

李清河、张元生、鲍海英等 2014 据地壳速度结构推测 1668 年山东郯城 8½ 级大地震震中, 中国地震, 30(1), 30~42。

据地壳速度结构推测 1668 年山东郯城 8½ 级大地震震中

李清河¹⁾ 张元生²⁾ 鲍海英¹⁾ 金淑梅¹⁾

1) 江苏省地震局, 南京市卫岗 3 号 210014

2) 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000

摘要 分析了 1668 年山东郯城 8½ 级大震区附近地壳深部结构特点, 以天然地震走时层析成像得到的三维地壳速度结构, 主要以中地壳低速层和莫霍面深度为依据, 对 34°~36°N, 118°~119°E 区间按经、纬度和斜向扫描, 得到相应地壳速度剖面。对比结果, 获得与该地震深部结构特点一致的区域, 推测震中范围位于 34.8°~35.2°N, 118.2°~118.7°E, 较合理的震中位于 35.1°N, 118.6°E, 震源深度约 20km。

关键词: 1668 年山东地震 地壳速度结构 速度-深度剖面扫描

[文章编号] 1001-4683(2014)01-030-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 前言

历史地震的位置, 特别是历史大震的位置对地震预测研究非常重要。地震准确定位对研究地震的发震机制、地震断层破裂状况、闭锁段与障碍体的位置、调整单元和积累单元的状况以及推测未来大震位置等都非常重要。由于条件所限, 此前确认历史地震位置主要有 3 种方法: 据史料记载判断推测; 据地震地质考察推测; 用现代小震记录结合地质构造推测。史料记载因侧重面不同和完整性缺失, 使得推测地震震中的误差很大; 地震地质考察受地震造成的地质现象可能遭到破坏而难以准确判定地震宏观震中; 用现代小震记录结合地质构造推测震中位置, 必须假定现代小震与历史大震同源, 但这往往缺少科学依据。就定位精度看, 据史料记载推测震中的精度最差, 通过宏观地质考察得出的结果要好些, 在上述基础上通过现代小震分布的分析得出的震中精度可能更高些。

研究表明, 大地震的发生都有其特定的深部结构, 这种特定的深部结构在相当长时间内不会发生变化, 因此可以根据深部结构特点推测历史大震震中位置。

1668 年 7 月 25 日, 山东省郯城发生 8½ 级大地震, 该大震是我国东部发生的最大地震, 也是我国有记载以来发生的最大地震之一, 地震造成的损失巨大。然而, 由于该地震发生于有现代地震记录之前的 300 多年前, 故这次地震的位置就成为地震学和地震地质学

[收稿日期] 2013-10-30; [修定日期] 2013-12-10

[项目类别] 国家自然科学基金(40974031), 江苏省科技发展项目(BE2009691)资助

[作者简介] 李清河, 男, 生于 1947 年, 研究员, 主要从事地震波理论和应用, 地球深部结构探测研究。

Email: qh_li2005@163.com

研究的重要内容。

此前对这个地震位置的主要研究结果有(马玉香, 2009): ①35°N, 118.5°E(宏观震中)(李善邦); ②35.3°N, 118.6°E(宏观震中)(中央地震工作小组办公室); ③34.8°N, 118.5°E(宏观震中)(高维明等, 1991); ④35.5°N, 118.9°E(宏观震中)(朱书俊等); ⑤莒县和莒南间(宏观震中)(国家地震局地质研究所); ⑥35.5°N, 118.5°E(宇佐美龙夫); ⑦郯城(王安岳); ⑧34.5°N, 118.5°E(高立保等); ⑨35.15°N, 118.65°E(山东省地震局)。

除第⑧项结果外其它结果均是通过地震地质工作得出的宏观震中,第⑧项结果则是根据史料记载、发震断层考察和现代小震分布的分析得出的。宏观震中与微观震中在位置上是有区别的。用现代地震记录推测历史地震震中位置主要是根据大地震和中小地震的丛集效应原理,即发生大地震的地方会发生很多中小地震,反过来,用现今发生的中小地震推测历史上已发生的大震。此方法在保证上述前提成立的基础上,基本可以确定历史大震位置。不过由于无法确定现代小震与历史大震、特别是年代久远的历史大震的关系,故用现代小震推断历史大震震中的可靠性也受到很大局限。

本研究在对 1668 年山东郯城 8½ 级大震附近深部结构进行全面分析的基础上,总结此次大地震附近的深部结构特点,以天然地震层析成像得到的速度结构,主要是以中地壳低速层和莫霍面深度为依据,按经、纬度扫描和斜向扫描,对比扫描结果,将获得满足该地震深部结构特点的区域作为推测震中。

1 山东郯城 8½ 级大地震附近深部结构特点

在 1668 年郯城 8½ 级大地震区附近有多条深部地球物理探测剖面,从中得出了一些基本认识。刘昌铨等(1983)对连云港-泗水-人工地震剖面做了深入解释研究,得出郯城地震附近速度结构,给出了大地震区附近深部结构的形态特点(图 1);杨文采等(1999)据郯城-涟水综合地球物理剖面,得到了该剖面的深部反射面和电性结构;肖骑彬等(2008)对苏鲁造山带及邻区进行的深部电性结构研究,结果与刘昌铨等的人工地震剖面相近,也涉及到此大震区的深部电性;黄耘等(2011)用天然地震资料对研究区及外围做的三维速度结构层析成像,也获得相应剖面结果。

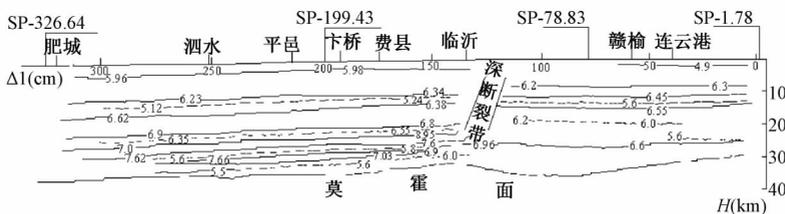


图 1 连云港-临沂-泗水地壳结构横剖面图

(据刘昌铨等(1983)文章图改绘)

依上述结果,可以总结出 1668 年郯城 8½ 级大地震震区深部结构的主要特点:

(1) 郯庐断裂带内及两侧速度结构较为复杂,其西部较东部更复杂些,呈现了较强的非均匀性,郯庐断裂带深部主断裂面向西。

(2) 中地壳上部和下部各存在低速层,中地壳上部低速层以断裂带西部为主,深度约 16~19km,中地壳下部低速层深度约 20.7~23.3km。中下地壳速度横向变化较大。

(3) 莫霍面埋深变化较明显。

(4) 郯庐断裂带内部电阻率低于外部,郯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郯庐断裂带的边界。

(5) 地震多发生在速度变化较大也是电阻率变化较大的地方,且偏向高速一侧。

2 研究方法

2.1 推测微观震中的原则

(1) 此次大地震发生在郯庐带内。前人所给出的宏观震中结果表明,尽管各个结果在位置上有差异,但无一例外的是均发生在郯庐断裂带内(马玉香,2009),此段郯庐断裂带宽度为 20~60km,北宽南窄。就是说,此次大地震发生在东西宽约 20~60km 的区域内。事实上这与地震地质理论也是相符的。

(2) 前人对此次大震区深部结构的研究成果是本研究重要的基本依据。大震区有其特定的深部结构,与区外有明显不同。综合前人和我们对 1668 年郯城 8½ 级大地震区深部结构特点的分析,判断大震区位置。

(3) 宏观震中限定的范围。从前面论述可见,尽管各个结果位置不同,但可以看出,微观震中基本上应该在宏观震中给定的范围,各定位结果的范围在 34°~36°N,118°~119°E。

(4) 等震线分布。对于本次大震不少人给出了几个版本的等震线分布结果,其中用得最多的是高维明等(1991)的等震线图(图 2),这也为我们推测微观震中划定了边界。

从地震层析成像结果看,主要是地壳内低速层的存在和莫霍面埋深的变化,故我们主要以这两个参数判断大震位置。

2.2 研究方法步骤

本研究采用天然地震近震走时反演地壳上地幔三维速度结构的方法,即多震相地震走时成像法(李清河等,1994、2007;张元生等,1998、2003a、2003b),获得研究区地壳三维速度结构,对 34°~36°N,118°~119°E 范围按 0.3°间隔作纵横扫描,获得每隔 0.3°~0.5°的深部速度结构剖面,限于篇幅,本文仅给出部分扫描的剖面图,并对震中可能区域斜向扫描,分析各个剖面的特点,便可得到符合大地震发生深部特点的区域。

3 结果

3.1 速度结构成像

反演范围为 30°~37°N,113°~122°E,地震资料的时间范围为 1980 年 1 月~2011 年 12 月,每个地震事件都被 3 个以上台站记录到,共有 6278 个地震参与反演,能够参加反演计算的震相到时资料为 123022 个(包括 Pg、Sg、Pm、Sm、Pn 和 Sn 震相)。

模型网格数确定为 22×22×7,网格大小不等,沿纬度方向(X轴)其网格线间距分别为 130、30、30、…、30、137.1km,沿经度方向(Y轴)分别为 80、30、30、…、30、97.6km,沿深度方向(Z轴)分别 2、3、5、5、5、5、20km。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(国家地震局地学断面编委会,1992)。本研究涉及的地震台站及地震事件的分布和

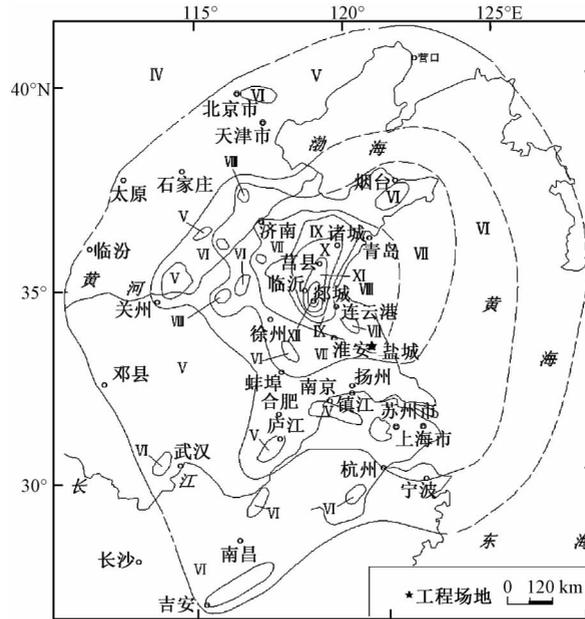


图 2 1668 年山东郯城 8½级地震等震线
(高维明等,1991)

计算网格见图 3。

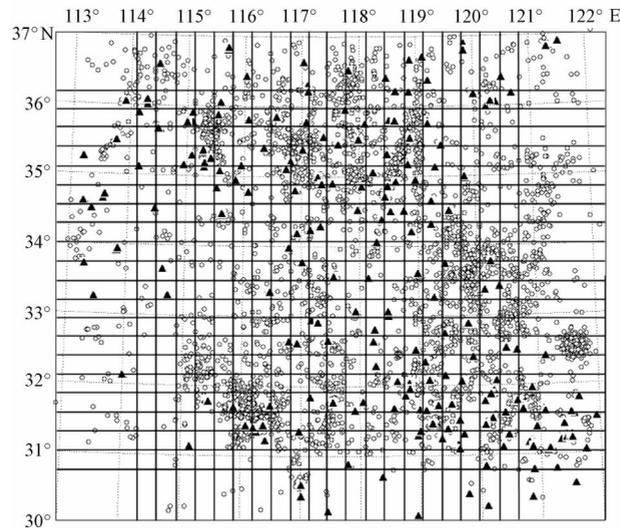


图 3 地震台站、地震事件和计算网格
图中圆圈为地震事件,三角形是地震台站

反演结果用检测板试验检验。图 4 是深度为 10 ~ 15km 层的检测板,由图可见,研究区域的分辨率较高,结果可信。

研究区地壳可分为上、中、下地壳 3 层,上底部埋深约 10 ~ 14km,中地壳底部埋深约 20

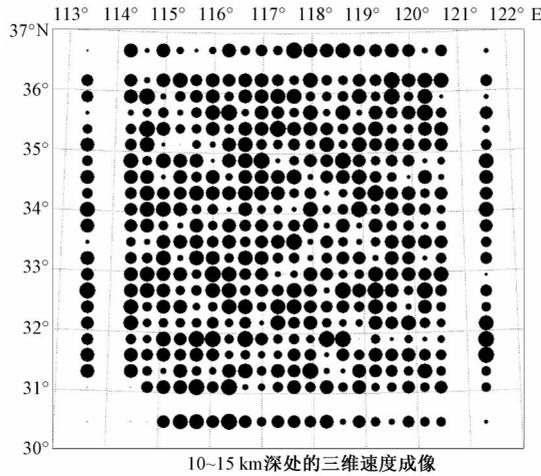


图4 10~15km 层检测板

~25km(黄耘等 2011),在中地壳下部部分地区存在低速层,其深度约 21~24km。

图 5 为研究区域 21~24km 深处的速度分布,对整个区域分层速度结构分析表明,在 20~25km 层,特别是 21~24km 层局部区域存在低速层,图中郯庐带及附近就有低速层存在,图中用红色线围住,在 34.0°N 以北有两个区域存在低速层,即 34.0°~34.3°N 和 34.8°~35.2°N。

图 6 是研究区域莫霍面深度分布,图中红色虚线表示莫霍面深度变化区域,由图可见,34.0°~34.3°N 34.7°~34.9°N 35.1°~35.3°N 间莫霍面深度发生变化。

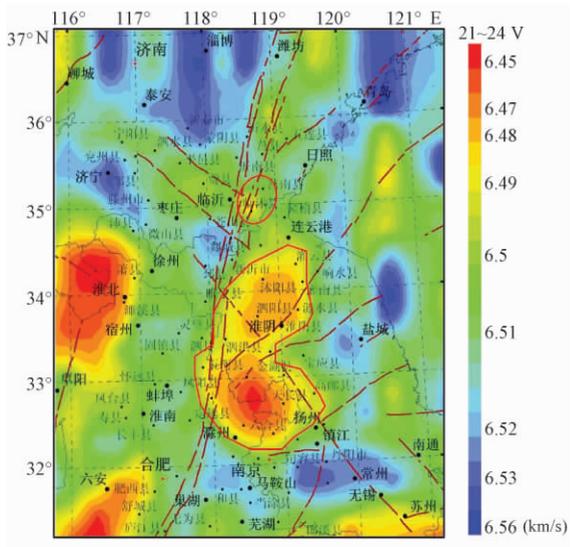


图 5 21~24km 深处的层速度分布

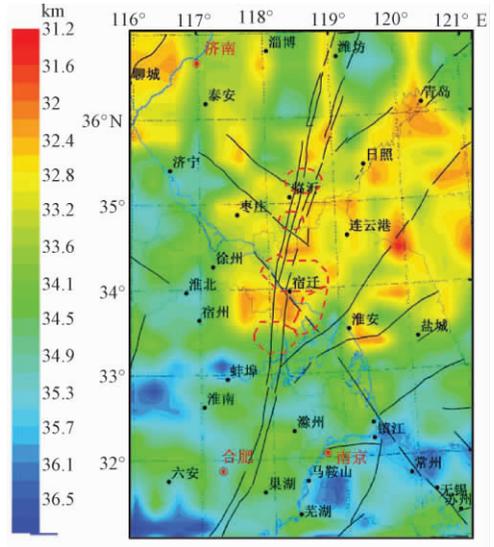


图 6 莫霍面深度分布

3.2 按纬度扫描

图 7 是扫描位置示意图,图 8~9 是按纬度扫描的剖面图。

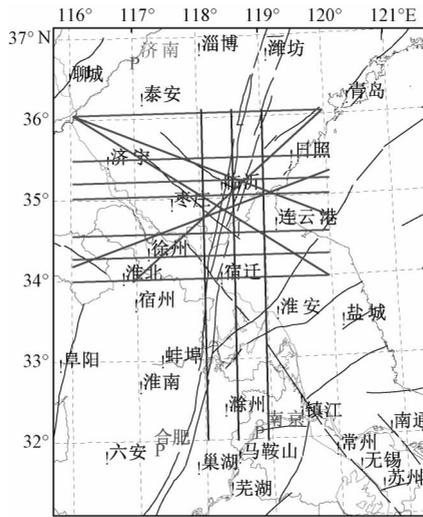


图 7 扫描位置示意图

从图 8 (a) (34°N、116°E ~ 34°N、120°E) 剖面看到: 在约 15 ~ 23km 深度上显现低速层, 特别是在郯庐断裂带下方有一低速体, 此处地面位置是宿迁市附近, 下面深度约 23km。

从图 8 (b) 剖面(34. 3°N、116°E ~ 34. 3°N、120°E) 看到: 在中地壳下部在郯庐带下方有一低速体, 与图 8 (a) 比较, 两图很相似, 不过此低速体变大, 其下面深度约 23km, 此处郯庐带内地面位置大约是新沂市附近。

从图 8 (c) 剖面(34. 6°N、116°E ~ 34. 6°N、120°E) 看到: 在中地壳速度变化较大, 在 100 ~ 150km 和 250 ~ 300km 两处中地壳显现高速区, 但在郯庐断裂带附近没有明显异常。此处郯庐带内地面位置大约是郯城附近。

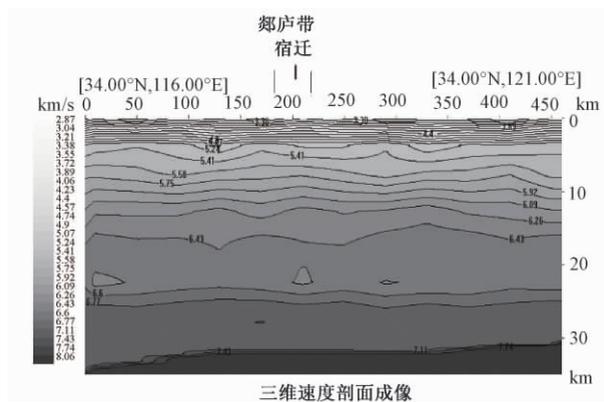


图 8 (a) 过 34°N 沿 EW 方向的速度-深度剖面

本区域沿剖面 34. 8° ~ 35. 05°N 剖面的图像基本相同。从图 8 (d) 剖面(35. 0°N、116°E ~ 35. 0°N、119°E) 看到: 在中地壳下部在郯庐带下方有一低速体, 该低速体底面深度约 23km, 从纬度剖面看, 在 34. 8° ~ 35. 05°N 区间郯庐带范围内中地壳下部有低速体存在, 有

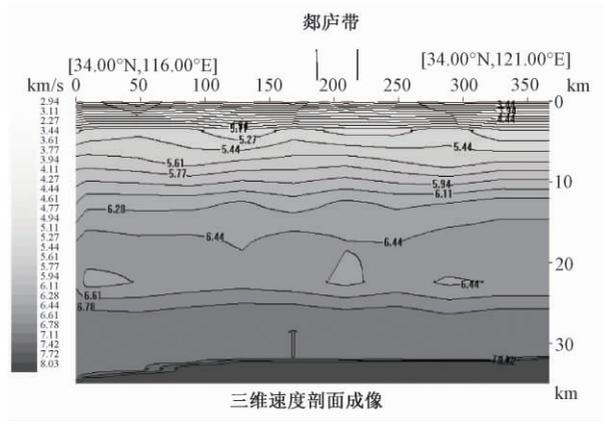


图 8(b) 过 34.3°N 沿 EW 方向的速度-深度剖面

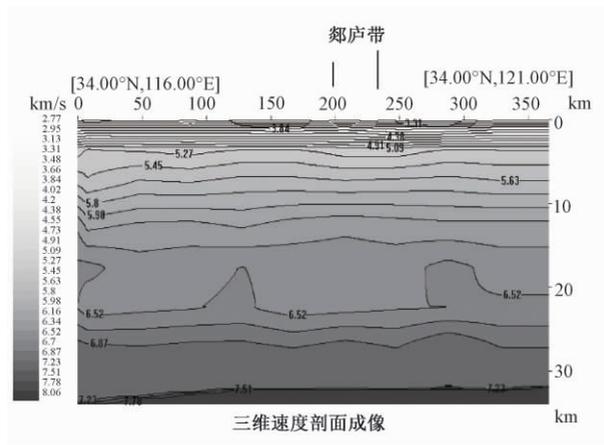


图 8(c) 过 34.6°N 沿 EW 方向的速度-深度剖面

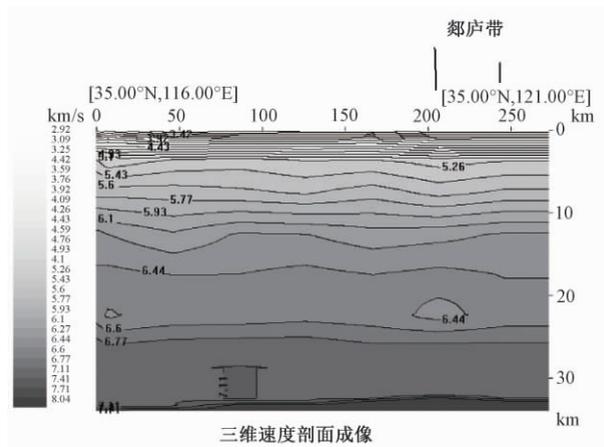


图 8(d) 过 35°N 沿 EW 方向的速度-深度剖面

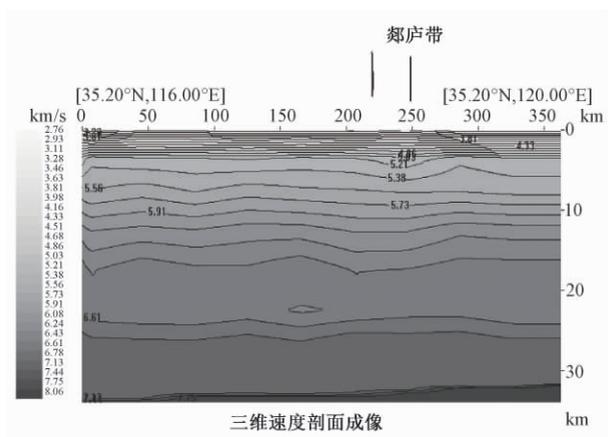


图 8(e) 过 35.2°N 沿 EW 方向的速度-深度剖面

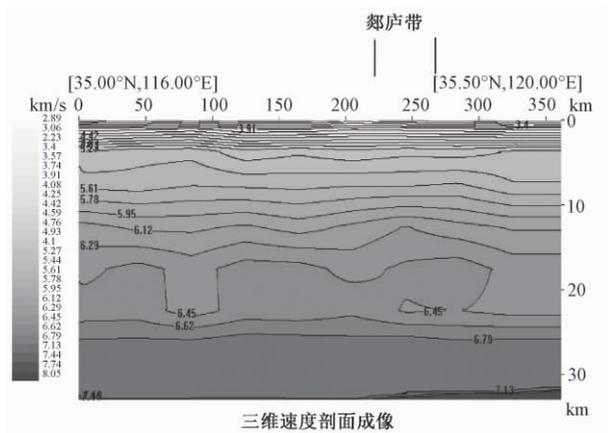


图 8(f) 沿 35.5°N 的速度-深度剖面

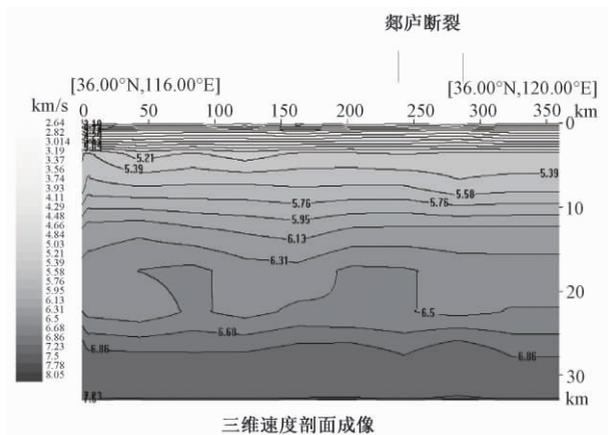


图 8(g) 沿 36°N 的速度-深度剖面

可能是大震位置。

纬度剖面中 $35.1^{\circ} \sim 35.2^{\circ} \text{N}$ 间的图像基本相同。从图 8(e) 剖面 ($35.2^{\circ} \text{N}, 116^{\circ} \text{E} \sim 35.2^{\circ} \text{N}, 120^{\circ} \text{E}$) 看到: 自剖面西端点 $150 \sim 185 \text{km}$ 间在中地壳底部有一低速体, 不过该低速体在郯庐带西面约 $40 \sim 50 \text{km}$, 可能与大震位置无关。

图 8(f) 是 $35.5^{\circ} \text{N}, 116^{\circ} \text{E} \sim 35.5^{\circ} \text{N}, 120^{\circ} \text{E}$ 剖面, 我们注意到 $35.45^{\circ} \sim 35.75^{\circ} \text{N}$ 间有相同图像, 从图可以看到, 在 $250 \sim 270 \text{km}$ 下面, 有一低速层, 其底面深度约 23km , 此处位于郯庐带下方。

图 8(g) 为 $36^{\circ} \text{N}, 116^{\circ} \text{E} \sim 36^{\circ} \text{N}, 120^{\circ} \text{E}$ 剖面, 从图可以看到, 在郯庐带下方, 没有发现低速异常体存在。

综上所述, 按纬度扫描, 可以看到郯庐带在北纬 $34.0^{\circ}, 34.3^{\circ}, 35.0^{\circ}, 35.5^{\circ}$ 及其附近中、下地壳出现低速层, 考虑到地震造成的宏观破坏程度, 34.0°N 及 34.3°N 附近不可能是震中。

3.3 按经度扫描

我们再按经度从 $118^{\circ} \sim 119^{\circ} \text{E}$ 扫描剖面, 其纬度范围是 $32^{\circ} \sim 37^{\circ} \text{N}$ (图 9)。

图 9(a) 为 $31^{\circ} \text{N}, 118^{\circ} \text{E} \sim 36^{\circ} \text{N}, 118^{\circ} \text{E}$ 剖面, 可见在郯庐断裂带内, 没有发现速度异常。郯庐带过此经度的区域较少, 仅有嘉山、五河、宿迁西, 约在 $33^{\circ} \sim 34^{\circ} \text{N}$ 间, 此范围不是速度异常区。

图 9(b) 为 $32^{\circ} \text{N}, 118.5^{\circ} \text{E} \sim 36^{\circ} \text{N}, 118.5^{\circ} \text{E}$ 剖面, 我们注意到自 $118.2^{\circ} \sim 118.7^{\circ} \text{E}$ 间均呈现相同的图像, 则 $118.2^{\circ} \sim 118.7^{\circ} \text{E}$ 与郯庐带相交的区域是由 ($33.65^{\circ} \text{N}, 118.2^{\circ} \text{E}$)、($33.65^{\circ} \text{N}, 118.7^{\circ} \text{E}$)、($35.85^{\circ} \text{N}, 118.7^{\circ} \text{E}$) 和 ($35.85^{\circ} \text{N}, 118.2^{\circ} \text{E}$) 4 点围成的矩形区域, 在图 9(b) 中是 $294 \sim 539 \text{km}$ 的区间, 在此区域内, 中地壳下部有低速层的有两处, 一是 $33.65^{\circ} \sim 34.3^{\circ} \text{N}$ 附近, 此处在前面已论述, 不可能是 1668 年大震区, 另一处在 $34.5^{\circ} \sim 35.02^{\circ} \text{N}$ 间, 而 $35.5^{\circ} \sim 36.0^{\circ} \text{N}$ 并没有发现低速层。从图可见, 过郯庐带的地方有临沂、临沭和郯城等地, 其中地壳下部有低速异常, 最低深度约 $22 \sim 23 \text{km}$ 。

图 9(c) 为 $31^{\circ} \text{N}, 119^{\circ} \text{E} \sim 36^{\circ} \text{N}, 119^{\circ} \text{E}$ 剖面, 我们注意到 $118.8^{\circ} \sim 119^{\circ} \text{E}$ 间的图像相同, 可见在郯庐断裂带内, 没有发现速度异常。

至此, 我们将震中位置缩小到 $34.5^{\circ} \sim 35.1^{\circ} \text{N}, 118.2^{\circ} \sim 118.7^{\circ} \text{E}$ 间。为了更明确区域, 我们又对此区域斜向切了几条剖面(图 10)。

3.4 按斜向扫描

图 10(a) 是 NW-SW 向剖面 ($36^{\circ} \text{N}, 116^{\circ} \text{E} \sim 34^{\circ} \text{N}, 120^{\circ} \text{E}$) , 此剖面从郯庐带的 $34.75^{\circ} \sim 34.86^{\circ} \text{N}$ 间通过, 从图可见, 自剖面端点约 $150 \sim 225 \text{km}$ 间在中地壳上部有一低速异常体, 深度为 $17 \sim 20 \text{km}$, 其地面位置在郯庐带西面, 位于苍山-尼山断裂与蒙阴山前断裂之间。此剖面在郯庐带内并没有异常出现, 即 $34.75^{\circ} \sim 34.86^{\circ} \text{N}$ 间没有出现低速异常。图 10(a) 显示了苍山-尼山断裂与蒙阴山前断裂对地震区域的边界控制作用。

图 10(b) 是 SW-NE 向剖面 ($34.19^{\circ} \text{N}, 116^{\circ} \text{E} \sim 35.31^{\circ} \text{N}, 120^{\circ} \text{E}$) , 此剖面从郯庐带的 $34.84^{\circ} \sim 34.92^{\circ} \text{N}$ 间通过, 从图可见, 在本剖面郯庐带内并没有异常出现, 即 $34.84^{\circ} \sim 34.92^{\circ} \text{N}$ 间没有出现低速异常。

图 10(c) 是 SW-NE 向剖面 ($34.00^{\circ} \text{N}, 117.00^{\circ} \text{E} \sim 36.00^{\circ} \text{N}, 120.00^{\circ} \text{E}$) , 此剖面从郯庐

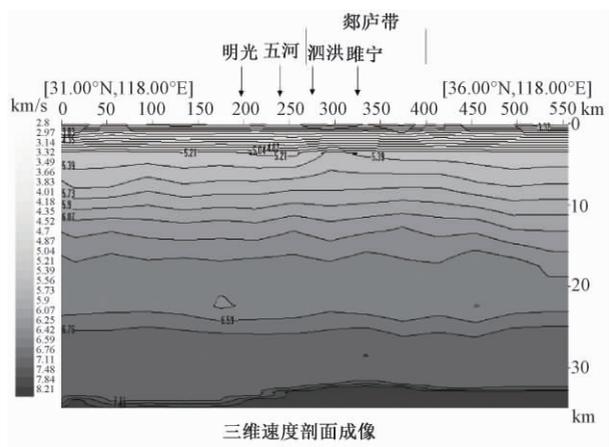


图 9 (a) 过 118°E 沿 SN 向速度-深度剖面

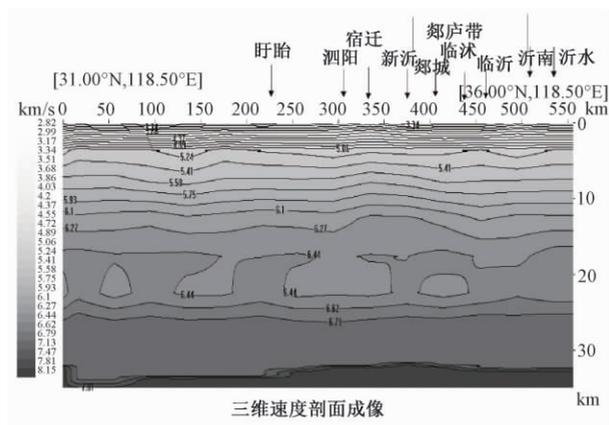


图 9 (b) 过 118.5°E 沿 SN 向速度-深度剖面

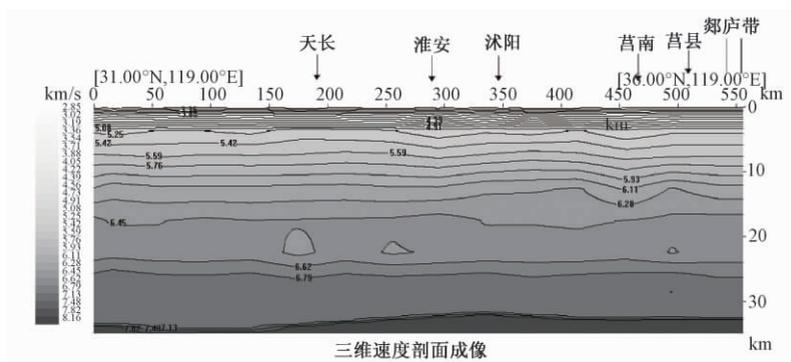


图 9 (c) 过 119°E 沿 SN 向速度-深度剖面

带的 34.87° ~ 35.19°N 间通过, 由图可见, 在本剖面郯庐带内在中地壳下部有低速异常体, 埋深约 21 ~ 23.4 km。可能是大震震源区位置。

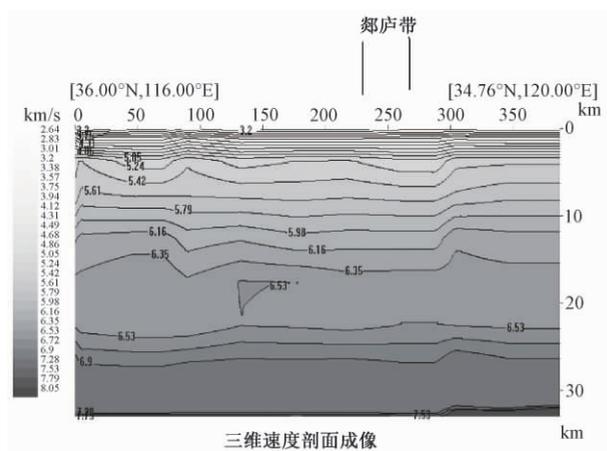


图 10(d) 沿 NW-SE 向速度-深度剖面

35.2°N, 118.2° ~ 118.7°E, 最有可能的区域是 35.1°N, 118.6°E。

关于震源深度, 王华林等认为深度为 23km(王华林等, 1996), 本研究发现, 下地壳低速层的埋深约 21 ~ 24km, 考虑到华北多数大地震均发生在低速层上面, 故推测大地震的深度约 20km。

4 结论

本研究采用天然地震近震走时反演地壳上地幔三维速度结构的方法, 获得研究区地壳三维速度结构, 对 34° ~ 36°N, 118° ~ 119°E 范围按 0.3° 间隔纵横扫描, 获得每隔 0.3° ~ 0.5° 的地壳速度结构剖面, 并对震中区斜向扫描, 分析各个剖面的特点, 得到符合大地震发生深部特点的区域。

研究结果显示, 1668 年郯城 8½ 级大地震推测震中位置是 34.8° ~ 35.2°N, 118.2° ~ 118.7°E, 较合理的位置是 35.1°N, 118.6°E, 震源深度约 20km。

参考文献

- 高维明、郑朗荪, 1991, 郯庐断裂带的活断层分段与潜在震源区的划分, 中国地震, 7(4) 87 ~ 91。
- 国家地震局地学断面编委会, 1992, 上海奉贤至内蒙古阿拉善左旗地学断面说明书, 北京: 地震出版社。
- 黄耘、李清河、张元生等, 2011, 郯庐断裂带鲁苏皖段及邻区地壳速度结构, 地球物理学报, 54(10) 2549 ~ 2559。
- 李清河、张元生、盛国英等, 1994, 南北地震带北段地壳速度结构与大地震, 昌马地震与七级强震研究, 129 ~ 136, 北京: 地震出版社。
- 李清河、张元生、So Gu Kim, 2007, 朝鲜半岛南部三维地壳速度结构成像, 地球物理学报, 50(4) 1073 ~ 1081。
- 刘昌铨、祝治平、李捍东等, 1983, 连云港-临沂-泗水测深剖面及临沂 8.5 级地震深部构造背景, 地震, 3, 11 ~ 17。
- 马玉香, 2009, 1668 年山东郯城 8½ 级地震综述, 国际地震动态, 29 ~ 18。
- 王华林、耿杰, 1996, 1668 年郯城 8.5 级地震震源参数及其讨论, 地震学刊, 4, 27 ~ 33。
- 肖骑彬、赵国泽、王继军等, 2008, 苏鲁造山带及邻区深部电性结构研究, 中国科学 D 辑, 38(10) 1258 ~ 1267。
- 杨文采、胡振远、程振炎等, 1999, 郯城-涟水综合地球物理剖面, 地球物理学报, 142(2) 206 ~ 217。
- 张元生、李清河、徐果明, 1998, 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, 西北地震学报, 20(2) 8 ~ 15。

张元生、李清河、刘耀炜等 2003a, 地震层析成像软件, 西北地震学报, 25(2): 170 ~ 174。

张元生、周民都、荣代潞等 2003b, 祁连山中东段地区三维速度结构研究, 地震学报, 26(2): 247 ~ 255。

Crust velocity structure inference of the epicenter of $M8\frac{1}{2}$ earthquake at Tancheng, Shandong, China, in 1668

*Li Qinghe*¹⁾ *Zhang Yuansheng*²⁾ *Bao Haiying*¹⁾ *Jin Shumei*¹⁾

1) Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China

2) Lanzhou Institute of Seismology, Lanzhou 730000, China

Abstract The deep structure features around the Tancheng $M8\frac{1}{2}$ earthquake in 1668 has been analyzed in the paper. On the basis of the crustal velocity structure of seismic travelttime tomography, especially the low velocity layer of middle crust and Moho depths, we scanned the deep velocity distribution in the area of $34^{\circ} \sim 36^{\circ}\text{N}$, $118^{\circ} \sim 119^{\circ}\text{E}$ along latitude, longitude and deflection direction, and located the area with the feature in agreement with the deep structure features around the Tancheng $M8\frac{1}{2}$ earthquake in 1668. The location is $34.8^{\circ}\text{N} \sim 35.2^{\circ}\text{N}$, $118.2^{\circ}\text{E} \sim 118.7^{\circ}\text{E}$. The suitable location is 35.1°N , 118.6°E with a depth of 20km.

Key words: Epicenter of the Tancheng $M8\frac{1}{2}$ earthquake occurred in 1668 Crustal velocity structure Scan of velocity-depth profiles