波速比值(V_p/V_s)研究[J]. 地震地质,2004,26(2),305-317.
- [17] 张学民,刁桂苓,束沛镛. 鄂尔多斯块体及其东南缘剪切波速度结构与波速比研究[J]. 中国地震,2004,20(1),53-63.