由地壳速度结构判断郯庐断裂带 江苏段未来大震位置。

梅卫萍1,2,李清河2,张元生3,金淑梅2

(1. 中国科学技术大学,安徽 合肥 230026; 2.江苏省地震局,江苏 南京 210014;3.中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000)

摘要:用多震相地震走时成像法反演郑庐断裂带鲁苏皖段及邻区三维地壳速度结构。一些地区如 郑庐断裂带临沫到定远及以东地区在中地壳的 20~25 km 出现低速层,一些地区莫霍面埋深有变 化。浅层速度结构的分段与断裂活动的分段相一致,表明新沂到泗洪是活动断裂的闭锁段。对比 1668 年山东郯城 8½级地震区和研究区的深部速度结构,结合与郯庐带相交的断裂、地震活动、活 动断裂的闭锁段、中地壳低速层及莫霍面深度变化,综合判断郯庐断裂带江苏段未来可能发生大震 的地区为 33.4°~34.1°N,118.2°~118.8°E,重点是宿迁、沭阳、泗阳和泗洪。震级估计可达 8 级。 关键词: 郯庐断裂带江苏段; 地壳三维速度结构; 低速层; 莫霍面深度; 大震位置 中图分类号:P315.2 文献标志码:A 文章编号: 1000-0844(2015)03-0639-09 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.03.0693

Location of Future Large Earthquakes in Jiangsu Segment of Tanlu Fault Zone Based on the Crustal Velocity Structure

MEI Wei-ping^{1,2}, LI Qing-he², ZHANG Yuan-sheng³, JIN Shu-mei²

(1.University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China; 2.Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, Jiangsu, China; 3.Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The Tancheng-Lujiang Fault Zone (simplified as the Tanlu Fault Zone) is the biggest in east China. In 1668, an M8 earthquake occurred along this fault zone in Tancheng, Shandong Province, China. Seismologists are focusing on the most likely location of the next major earthquake along this fault, particularly in the areas near Shandong and Jiangsu provinces. The multiphase travel time inversion (MUTI) algorithm was developed to invert the three-dimensional crust velocity structure of the Shandong-Jiangsu segment of the Tanu Fault Zone and its adjacent area $(30^{\circ} \sim 37^{\circ} \text{ N}, 113^{\circ} \sim 122^{\circ} \text{ E})$. The crust can be divided into three layers, the upper (10 $\sim 15 \text{ km thick}$), the middle ($10 \sim 15 \text{ km thick}$) and the lower ($10 \sim 12 \text{ km thick}$). The segmentation of the shallow velocity structure is consistent with that of fault activity, and indicates that the area from Xinyi to Sihong comprises the active fault block section. There is a low velocity layer at a depth of $20 \sim 25 \text{ km}$ in the Tanlu Fault Zone from Linshu to Dingyuan and its eastern area. A low velocity layer can also be found in the middle crust of the source region of the 1668 Tancheng earthquake. In this study, we present the variation of Moho depths in Suqian, Siyang, Shuyang, and Tancheng. The Wuxi-Suqian fault, the Hongze-Goudun fault, and the Jiashan

收稿日期:2014-11-14

基金项目:国家自然科学基金(40974031);江苏省科技发展项目(BE2009691);宿迁市活动断裂与地震危险性评价 作者简介:梅卫萍(1972-),女,湖北黄梅人,高级工程师,主要从事地震监测和研究工作。E-mail: 582759703@qq.com。 通信作者:李清河,研究员,博士生导师。E-mail:qh_li2005@163.com。 -Xiangshui fault all intersect with the Tanlu Fault Zone, and the intersection area of these faults may be dangerous. By comparing the depth velocity structure features of the Jiangsu segment along the Tanlu fault zone with the source area of the 1668 Tancheng M8 earthquake, combined with data regarding seismic activity, the active fault block, the low velocity layer in the middle crust, the depth variations of the Moho, and the fault intersections, the area of next large earthquake can be estimated for the Jiangsu segment of the Tanlu fault zone. The most likely position is $33.4^{\circ} \sim 34.1^{\circ}$ N and $118.2^{\circ} \sim 118.8^{\circ}$ E, in Suqian, Shuyang, Siyang and Sihong in particular. The estimated maximum magnitude is 8.

Key words: Jiangsu segment of Tanlu fault zone; 3-D crustal velocity structure; low velocity layer; Moho depth; location of large earthquake

0 引言

多年来,各国科学家特别是中国科学家在大地 震区做了大量的深部探测和研究,以了解其深部环 境和背景。我国科学家对 1668 年山东郯城 8½级 地震区^[1]、1966 年邢台 7.2 级地震区^[2]、1975 年海 城 7.3 级地震区^[2]、1976 年唐山 7.8 级地震区^[2]、 1977 年伽师 6 级震群区^[2]、1920 年海源 8.5 级地震 区^[3]、张渤地震带^[3]、临汾地震区^[3]、1998 年张北 6. 2 级地震区^[3]、1989 年大同一阳高 5~6 级震群地震 区^[3]、1679 年三河—平谷 8 级地震区^[3]、1937 年菏 泽 7 级地震区^[3]、1979 年溧阳 6.0 级地震区^[3]、2008 年汶川 8.0 级地震区^[2]、天水 8 级地震区^[3]、2008 年汶川 8.0 级地震区^[2]、天水 8 级地震区^[4]、福建一 广东陆缘地震区^[3]、琼东北一雷州半岛地震区^[3]及 河南林县地震区^[3]等进行了深部探测,分析各自的 深部结构特点,研究地壳上地幔结构和大地震孕育 发生的深部环境和背景。

由于计算机层析成像技术和数字地震的发展, 用天然地震探测地球内部结构已成为探测的主要方法,近年来在走时层析成像、波形反演、地震台阵观 测和反演,噪声成像等方面已取得多个研究成果。

尽管各种方法对不同震区所得出的深部结构及 大震发生的深部环境和背景不同,但有两点是基本 相同的,即:大震区均存在壳内低速层^[2-3],大震发生 在低速层的上面或下面;壳内大震区下部的莫霍面 深度均有深浅变化^[2-3]。前人对壳内低速层在大震 孕育中的作用和机理进行了理论和实验研究^[5]。应 该指出的是,绝大多数探测结果都是对已发生大震 区域的后验探测,仅有极少数文章涉及预测未来可 能发生大震的位置和强度^[6]。

通过研究断裂构造的活动性和大震复发周期, 郯庐断裂带江苏段历来被判定为大震危险地段,但 具体危险位置的判定尚存在不确定性。断裂在地 表,而地震发生在地下深部,因此深部环境及背景是 判断大震发生的重要判据,此前因探测手段和方法的缺陷使得对这方面的研究程度不够。

使用 1980—2011 年间的天然地震 Pg、Sg、Pm、 Sm、Pn、Sn 震相到时资料,用多震相地震走时成像 法(反演网格是 30 km×30 km)反演郯庐断裂带鲁 苏皖段及邻区(30°~37°N,113°~122°E)的三维地 壳速度结构,获得成像结果,并分析其中地壳低速层 的展布特征和莫霍面埋深状况,对比 1668 年 8½级 地震的深部结构,结合断裂及地震分布,对该带及附 近未来可能发生大地震的位置做出预测判断。

1 研究方法

采用多震相地震走时成像法^[7-10]反演地壳上地 幔三维速度结构。该方法使用天然地震的 Pg、Sg、 Pm、Sm、Pn、Sn、pP、sS 震相到时资料,并联合利用 人工地震测深资料进行约束反演,以保证三维地壳 结构成像的有效先验信息利用和反演信息综合约 束。采用三维射线追踪逐次迭代法进行射线追踪, 反演方法最优化过程采用非线性全局优化方法的遗 传算法^[11-13],反演结果用检测板试验检验。

对比 1668 年 8½级地震区和研究区的深部速 度结构,主要分析壳内低速层的分布和莫霍面分布 特征,结合断裂活动和地震活动,给出未来可能发生 大震地区的判定。

2 资料及主要结果

2.1 资料

研究区域为 $31^{\circ} \sim 37^{\circ}$ N, $116^{\circ} \sim 121^{\circ}$ E, 反演范 围扩到 $30^{\circ} \sim 37^{\circ}$ N, $113^{\circ} \sim 122^{\circ}$ E; 地震资料的时间 段为 1980年 1月 - 2011年 12月。要求每个地震 事件被 3个以上台站记录到。共有 6 278个地震参 与反演,有 123 022个(包括 Pg、Sg、Pm、Sm、Pn 和 Sn 震相)能够参加反演计算震相到时资料。用 Sg-Pg 走时和 Pg 走时构成检验数据的函数,剔除不可 靠数据以确保资料的可靠性。反演前先对使用的地 震进行重新定位。

模型网格数确定为 22×22×7, 网格大小不等, 沿纬度方向(X 轴)分别为 130、30、30、…、30、137.1 km;沿经度方向(Y 轴)分别为 80、30、30、…、30、 97.6 km;沿深度方向(Z 轴)分别为 2、3、5、5、5、5、 20 km。地壳 P 波速度模型参考了 HQ-13 人工地 震测深速度剖面资料^[14]。选用的地震台站、地震事 件和计算网格见图 1。



Fig.1 Distribution of seismic events, seismic stations and computational grid Circles denote seismic events, triangles denote seismic stations, dashed lines show coordinate system, and solid lines show computational grid

用检测板进行分辨率检验。限于篇幅,仅给出 10~15 km 层的检测板(图 2)。由图可见,研究区 内各层的分辨率均较高,其结果可信。





2.2 基本结果

我们曾以 40 km×40 km 网格对 29°~38°N, 114°~124°E 范围的地壳三维速度结构进行了计 算,获得该区地壳速度结构特征的基本认识^[15],与 人工地震测深结果基本一致^[14,16]。本文研究范围 较之缩小,资料更丰富,计算网格更小,获得的结果 也更精细,但两者的主要结果基本相同,且在其他文 章中也有论述^[17-18],故本文不再赘述。本文仅以郯 庐带苏鲁段速度结构中的低速层和莫霍面深度分布 特征及用来判断未来大震区位置来加以分析。

2.3 中地壳存在低速异常区

本研究区 0~2 km、2~5 km、5~10 km、10~ 15 km 及 15~20 km 各层均未发现低速层存在,但 20~25 km 层则在部分地区发现。图 3(a)是 15~ 20 km 层的速度分布。此层是中地壳,其中间速度 为 6.48 km/s,速度扰动约 1.6%。从图可见, 郑庐 断裂带及附近速度约为 6.50~6.52 km/s,高于中 间速度,在本层没有发现低速层。从图 2 检测板图 可以看到,绝大部分地区模型恢复很好,表明分辨较 高,结果可信。

图 3(b)为 20~25 km 速度成像结果。此层是 中地壳下部和下地壳上部,本层中间速度为 6.47 m/s,速度扰动率约 1.6%,层内速度变化不大。 从图可见,郯庐断裂带速度可分为三段:约 35.2°N 以北,速度较高,约为 6.51~6.52 km/s;中间较低, 约 6.47~6.50 km/s,包括沿郯庐带苍山、郯城、新 沂、宿迁、泗洪到定远及以东的地区;而 32.3°N 以 南,速度又较高,约 6.51~6.52 km/s。研究区内绝 大部分地区分辨率较高,结果可信。

本研究区 15~20 km 层的中间速度为 6.48 m/s,而 20~25 km 层的中间速度为 6.47 m/s,说明 在此层已出现低速层,在 32°~35°N 间速度更低.特 别值得注意的是郯庐断裂带鲁—苏—皖段、安徽西 北地区速度更低些。为对比,我们从图 3(a)、(b)中 选择一些地方给出各自的层速度(表 1),可见部分 地区在 20~25 km 层存在低速层。

由图 3(b)可见,中地壳存在低速异常带的地区 主要自临沭向东南到天长,自临沭向西南到明光的 三角形区域(见图中红线轮廓区域)。

1668年山东郯城 8½级地震有多个震中位置研 究结果。利用地壳结构特点给出的震中位置在34.8° ~35.2°N, 118.2°~118.7°E区间,可取 35.1°N, 118. 6°E,深度约 20 km^[17]。图 3(b)和图 4 均显示,此次 大地震所在区域在 20~25 km 层存在低速层。 696



图 3 15~20 km 和 20~25 km 速度成像 Fig.3 Velocity tomography at 15~20 km and 20~25 km sections

地名	坐标		层速度/(km・s ⁻¹)		是否
	纬度/(°)	经度(°)	$5\sim\!20$ km	$20\!\sim\!25~\mathrm{km}$	低速
沂水	35.79	118.62	6.51	6.51	
沂南	35.55	118.46	6.53	6.51	是
莒县	35.58	118.83	6.53	6.51	是
临沂	35.11	118.35	6.52	6.51	是
莒南	35.18	118.83	6.51	6.51	-
临沭	34.92	118.65	6.50	6.48	是
郯城	34.62	118.36	6.50	6.48	是
新沂	34.37	118.35	6.51	6.49	是
睢宁	33.91	117.94	6.50	6.51	-
宿迁	33.96	118.27	6.51	6.48	是
沭阳	34.11	118.80	6.54	6.49	是
泗阳	33.72	118.70	6.58	6.48	是
淮安	33.61	119.01	6.55	6.48	是
盱眙	33.01	118.54	6.50	6.48	是
泗洪	33.46	118.21	6.51	6.48	是
五河	33.15	117.88	6.48	6.48	-
明光	32.78	117.98	6.52	6.48	是

表 1 层速度 Table 1 Interval velocities

图 4 为几条深部速度结构剖面。图 4(a)是沿 东西方向的剖面(34°N,116°E~34°N,121°E)。 可以看到 118°~119°E间在中地壳下部存在低速 体,位于郯庐带下方,即 34°~34.3°N,118.1°~ 118.4°E间宿迁和新沂间均存在低速体。

图 4(b) 是沿南北方向切的剖面(31°N,118.5°

E~36°N,118.5°E)。可以看到沿118,5°E线,实际是118.2°~118.7°E间均是这个图像,在郯城、临沭下方中地壳存在低速层,即1668年山东郯城8½级地震震中位置。在33°~34°N间,即泗阳、宿迁下方存在低速体。

2015 年

图 4(c) 是沿 NW-SE 方向的深度-速度剖面 (34.68°N,116°E~33.40°N,120°E)。该剖面在过 郯庐带的 33.9°~34.1°N 间(即宿迁附近)在中地壳 存在低速体。

综合以上分析,郯庐断裂带临沭到定远及以东 的地区,即郯庐带相应地段及以东的地区,包括宿 迁、泗阳、沭阳、淮阴、睢宁、泗洪和五河、天长、六合、 明光(嘉山)等地区的中地壳存在低速体。

2.4 莫霍面埋深变化

图 5 是研究区莫霍面埋深图。我们定位的 1668 年 8 ½ 级地震震中位置为 35.1°N,118.6° E^[17],高维明等定位在 34.8°N,118.5°E^[19]。从图 5 可以看到两个区域均显示莫霍面深度有变化, 即 1668年8½级地震区莫霍面埋深处于变化地段。 本研究区北部山东境内的各县市莫霍面多在 32~ 33 km,江苏和安徽境内郯庐带及以东相邻区域大 体有三个深度区,即 32~33 km 的区域有新沂、宿 迁、沭阳、睢宁;33~34 km 的有五河、明光、盱眙、泗 洪;34~35 km的有泗阳、淮安。在深度变化方面,





图 4 不同结构的深度-速度剖面 Fig.4 Depth-velocity section for different structure

自泗洪南、宿迁到沭阳,其莫霍面埋深从北部的 32 ~33 km 增至南面的 34~35 km;宿迁以北,沭阳以 西,莫霍面深度从 33~34 km 变到 32~33 km,故宿 迁、沭阳、泗阳、泗洪是莫霍面深度变化的地方;另外 五河、明光一带莫霍面埋深也有变化。

尽管郯庐带内外尽管莫霍面深度有变化,但变

化幅度不大,一般为 2~4 km,不同于其他莫霍面深 度变化很大的大震区。

3 由速度结构判断郯庐带江苏段大震位置

3.1 大震区的深部速度结构环境

从速度结构看,大震区的深部环境主要有以下





图 5 研究区莫霍面深度分布

Fig.5 The Moho depths distribution in research area

(1) 中地壳存在低速层^[2-3]:前人对大震区速度 结构的研究表明,大震区均存在中下地壳低速层或 低速异常体。周永胜等认为,地壳中震源深度多集 中在地壳强度剖面的强度峰值段,且其深度常处于 中下地壳低速带之上的相对高速区域,这表明强震 孕育不仅受块体边界控制,也明显受深部动力的影 响,包括块体结构,底边界及层间解耦和深部塑形流 动等^[5]。

(2)莫霍面埋深变化:大震均发生在莫霍面深度 由深到浅或由浅到深的变化区内,上地幔局部隆起 或下沉可能是上地幔内部物质和能量交换、运移和 上湧的结果^[2],也可能是构造的深部边界。

(3) 深大断裂的交汇:通常大地震区均存在深 部断裂,尽管这些深部断裂不一定和浅部断裂直



图 6 郑庐断裂带鲁苏皖段及邻近地区地震构造图

Fig.6 Sesismotectonics map of the Shandong-Jiangsu-Auhui segment of the Tanlt fault zone and adjacent areas

接相通或隐伏,倘若是大活动构造块体边界的深大 断裂,则发生大震的可能性更大。较大断裂交汇附 近容易局部积累应变能,且属于应力弱化区域,容 易发生大地震。

3.2 1668 年 8½级地震区附近深部速度结构特点

我们总结出 1668 年郯城 8½级大地震区深部

结构的主要特点[17]:

(1) 郑庐断裂带内及两侧速度结构较为复杂, 而西部比东部更复杂,呈现出较强的非均匀性,表明 郑庐断裂带深部主断裂面向西。

(2) 中地壳上部和下部均存在低速层,上部低 速层主要出现在断裂带西部,深度约 16~19 km, 下部低速层深度约 20.7~23.3 km。中下地壳速度 横向变化较大。

(3) 莫霍面埋深变化。

(4) 郑庐断裂带电阻率内部低于外部, 郑庐带 下部处于两个高电阻率区之间, 电阻率高低的分界 可能是郑庐断裂带的边界。

(5) 地震多发生在速度高低变化较大地方,偏向高速一侧,同时也是电阻率变化较大的地方。

3.3 本区断裂分布特征

图 6 是研究区地震构造图。本文涉及范围属于 郯庐带中段南部,潍坊至嘉山段称为沂沭断裂带,可 分成三段:安丘段、莒县一郏城段和新沂一泗洪段, 是三个独立的破裂单元。这三段均是晚第四纪活动 断裂,而泗洪以南是早第四纪断裂。其几何结构、运 动性质、最大位移量、最新活动时代、大震复发周期、 现代活动状态以及探部构造背景等均具独立性^[20]。

研究表明,郯庐断裂带是深大断裂,可能深到地 壳底部[18],并且是华北断块、扬子断块、苏鲁断褶带 的构造分界断裂, 郯庐带速度结构的分段性可延至 地壳底部,且与构造分界吻合。郯庐带东西两侧速 度差异明显,说明此断裂很深^[18],发生大地震的可 能性很大。在此区域的走向基本为 NNE 向,该带 与NW向、近EW向和NEE向断裂多处相交。值 得注意的是蒙山山前断裂、苍山--尼山断裂与郯庐 带相交,即控制该处 NW 向深部结构,控制了 1668 年8½级大地震的震源体范围,故这两条断裂与郯庐 带相交汇区域是应变能积累区域。除了这两条断裂 之外,与本研究区郯庐带相交的断裂主要还有:无 锡一宿迁断裂(NW向,在宿迁附近与郯庐带相交)、 嘉山一响水断裂(NE向,在嘉山(明光)附近与郯庐 带相交)及洪泽—沟墩断裂(NE向,在嘉山附近与 郯庐带相交)。这些断裂相交部位容易局部积累应 变能,且属于应力弱化区域。

图 7 为本区域 5 级以上地震分布图。其中郯庐 带安丘段在公元前 70 年发生了 7 级地震, 莒县— 郯城段发生了 1668 年 8½ 级大地震,现今中小地震 也较多。但郯庐断裂带在 32.5°~34.5°N间,即新 沂—泗洪段没有发生过 5 级以上地震,特别是 32.5° ~34°N间也很少发生小震。这有两种可能:一是 此处不具备发生地震的条件;二是目前虽然地震不 多不大,但它处于应力积累的过程,不发生或很少 发生地震反而是未来会发生大地震以释放积累的应 变能的体现,如 2008 年汶川 8 级地震。







对 0~2 km 浅层的速度结构分析表明,速度结构也存在与上述构造分段几乎完全相同的分段,与 地质学家给出的不同破裂段相同。这绝非偶然,表 明郯庐带新沂到泗洪段可能是断裂的闭锁段,未来 有可能发生较大地震^[18]。

3.4 综合判断未来大震危险地区

图 6 和图 7 显示郑庐带新沂至泗洪段是现今活 动断裂,且是活动断裂的闭锁段。图 3(b)显示的中 地壳低速层在郑庐带临沭至嘉山间及以东地区。图 5 显示了莫霍面深度变化区域。考虑到郑庐带与 NE、NW 向较大断裂的交汇,可以判断郑庐断裂带 江苏段未来可能发生大震的地区为 33.4°~34.1° N,118.2°~118.8°E,包括新沂、睢宁、宿迁、沭阳、泗阳 阳、泗洪、盱眙及嘉山等地,重点是宿迁、沭阳、泗阳 和泗洪。

假定障碍体长度为未来大震震源体长度,根据 现今活动构造断裂长度和中小地震活动闭锁段长 度,郯庐带苏鲁段障碍体范围大约是33°~34.5°N。 郭增建^[21]和张国民^[22]各自给出了震级和震源体的 关系:

$$lgL = (M - 3.3)/2.1$$
(1)

$$gL = 0.5M - 1.8$$
 (2)

式中:M 是震级;L 是地震震源体的尺度,以 km 为 单位。按上面的公式计算,未来此段发生的地震震 级可达8级。(必须说明,本文给出了可能发生大 地震的背景和深部构造环境,并非地震预报)。

4 结论与讨论

使用 1980—2011 年期间的天然地震 Pg、Sg、 Pm、Sm、Pn、Sn 震相到时资料,用多震相地震走时 成像法(反演网格是 30 km×30 km)对郯庐断裂带 鲁苏皖段及邻区(30°~37°N,113°~122°E)反演 三维地壳速度结构,获得成像结果。对比 1668 年 8 ½级地震区和研究区的深部速度结构,主要分析壳 内低速层的分布和莫霍面分布特征,结合断裂活动 和地震活动,给出未来可能发生大震地区的判定。

(1) 在中地壳的 20~25 km 一些地区出现低速 层,位置是郯庐断裂带临沭到定远及以东的地区, 重点是靠近郯庐带的宿迁、泗阳、沭阳、淮阴、睢宁、 泗洪和五河、天长、六合、明光(嘉山)一带,存在低速 体。

(2) 宿迁、沭阳、泗阳和泗洪是莫霍面埋深变化 较大的地方。另外五河、明光一带也有变化。

(3) 与郯庐带相交的断裂主要有:无锡一宿迁 断裂(NW向,在宿迁附近与郯庐带相交)、嘉山—响 水断裂(NE向,在嘉山(明光)附近与郯庐带相交) 和洪泽—沟墩断裂(NE向,在嘉山附近与郯庐带相 交)。

(4)由地震活动的分布、浅层断裂活动的分段 性及浅层速度结构的分段性可判断新沂到泗洪是活 动断裂的闭锁段。

(5)综合判断郯庐断裂带江苏段未来可能发生 大震的地区为 33.4°~34.1°N,118.2°~118.8°E,重 点是宿迁、沭阳、泗阳及泗洪。震级估计可达 8 级。

(6)关于中地壳低速层的存在,本研究没有从 地质学和岩石学角度仔细分析其成因,陈沪生等^[23] 认为下扬子中下地壳低速高导层是重要的滑移面, 即韧性剪切带,也是重要的均衡调节层,此层是地壳 内的弱化层,可以作为应力加载边界,使脆性层更易 积累应力。郯庐带莫霍面深度有变化,但变化幅度 不大,在地质演化过程中莫霍面可能是大规模走滑 运动中的底部拆离面^[24],但不大的差异依然可以反 映孕震构造。郯庐带软流圈顶部上隆^[14,16,25],或许 是太平洋板块向欧亚板块俯冲的末端^[26],其位置恰 在本研究区,故本区断裂以逆冲挤压兼走滑为主要 运动方式或许是地幔的向上冲力与太平洋板块的水 平推挤共同作用的结果。

诚然,仅用本文的指标作为大震发生的判据是

不够的,我们不仅研究了地壳速度结构,还研究了地 壳介质的衰减特征^[27]、泊松比特征、小尺度介质非 均匀性特征^{[28]、},这些结果指向基本一致,反应了从 介质非均匀性角度,结合地质构造和地震活动判断 未来大震位置是可信的。

参考文献(References)

- [1] 刘昌铨,祝治平,李捍东,等.连云港一临沂一泗水测深剖面及 临沂 8.5 级地震深部构造背景[J].地震,1983,3.11-17.
 LIU Chang-quan, ZHU Zhi-ping, LI Han-dong, et al. Liangyungang-Linyi-Sishui Deep Seismic Sounding Profile and Deep Tectonic Background of Linyi M8.5 Earthquake[J].
 Earthquake,1983,3:11-17.(in Chinese)
- [2] 滕吉文.强烈地震孕育与发生的地点、时间及强度预测的思考 与探讨[J].地球物理学报,2010,53(8):1749-1766.
 TENG Ji-wen.Ponder and Research on the Genesis and Occurrence of Strong Earthquakes and the Prediction of Their Place, Time and Intensity[J].Chinese Geophys, 2010, 53(8):1749-1766.(in Chinese)
- [3] 赖晓玲,孙译.中国大陆东部强震区和火山区人工地震探测研究综述[J].地球物理学进展,2006,21(3):722-729.
 LAI Xiao-ling, SUN Yi. Reviewof Deep Seismic Sounding in Strong Earthquake Regions and Volcanic Regions of Eastern China[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(3):722-729.(in Chinese)
- [4] 李清河,郭建康,闵祥仪,等.天水地震区深部构造与地震关系 初步探讨[J].西北地震学报,1991,13(增刊1):68-70.
 LI Qing-he,GUO Jian-kang,MIN Xiang-yi, et al. A Preliminary Study on the Relationship Between Seep Tectonics and Earthquakes in Tianshui Earthquake Area[J]. Northwestern Seismological Journal,1991,13(Suppl):68-70.(in Chinese)
- [5] 周永胜,何昌荣.华北地区壳内低速层与地壳流变的关系及其 对强震孕育的影响[J].地震地质,2002,24(1):124-132. ZHOU Yong-sheng, HE Chang-rong. The Relationship Between Low Velocity Layers and Rheology of the Crust in North China and Its Effect on Strong Earthquake[J].Seismology and Geology,2002,24(1):124-132.(in Chinese)
- [6] 刘昌铨,嘉世旭,刘明军,等.延庆一怀来盆地大震危险性分析 研究[J].地震学报,1997,19(5):517-523.
 LIU Chang-quan, JIA Shi-xu, LIU Ming-jun, et al. Analysis and Study of the Large Earthquake Risk in Yanqing-huailai Basin [J]. Acta Seismologica Sinica, 1997, 19(5): 517-523. (in Chinese)
- [7] 张元生,李清河,徐果明,联合利用走时与波形反演技术研究地 壳三维速度结构(I)——理论与方法[J].西北地震学报, 1998,20(2):8-15.
 ZHANG Yuan-sheng,LI Qing-he,XU Guo-ming.Combined In-

version Technique to Study 3-D Crustal Velocity Structure by Using Seismic Wave Travel Time and Wave Form (I)—— Theory and Method[J].Northwestern Seismological Journal, 1998,20(2):8-15.(in Chinese)

[8] 张元生,李清河,刘耀炜,等.地震层析成像软件[J].西北地震 学报,2003,25(2):170-174. ZHANG Yuan-sheng, LI Qing-he, LIU Yao-wei, et al. The Seismic Tomography Software[J].Northwestern Seismological Journal, 2003,25(2):170-174.(in Chinese)

- [9] 张元生,周民都,荣代潞,等.祁连山中东段地区三维速度结构 研究[J].地震学报,2003,26(2):247-255. ZHANG Yuan-sheng,ZHOU Min-du,RONG Dai-lu, et al. 3-D Velocity Structure in the Central Eastern Part of Qilian Shan [J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 26(2): 247-255.(in Chinese)
- [10] 李清河,张元生,So Gu Kim.朝鲜半岛南部三维地壳速度结构 成像[J].地球物理学报,2007,50(4):1073-1081.
 LI Qing-he, ZHANG Yuan-sheng, So Gu KIM. 3-D Crustal Velocity Tomography in the Southern Korean Peninsula[J].
 Chinese J Geophys,2007,50(4):1073-108.(in Chinese)
- [11] 高尔根,徐果明.二维速度随机分布逐步迭代射线追踪方法
 [J].地球物理学报,1996,39(增刊): 302-308.
 GAO Er-geng,XU Guo-ming. Algorithm for Random Distribution Iterative Ray-tracing in 2D Structure[J]. Chinese J Geophys,1996,39(Supp):302-308. (in Chinese)
- [12] Koch M.Simultaneous Inversion for 3-D Crustal Structure and Hypocenters Including Direct, Refracted and Reflected Phases-I Development, Validation and Optimal Regularization of the Method[J].Geophys J Int, 1993, 112: 385-412.
- [13] Sambridge M.Genetic Algorithms in Seismic Waveform Inversion[J].Geophys J Int, 1992, 109: 323-342.
- [14] 国家地震局地学断面编委会.上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗 地学断面说明书[M].北京:地震出版社,1992.
 Geoseience Transect Research Group of CSB. Explanatory Notes of the Geoseience Transect of Shanghai Fengxian -Neimenggu Alashan[M].Beijing: Seismological Press,1992.
 (in Chinese)
- [15] 黄耘,李清河,张元生,等.郑庐断裂带鲁苏皖段及邻区地壳速 度结构[J].地球物理学报,2011,54(10):2549-2559.
 HUANG Yun,LI Qing-he,ZHANG Yuan-sheng, et al. Crustal Velocity Structure Beneath the Shandong-Jiangsu-Anhui Segment of the Tancheng-Lujiang Fault Zone and Adjacent Areas[J].Chinese Geophys,2011,54(10):2549-2559.(in Chinese)
- [16] 国家地震局地学断面编委会.江苏响水至内蒙古满都拉地学 剖面说明书[M].北京:地质出版社,1991.
 Geoseience Transect Research Group of CSB. Explanatory Notes of the Geoseience Transect of Jiangsu Xiangshui — Neimenggu Mandula[J].Beijing:Geological Pulishing House, 1991.(in Chinese)
- [17] 李清河,张元生,鲍海英,等.据地壳速度结构推测 1668 年山东郯城 8½级大地震震中[J].中国地震,2014,30(1):30-42.
 LI Qing-he, ZHANG Yuan-sheng, BAO Hai-ying, et al. The Crustal Velocity Structure Inference of Epicenter of the M 8½ Earthquake at Tancheng, Shandong, China, in 1668[J].
 Earthquake Research in China,2014, 30(1):30-34.(in Chinese)
- [18] 熊振,李清河,张元生,等.郯庐断裂带鲁苏皖段地壳速度结构 的分段特征及其地质意义[J].地球物理学报,2015.(待刊).
 XIONG Zhen,LI Qing-he,ZHANG Yuan-sheng, et al.Crustal

Velocity Structure Segmentation beneath the Shandong-Jiangsu-Anhui Segment of the Tanlu Fault Zone and Adjacent Area and Its Geological Interpretation[J]. Chinese J Geophys, 2015, (Publishing).(in Chinese)

- [19] 高维明,郑朗荪.郑庐断裂带的活断层分段与潜在震源区的划分[J].中国地震,1991,7(4):87-91.
 GAO Wei-ming, ZHENG Lang-sun. Active Fault Segmentation and the Identification of Potential Seismic Zones along the Taulu Fault[J]. Earthquake Research in China, 1991,7 (4):87-91.(in Chinese)
- [20] 李家灵,晁洪太,崔昭文,等.郑庐活断层的分段及其大震危险 性分析[J].地震地质,1994,16(2):121-126.
 LI Jia-ling, CHAO Hong-tai, CUI Zhao-wen, et al.Segmentation of Active Fault along the Tangchen-Lujing Fault Zone and Evaluation of Strong Earthquake Risk[J].Seismology and Geology,1994,16(2):121-126.(in Chinese)
- [21] 郭增建,秦保燕.震源物理[M].北京;科学出版社,1979.
 GUO Zeng-jian, QIN Bao-yan. Physics of Earthquake Source
 [M].Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)
- [22] 张国民,傅征祥,桂燮泰,等.地震预报引论[M].北京:地震出版社,2001.
 ZHANG Guo-min,FU Zheng-xiang, GUI Xie-tai, et al.Introduction to Earthquake Prediction Theory[M].Beijing: Seismological Press, 2001.(in Chinese)
- [23] 陈沪生,周雪清.下扬子地区 HQ-13 线地球物理一地质综合 解释剖面[J].地质论评,1988,34(5):483-484.
 CHEN Hu-sheng,ZHOU Xue-qing.Outline of Comprehensive Demonstration for Geophysical and Geological Data from HQ-13 Line in the Lower Yangtz Basin, Yangtz Metaplatform[J].
 Geological Review, 1988, 34(5): 483-484.(in Chinese)
- [24] 朱光,宋传中,牛漫兰,等.郯庐断裂带的岩石圈结构及其成因分析[J].高校地质学报,2002,8(3):248-256.
 ZHU Guang,SONG Shuan-zhong,NIU Man-lan, et al.Lithospheric Textures of the Tan-lu Fault Zone and their Genetic Analysis[J].Geological Journal of China Unversities, 2002, 8 (3):248-256.(in Chinese)
- [25] Chen L, Zheng T Y, Xu W W.A Thinned Lithospheric Image of the Tanlu Fault Zopne, Eastern China: Constructed from Wave Equation Based Receiver Function Migration[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(B9):1-15.
- [26] HUANG Jin-li, ZHAO Da-peng. High-resolution Mantle Tomography of China and Surrounding Regions [J]. Geophys Res, 2005,111,B09305.doi:10.1029/2005JB004066.
- [27] LIU Xi-qiang, LI Qing-he, LI Hong, Dispersion Attenuation Structure of the Crust around the Weifang-Jiashan Segment of the Tanlu Fault Zone in North China[J]. Earthquake Science, 2012, 25:83-93.
- [28] 范小平,杨从杰,李清河.介质非均匀性参数对散射波包络的影响[J].地球物理学进展,2013,28(2):0687-0694.
 FANG Xiao-ping,YANG Cong-jie,LI Qing-he. The Effect of Inhomogeneiety Parameters on Scattering Wave Envelopes [J].Progress in Geophys, 2013, 28(2):0694-0694.(in Chinese)