

李勇江, 方盛明, 秦建增, 罗翔飞, 黄超杰. 2015. 临汾强震区地壳结构及发震背景研究. 地震学报, 37(6): 937—947. doi:10.11939/jass.2015.06.005.

Li Y J, Fang S M, Qin J Z, Luo X F, Huang C J. 2015. Crustal structure and background of earthquake occurrence in Linfen meizoseismal area. *Acta Seismologica Sinica*, 37(6): 937—947. doi:10.11939/jass.2015.06.005.

## 临汾强震区地壳结构及发震背景研究<sup>\*</sup>

李勇江<sup>1,2)</sup> 方盛明<sup>2),\*</sup> 秦建增<sup>2)</sup> 罗翔飞<sup>2)</sup> 黄超杰<sup>2)</sup>

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国郑州 450002 中国地震局地球物理勘探中心

**摘要** 以诸城—宜川深地震测深速度剖面为约束, 对沿该剖面得到的高精度重力数据进行拟合, 并对临汾强震区平面布格重力异常进行处理, 得到了该地区地壳密度结构及平面重力异常分布. 利用上述结果分析了临汾强震区的地壳结构及构造环境. 结合前人相关研究成果, 认为临汾强震区地壳中存在塑性相对较强的介质, 洪洞和临汾两次历史地震皆发生在其与周边弹性介质的转换边界上. 另外, 临汾凹陷南北两侧局部构造环境存在差异, 在区域应力场作用下, 导致了洪洞地震和临汾地震的发生. 两次地震在发震时间、地点和震级等地震要素上有所不同.

**关键词** 临汾强震区 深地震测深剖面 重力异常 发震背景

doi:10.11939/jass.2015.06.005 中图分类号: P312.1 文献标志码: A

## Crustal structure and background of earthquake occurrence in Linfen meizoseismal area

Li Yongjiang<sup>1,2)</sup> Fang Shengming<sup>2),\*</sup> Qin Jianzeng<sup>2)</sup>  
Luo Xiangfei<sup>2)</sup> Huang Chaojie<sup>2)</sup>

1) *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*

2) *Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, China*

**Abstract:** Using the velocity profile of the Zhucheng—Yichuan deep seismic sounding (DSS) profile as a constraint to fitting the high precision gravity data along the profile, we processed the plane Bouguer gravity anomaly in Linfen meizoseismal area, and obtained the crustal density structure and distribution of the plane gravity anomaly in Linfen meizoseismal area. And then we analyzed the crustal structure and tectonic settings. In combination with previous research results, it is believed that there were more plastic crustal media in Linfen meizoseismal area, and the Hongtong and Linfen historical earthquakes all took place on the elastic-plastic transitional boundary. Moreover, there were differences between north and south sides of Linfen depression in local tectonic environment. Therefore, the Linfen and Hongtong earthquakes occurred under the regional stress field with different occurrence time, epicenter location and

\* 基金项目 国家自然科学基金项目(41274113)资助.

收稿日期 2014-12-29 收到初稿, 2015-03-10 决定采用修改稿.

\* 通讯作者 e-mail: smfang2009@163.com

magnitude.

**Key words:** Linfen meizoseismal area; deep seismic sounding profile; gravity anomaly; background of earthquake occurrence

## 引言

临汾盆地呈 NNE 向展布于山西断陷带中南部, 是历史地震多发区. 据史料记载, 自公元 1177 年起, 该强震区内发生  $M_8$  和  $M_{7\frac{3}{4}}$  大震各一次,  $M \geq 6$  地震 2 次,  $M \geq 5$  地震 6 次, 小震活动也十分频繁(谢富仁等, 1993). 特别是发生于 1303 年洪洞  $M_8$  地震和 1695 年临汾  $M_{7\frac{3}{4}}$  地震, 两次地震时间相隔 392 年, 震中仅相距 40 km(武烈, 1985), 这在华北地区是罕见的. 因此该区域长期以来被地质和地球物理研究者所关注, 并围绕该地区开展了大量的研究工作. 人工地震测深结果表明: 临汾地区地壳厚度约 40 km, 较相邻地区薄; 临汾盆地下方约 11—14 km 处存在一个低速薄层(祝治平等, 1994; 嘉世旭, 刘昌铨, 1995), 对地震转换波的研究也得到了相似的结论(邵学钟等, 1993). 在与低速层一致的位置上, 介质电导率较高(赵文星, 1988; 孙洁等, 1993), 即在临汾盆地下方存在一个低速高导薄层. 临汾强震区内大地热流值较高, 且呈现出较低的重力异常状态(赵文星, 1988; 祝治平等, 1994). 武烈(1985)通过对临汾强震区区域地震活动背景进行研究, 得到了洪洞、临汾两次特大地震的发震特点和闭锁结构, 认为临汾强震区为一共轭结构孕震区. 另外, 刁桂苓等(2007)通过研究临汾强震区内小地震的震源机制, 得到了洪洞、临汾两次特大历史地震震源断层间的相互作用模式, 并进一步对临汾强震区内的地震活动趋势作出了判断. 上述研究获得的基础性资料和成果, 对于揭示临汾强震区地壳深部结构和发震机理有着重要作用.

为研究华北地区地壳结构, 2008 年中国地震局地球物理勘探中心在宜川—诸城一线布设了深地震测深(deep seismic sounding, 简称为 DSS)剖面. 该测线穿过临汾强震区, 得到了包括临汾盆地在内的剖面速度结构(李松林等, 2011). 为深入研究该剖面地壳密度结构, 2013—2014 年沿该剖面布设了一条高精度重力勘探测线(宜川—泰安). 该测线自西向东经过吕梁山、临汾盆地、长治盆地和太行山等主要构造单元, 总长为 640 km, 点距为 2.5 km, 在太行山附近观测点距加密为 1 km(图 1). 本文搜集了华北地区 1:25 万重力异常资料, 旨在综合地震和重力等多种方法, 以点(临汾强震区)、线(DSS 和高精度重力测线)、面相结合的方法, 研究该地区( $110^{\circ}\text{E}$ — $114^{\circ}\text{E}$ ,  $35.5^{\circ}\text{N}$ — $37.5^{\circ}\text{N}$ )介质性质、地下结构与发震机理及动力学等问题. 为克服重力反演的多解性, 本文试图以地震速度结构为约束, 通过重力拟合得到符合地壳实际情况的密度结构, 结合研究区内平面布格重力异常处理结果, 进一步探讨 300 余年间相继发生的洪洞、临汾两次强烈地震的深部构造背景, 这对于揭示和认识该地区强震的孕育环境有着重要的现实意义.

## 1 研究区概况

临汾盆地位于鄂尔多斯地块东南缘的山西断陷带中南段, 北与灵石隆起和太原盆地相隔, 南与峨眉台地和运城盆地为邻, 基本形态为南宽北窄, 走向为 NNE 向. 主控断裂为东西两侧的霍山山前断裂和罗云山山前断裂. 另外, 临汾盆地内还存在诸多横向断裂(安卫平等, 1995).

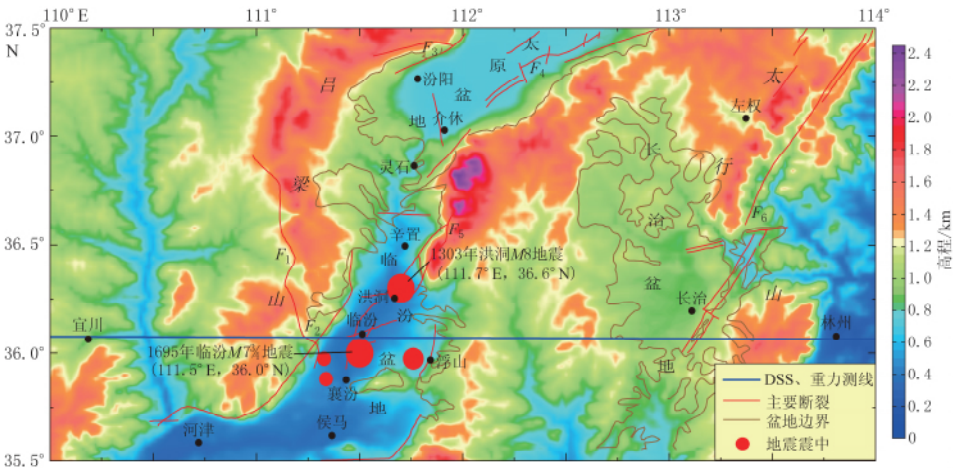


图 1 研究区域内构造背景示意图

$F_1$ : 蒲县断裂;  $F_2$ : 罗云山山前断裂;  $F_3$ : 交城断裂;  $F_4$ : 太谷断裂;  $F_5$ : 霍山山前断裂;  $F_6$ : 晋获断裂

Fig.1 Schematic diagram of tectonic settings in the studied area, where the DSS and gravity profiles are denoted by blue line

$F_1$ : Puxian fault;  $F_2$ : Luoyunshan piedmont fault;  $F_3$ : Jiaocheng fault;  
 $F_4$ : Taigu fault;  $F_5$ : Huoshan piedmont fault;  $F_6$ : Jinhua fault

临汾盆地形成于新生代上新世(张世民, 刘光勋, 1993), 主要由辛置凸起、浮山凸起、襄汾凸起、临汾凹陷和侯马凹陷等 5 个次级构造组成, 其中以临汾凹陷活动性最强, 主要受西侧罗云山断裂中段所控制, 临汾凹陷新生界沉降幅度最大达 2 200 m(贺明华等, 1988). 其基底上覆盖层在临汾凹陷和洪洞凹陷的沉降中心最大达 6 000 m 左右. 基岩主要为变粒岩、混合岩和片麻岩, 夹有角闪岩和石英岩薄层(马宝林, 1993). 该基底以下岩性以霍山出露的结晶基底岩石为代表(马宝林, 1993; 张家声, 1993).

现代地球物理探测发现, 临汾强震区地下 13 km 左右存在低速薄层(刘昌铨, 嘉世旭, 1993; 祝治平等, 1994), 该强震区内多数地震都发生在这一低速薄层附近. 该低速层内介质密度相对较低(刘占坡等, 1993), 其附近介质电导率较高(孙洁等, 1993). 临汾盆地下地壳和上地幔存在局部隆起, 莫霍面最浅处约为 38 km. 另外, 临汾强震区地壳内可能存在一组陡立的深大断裂(邵学钟等, 1993; 赖晓玲等, 2006), 或为地幔物质的上涌通道.

2 资料处理

资料处理分为剖面和平面的两部分. 剖面上, 以速度结构为约束, 通过拟合大比例尺高精度重力实测数据得到剖面密度结构; 平面上, 通过对临汾强震区平面布格重力异常进行分析, 得到不同深度的重力异常分布.

2.1 沿 DSS 测线上的二维密度结构

重力场是地下介质密度信息的综合反映. 由于重力反演结果具有多解性, 因此, 若要得到较为准确的剖面密度信息, 必须加入约束条件. 人工地震测深是研究地下结构常用的方法, DSS 技术在地壳结构探测研究中能够有效地获得探测剖面上的地壳分层构造和层间速度分布, 其垂向分辨能力相对较高. 在开展的人工地震测深剖面上, 采用重力与地震相互约束进行联合正反演拟合, 可以克服单一方法存在的缺陷和不足, 使解释结果更接近测

深剖面的实际情况.

由波动力学给出的纵波波速方程可知, 纵波波速中包含介质密度信息, 因此速度与密度之间可以建立转换关系(周蕙兰, 1990). 通过对华北地区大量地震资料进行研究, 冯锐等(1986)总结出适合华北地区的速度-密度关系式, 即

$$\begin{cases} \sigma = 2.78 + 0.27(v_p - 6.0), & v_p < 5.5, \\ \sigma = 2.78 + 0.56(v_p - 6.0), & 5.5 \leq v_p < 6.0, \\ \sigma = 3.07 + 0.29(v_p - 7.0), & 6.0 \leq v_p < 7.5, \\ \sigma = 3.22 + 0.20(v_p - 7.5), & 7.5 \leq v_p < 8.5. \end{cases} \quad (1)$$

本文将目标地层的地质体视为二度半体. 对于该地质体, 假设其沿  $y$  轴延伸长度为  $L$ ,  $x$ - $z$  截面上坐标为  $(x_i, z_i)$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 的顶点, 绕  $y$  轴旋转  $\varphi_i$  后坐标为  $(u_i, \omega_i)$ , 则其在坐标原点处产生的重力异常可表示为

$$\Delta g = G\sigma \sum_{i=1}^N 2\cos\varphi_i F(i), \quad (2)$$

其中,

$$F(i) = L \ln \left( \frac{u_{i+1} + R_{i+1}}{u_i + R_i} \right) - \omega_i \left[ \arctan \left( \frac{u_{i+1}L}{\omega_i R_{i+1}} \right) - \arctan \left( \frac{u_i L}{\omega_i R_i} \right) \right] + u_{i+1} \ln \left( \frac{L + R_{i+1}}{r_{i+1}} \right) - u_i \ln \left( \frac{L + R_i}{r_i} \right), \quad (3)$$

$$r_i^2 = u_i^2 + \omega_i^2, \quad R_i^2 = u_i^2 + \omega_i^2 + L^2, \quad (4)$$

式中,  $G$  为万有引力常数,  $\sigma$  为地质体剩余密度(Pedersen, 1977; Ramussen, 1979).

以宜川—诸城 DSS 剖面速度结构(李松林等, 2011)为约束条件, 结合式(1)构建初始密度模型, 并利用式(2)对沿 DSS 剖面的高精度重力勘探数据进行正反演拟合, 得到了穿过临汾强震区的高精度重力勘探剖面二维密度结构, 如图 2 所示.

## 2.2 平面重力异常

在获得二维速度、密度结构的基础上, 为了深入研究临汾强震区的深部结构特征, 进一步收集了研究区大比例尺的布格重力异常资料. 由于平面布格异常是不同地质体密度信息的综合反映, 一般浅部地质体引起的异常变化较为剧烈, 多为高频成分; 较深处的地质体引起的异常变化较为平缓. 为研究某些特定目标地质体的信息, 必须在叠加的异常中将目标地质体所引起的异常分离出来, 即对平面布格重力异常进行场分离.

根据小波多尺度分解原理, 对于重力异常  $g(x, y) \in V^2$ , 可以分解为

$$g(x, y) = A_i g(x, y) + \sum_{j=1}^i \sum_{i=1}^{i-1} D_j^i g(x, y), \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (5)$$

记作

$$g(x, y) = A_i g + \sum_{j=1}^i D_j g, \quad (6)$$

式中:  $A_i g$  为重力的第  $i$  阶近似, 即异常中的低频成分;  $D_j g$  为经  $j$  次分解后得到的各阶小波细节(侯遵泽, 杨文采, 1997). 另外, 由于功率谱斜率增大与中心场源埋藏深度增加成正比, 因此利用功率谱斜率可以得到小波细节对应的场源深度信息(杨文采等, 2001).

本文通过多尺度小波分解法对平面布格异常进行滤波, 消除高频异常和区域异常的影响.

响,以得到目标层的重力异常,如图 3 所示. 通过功率谱斜率判断目标层的异常深度大致为 15—18 km,与临汾地震和洪洞地震震源深度一致(武烈,1985). 结合二维密度结构图(图 2)可知,该深度对应临汾盆地下方低密度介质的中下部位.

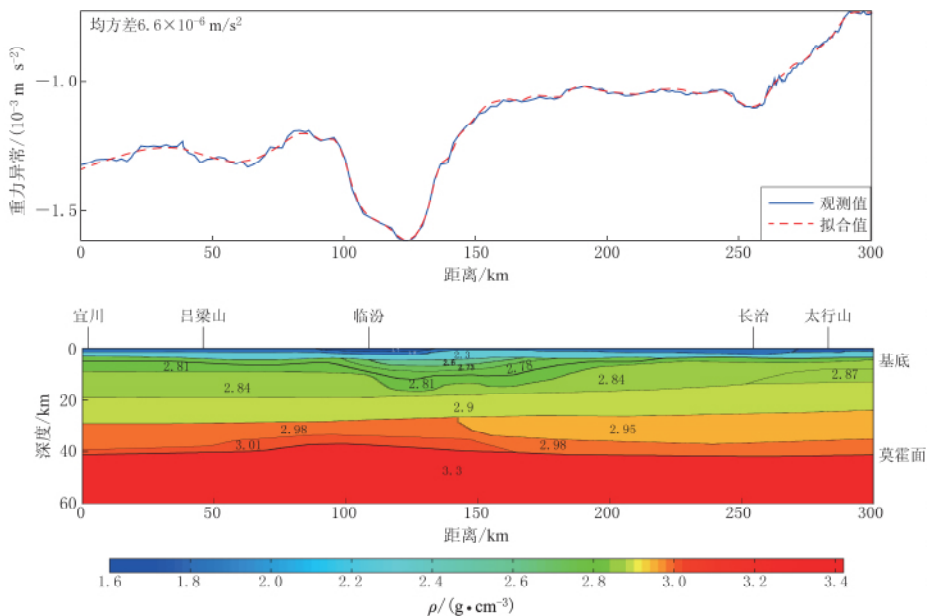


图 2 穿过临汾强震区的高精度重力勘探剖面二维密度结构

Fig. 2 Two-dimensional density structure of high-precision gravity exploration profile passing through the Linfen meizoseismic area

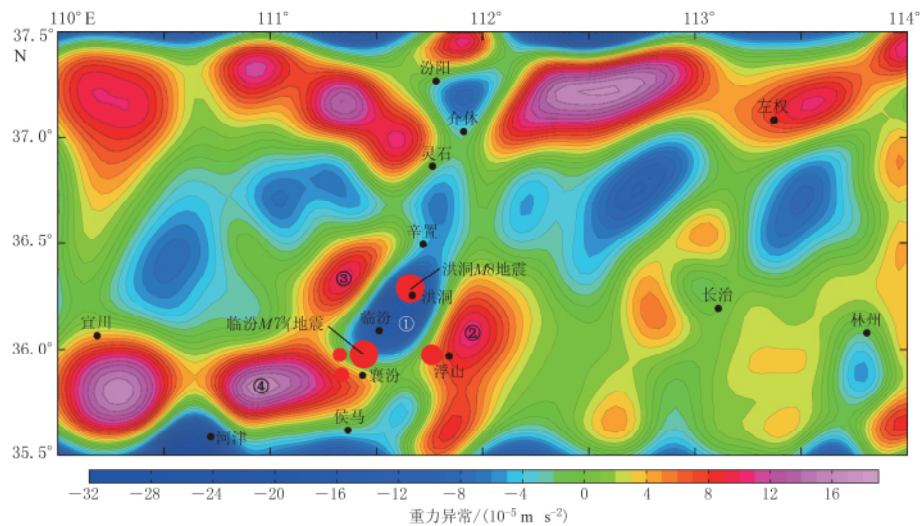


图 3 临汾强震区平面重力异常

区域①为低重力异常区; 区域②—④为高重力异常区

Fig. 3 Plane gravity anomaly in Linfen meizoseismic area

The area ① is low gravity anomaly area, and the area ②—④ are high gravity anomaly area

由图 3 可以看出,临汾强震区重力异常大致由一个低异常区①和 3 个高异常区②—④构成.历史上临汾地震和洪洞地震分布在这一椭圆形低异常区长轴两端的重力异常梯度带上.这些异常梯度带有可能代表了不同次级构造的边界.为了突出这些边界,我们对滤波结果进行一阶求导,得到的重力异常水平一阶导数模如图 4 所示.

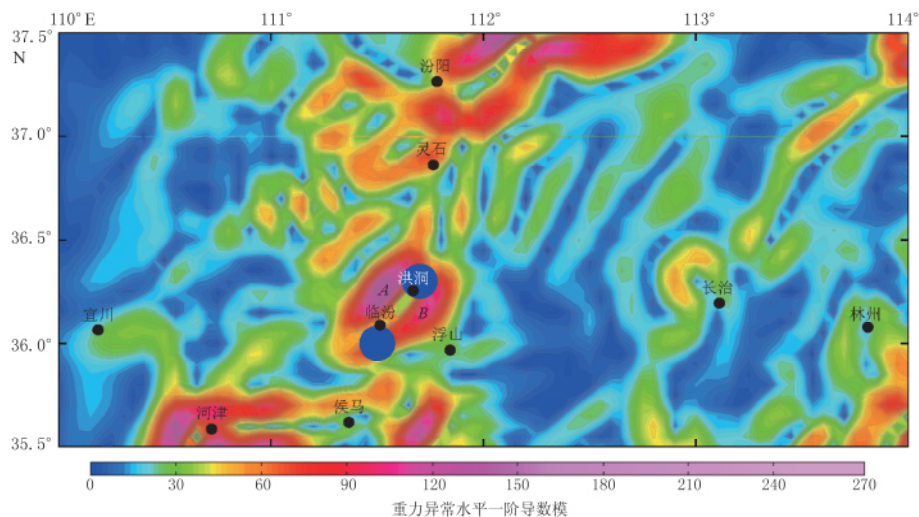


图 4 临汾强震区重力异常水平一阶导数模. A 和 B 为重力异常梯度带

Fig. 4 Horizontal first-order derivative modulus of gravity anomaly in Linfen meizoseismal area, where A and B are gravity anomaly gradient zones

### 3 分析与解释

一般而言,地震发生需要具备两个基本因素,一个是力源,另一个是孕震条件,即有能够储存应变能的介质和能够发生相对运动的构造.因此,下文将从介质和构造两方面来讨论临汾强震区的结构特征和发震背景.

#### 3.1 区域介质

高精度重力观测值表明临汾地区总体呈西低东高的态势,但在临汾盆地却出现明显的低重力异常,其最低值达到 $-1.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ 左右(图 2),说明在临汾盆地地壳内存在低密度构造.从本文得到的密度剖面可以对重力异常的这种变化特征作出解释.由密度剖面可以看出,临汾盆地内沉积盖层厚度约为 2 km,密度在  $1.7\text{—}1.8 \text{ g/cm}^3$  之间,对应地表浮土和第四纪沉积物,基底最深处约为 5 km.临汾盆地上地壳内存在明显的低密度构造,其深度最大可达 18 km,介质密度为  $2.73\text{—}2.81 \text{ g/cm}^3$ ,低于其左右两侧( $2.84 \text{ g/cm}^3$ ),这是造成临汾盆地出现较大负重力异常的主要原因;临汾盆地地下地壳内出现 3 个不同的密度层,其位置位于上述低密度构造的正下方,在深度约为 30—40 km 的位置上发生转换,可能是盆地内深大断裂(祝治平等, 1994)的反映.由于均衡作用,自吕梁山至临汾盆地,莫霍面(深度约为 38 km)相对两侧(莫霍面深度为 41—42 km)隆起,地壳减薄,可能会导致深部塑性较强的物质沿壳内断裂上涌.

研究人员通过对深地震测深剖面的研究,发现临汾盆地下方存在明显的低速薄层(厚约 3 km),其深度大致为 14—16 km(贺明华等, 1988; 邓起东等, 1999).地震转换波的研



究也得到了一致的结果(邵学钟等, 1993). 在与低速层对应的位置上存在高导体(刘占坡等, 1993; 孙洁等, 1993), 洪洞、临汾两次历史大震的震源(深度约 15 km)与这一高导低速层位于同一深度. 上述低速层对应的密度值与本文剖面中相应深度的密度值一致, 因此本文认为, 图 2 中上地壳的介质组分或与上述低速体相似. 这种低速高导介质弹性相对较弱, 也就是说, 这种介质的边界是弹性介质与塑性介质的分界面. 当不同构造地块之间产生相对运动时, 在该界面介质上易积累应变能, 若应变能超过介质的承受极限, 介质便会发生破裂、释放能量从而产生地震.

由图 3 可以看出, 在 15—18 km 深度范围内, 临汾强震区显示出较低的重力异常, 即在此深度范围内存在密度较低的介质. 在介质组分差异不大的情况下, 密度较低的介质通常对应较低的硬度. 结合上文可以推断, 低重力异常区内介质塑性较周边地区强, 而周边介质的弹性则相对较高. 在这些弹性不同的地块发生相对运动的过程中, 弹-塑性转换边界上弹性较强一侧的介质内容易积累应变能进而发生破裂, 形成地震. 因此可认为异常边界上的重力梯度带是弹-塑性介质边界在平面上的反映, 地震容易发生在这些梯度带上. 事实上, 洪洞地震和临汾地震的宏观震中也正是位于这些位置上.

### 3.2 区域构造

对重力异常进行滤波后(图 3), 研究区内不同的密度构造得以突出. 特别是在临汾强震区周边, 其异常尤为明显, 位于中心的低异常区被周边 3 个高异常区环绕, 其边界附近重力异常梯度大. 结合地质资料可知, 低重力异常区在地表的投影对应于临汾凹陷(区域①), 3 个高重力异常区的投影分别对应浮山凸起(区域②)和吕梁山隆起(区域③和④). 1303 年洪洞 M8 地震发生在低重力异常区①与高异常区②和③之间, 1695 年临汾 M7 $\frac{3}{4}$ 地震则发生在低异常区①与高异常区④的边界上. 因此, 洪洞和临汾两次地震局部环境可能与这 4 组不同介质所对应的次级构造单元有关.

重力异常水平一阶导数模(图 4)显示出低重力异常区边缘的重力异常梯度带可以分为 A 和 B 两组, 它们代表了不同次级密度构造的边界, 是弹-塑性介质的转换边界. 重力异常梯度带 A 在地表的投影对应临汾盆地与吕梁山隆起的边界, 梯度带 B 对应临汾凹陷与浮山凸起的分界线. 洪洞地震震中位于 A 和 B 两组重力异常梯度带(NNE 向)的交接部位上, 而临汾地震震中则位于 B 组梯度带的尾端(ENE-近 EW 向). 两处震中位置所处的梯度带走向与一般认为的临汾地震和洪洞地震的发震断层走向(武烈, 1985)接近.

### 3.3 发震背景

临汾强震区位于鄂尔多斯地块与华北平原的转换边界上. 断裂带内的断陷盆地均为右旋正断裂式地堑型盆地(邓起东等, 1999). 以往研究结果显示, 控制临汾盆地地震活动的应力场较为稳定, 表现为 NE-ENE 向挤压, NW-WNW 向拉张(王汝雕, 1983; 安美建, 李方全, 1998; 贾晓东等, 2012). 根据山西地区 GPS 资料可以看出, 山西断陷带整体围绕着太原盆地北部作逆时针运动. 临汾盆地呈北压南张的应力状态, 其北部挤压作用强烈, 东南部以 NW 向的拉张作用为主. 临汾盆地东侧位移速度较西侧大, 呈拉张状态(郭良迁等, 2010). 从临汾盆地区域位移矢量速度结果(郭良迁等, 2010)(图 5)来看, 太原盆地及临汾北部地区向洪洞地区作中心汇聚状相对运动, 其东部浮山构造和西部吕梁山构造从两侧挤压临汾地区, 而临汾地区南部构造之间的相对运动方向为近 EW 向, 但速率不大.

因此, 临汾地区周边的地震活动多与图 3 中重力异常区所对应的构造单元间的介质差

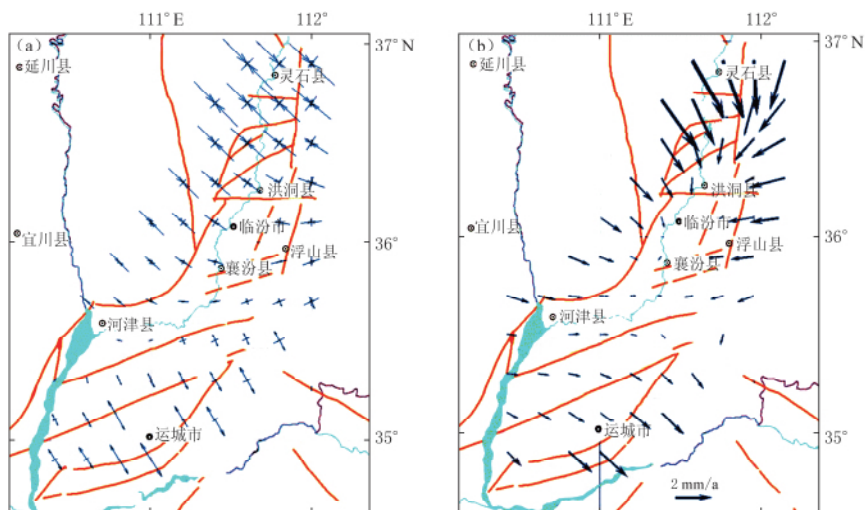


图 5 2006—2009 年临汾盆地主应变率(a)和位移矢量速度(b)(引自郭良迁等, 2010)

Fig. 5 Principal strain rate (a) and displacement vector velocity (b) of Linfen basin during the period of 2006–2009 (after Guo *et al.*, 2010)

异及相对运动有关。在西部的构造单元向 SE 方向运动的过程中, 遭遇东部构造单元的阻挡, 在二者的共同挤压下, 位于中心的椭圆形区域(区域①)南北两侧将成为应变能最为集中的区域。这种作用在洪洞地震震中附近表现得尤为明显。在 3 个次级构造单元(区域①—③)的共同作用下, 位于洪洞附近的地壳介质在弹-塑性转换边界上积累了大量应变能, 最终引发弹性介质破裂, 产生地震。由于临汾盆地北段受霍山山前断裂控制(宋美琴等, 2012), 故洪洞地震的发震断层应与霍山山前断裂一致, 呈 NNE 向。

低密度体南部同样受到来自西侧构造单元的挤压作用, 但有所不同的是, 处在西南部的高密度体与中心低密度体的边界为 NW–SE 向。从图 4 可以看出, 该处东西两侧的高密度体(区域②和③)并未直接相连, 因此来自东部的阻挡也比北部弱。在西部构造单元向东运动的过程中, 其与中心的低密度异常区之间的相对运动方向以 EW 向的左旋走滑运动为主, 因此临汾地震的发震断层应为近 EW 向的左旋走滑断层。从图 4 还可以看出, 临汾地震发生在 A 和 B 两条梯度带的转换部位上, 其发震断层可能位于该转换部位上近 EW 向的横向断裂。因此可以说, 洪洞地震和临汾地震发生在同一构造单元上, 但两次地震所处的局部构造环境有所差异。由于两次地震发生在同一构造单元上, 因此在相同的时期这两个区域积累的应变能水平是相当的。但由于两次地震所处的局部构造环境的差异, 导致了其在发震时间、发震断层和震级上有所不同, 而且两次地震中任何一次地震的单独发生都不足以使另外一次地震所在区域的应力得到释放, 但可能会诱发另一地区地震的发生(秦保燕, 阎维彰, 1992; 刁桂苓等, 2007)。

## 4 讨论与结论

临汾强震区内相继发生洪洞和临汾两次历史大震, 这在华北地区地震史上极其罕见, 从本文研究结果可以看出, 两次大震是由于其独特的介质条件和构造环境所造成的, 具体表现为:



1) 临汾强震区地下存在塑性相对较强的介质,在与周边弹性较强介质的分界面上,即弹-塑性介质的转换边界附近容易积累应变能,这是临汾强震区发生大地震的介质条件。

2) 在大震震源所处深度范围内,地壳中的低密度、低强度构造被周围的高强度地块所限制,它们之间的重力梯度带代表了这些密度不同的次级构造的边界,即弹-塑性介质转换边界。洪洞地震主要是由重力异常区①—③所对应的次级构造之间的相对运动所造成的,作为盆地主控断裂的霍山山前断裂也从附近穿过;而临汾地震主要由重力异常区①和④所对应的次级构造之间的近 E-W 向相对运动所引发的,发震断层为局部横向断裂。南北两处局部构造有所不同,在相同的区域构造环境下同时积累应变能,类似一种“并联”关系,因此两次地震在发震时间上只相隔近 400 年,且在发震断层和震级上存在一定差异。

另外,张先等(2003)认为华北地区  $M \geq 8.0$  地震区存在 3 个共同特征:① 震源区存在超壳断裂;② 地壳中存在电磁特性和强度较大的构造地块,大地震往往发生在其边缘位置;③ 震源区地壳中存在低速层构造。从本文所得结果来看,这 3 个共同特征在临汾强震区也都有体现。

综上,本文主要利用重力与地震相结合的方法,从介质物性和构造两方面对临汾强震区的结构特征和发震背景进行了讨论,并对洪洞和临汾两次历史大震的相继发生给出了解释。然而临汾强震区内何以形成这一明显的低重力异常区以及周边的特殊构造,仍未能给予充分的解释。本文认为,从地球动力学、地质学等角度对上述问题进行研究,对于深入揭示临汾强震区的构造特征及孕震模式有着重要的意义。

中国地质大学(北京)姚长利教授和郑元满工程师在数据处理、解释过程中给予了帮助,中国地震局地球物理勘探中心郭文斌、徐志萍工程师以及中国地震局地球物理研究所张恩会等在论文撰写过程中提出了宝贵意见,谨在此一并表示感谢。

## 参 考 文 献

- 安美建,李方全. 1998. 山西地堑系现今构造应力场[J]. 地震学报, 20(5): 461-465.
- An M J, Li F Q. 1998. The recent stress field in Shanxi Graben[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 20(5): 461-465 (in Chinese).
- 安卫平,苏宗正,程新原. 1995. 临汾盆地的横向断裂[J]. 山西地震, (3/4): 68-77.
- An W P, Su Z Z, Cheng X Y. 1995. Lateral fractures in Linfen basin[J]. *Earthquake Research in Shanxi*, (3/4): 68-77 (in Chinese).
- 邓起东,程绍平,闵伟,杨桂枝,任殿卫. 1999. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论[J]. 地质力学学报, 5(3): 13-21.
- Deng Q D, Cheng S P, Min W, Yang G Z, Ren D W. 1999. Discussion on Cenozoic tectonics and dynamics of Ordos block[J]. *Journal of Geomechanics*, 5(3): 13-21 (in Chinese).
- 刁桂苓,胡新亮,张骁,李光,马利军,王成亮,路正. 2007. 洪洞临汾大震震源断层的相互作用和地震趋势分析[J]. 华北地震科学, 25(2): 1-4.
- Diao G L, Hu X L, Zhang X, Li G, Ma L J, Wang C L, Lu Z. 2007. Analysis on the interaction between the focal fault of Hongtong and Linfen earthquake and its earthquake tendency[J]. *North China Earthquake Sciences*, 25(2): 1-4 (in Chinese).
- 冯锐,严惠芬,张若水. 1986. 三维位场的快速反演方法及程序设计[J]. 地质学报, 60(4): 390-403.
- Feng R, Yan H F, Zhang R S. 1986. The rapid inversion of 3-D potential field and program design[J]. *Acta Geologica Sinica*, 60(4): 390-403 (in Chinese).

- 郭良迁, 占伟, 杨国华, 薄万举. 2010. 山西断陷带的近期位移和应变率特征[J]. 大地测量与地球动力学, **30**(4): 36–42.
- Guo L Q, Zhan W, Yang G H, Bo W J. 2010. Short-term displacement and characteristics of strain rate of Shanxi fault subsidence zone[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **30**(4): 36–42 (in Chinese).
- 贺明华, 苏宗正, 阎凤忠. 1988. 临汾盆地新构造格局与地震活动[J]. 山西地震, (4): 7–12.
- He M H, Su Z Z, Yan F Z. 1988. The neotectonic pattern and seismic activity of Linfen basin[J]. *Earthquake Research in Shanxi*, (4): 7–12 (in Chinese).
- 侯遵泽, 杨文采. 1997. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析[J]. 地球物理学报, **40**(1): 85–95.
- Hou Z Z, Yang W C. 1997. Wavelet transform and multi-scale analysis on gravity anomalies of China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **40**(1): 85–95 (in Chinese).
- 嘉世旭, 刘昌铨. 1995. 华北地区人工地震测深震相与地壳结构研究[J]. 地震地质, **17**(2): 97–105.
- Jia S X, Liu C Q. 1995. Study on the seismic phase of DSS in North China[J]. *Seismology and Geology*, **17**(2): 97–105 (in Chinese).
- 贾晓东, 武艳强, 闫伟, 杜雪松. 2012. 山西断裂带跨断层形变观测资料动态特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, **32**(3): 31–35, 40.
- Jia X D, Wu Y Q, Yan W, Du X S. 2012. Dynamic analysis of Shanxi fault zone cross-fault deformation observational data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **32**(3): 31–35, 40 (in Chinese).
- 赖晓玲, 孙译, 刘志. 2006. 华北强震区地震测深研究[J]. 大地测量与地球动力学, **26**(1): 55–62.
- Lai X L, Sun Y, Liu Z. 2006. Study of deep seismic sounding in strongly seismic regions of North China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **26**(1): 55–62 (in Chinese).
- 李松林, 赖晓玲, 刘宝峰, 王志铄, 何加勇, 孙译. 2011. 由诸城—宜川人工地震剖面反演结果看太行山两侧岩石圈结构的差异[J]. 中国科学: 地球科学, **41**(5): 668–677.
- Li S L, Lai X L, Liu B F, Wang Z S, He J Y, Sun Y. 2011. Differences in lithospheric structures between two sides of Taihang Mountain obtained from the Zhucheng-Yichuan deep seismic sounding profile[J]. *Science China: Earth Sciences*, **54**(6): 871–880.
- 刘昌铨, 嘉世旭. 1993. 山西高原及临汾盆地地壳上地幔速度结构[G]//山西临汾地震研究与系统减灾. 北京: 地震出版社: 231–235.
- Liu C Q, Jia S X. 1993. Velocity structure of crust and upper mantle in Shanxi plateau and Linfen basin[G]//*Earthquake Research and Reduce Disaster Systematically in Shanxi Linfen*. Beijing: Seismological Press: 231–235 (in Chinese).
- 刘占坡, 殷秀华, 刘铁生. 1993. 利用重力资料研究临汾及其周围地区地壳上地幔结构特征[G]//山西临汾地震研究与系统减灾. 北京: 地震出版社: 215–223.
- Liu Z P, Yin X H, Liu T S. 1993. Research on the crust and upper mantle structure in Linfen and its surroundings with gravity data[G]//*Earthquake Research and Reduce Disaster Systematically in Shanxi Linfen*. Beijing: Seismological Press: 215–223 (in Chinese).
- 马宝林. 1993. 山西裂谷带南段地壳岩相结构和壳内异常层[G]//山西临汾地震研究与系统减灾. 北京: 地震出版社: 387–396.
- Ma B L. 1993. Petrographic structure and abnormal layer of crust in southern Shanxi rift belt[G]//*Earthquake Research and Reduce Disaster Systematically in Shanxi Linfen*. Beijing: Seismological Press: 387–396 (in Chinese).
- 秦保燕, 阎维彰. 1992. 1695 年临汾 8 级大震成因讨论[J]. 灾害学, **7**(3): 14–18.
- Qin B Y, Yan W Z. 1992. Study on the cause of 1695 Linfen great earthquake[J]. *Journal of Catastrophology*, **7**(3): 14–18 (in Chinese).
- 邵学钟, 张家茹, 徐朝繁, 李振江, 李鸿生. 1993. 山西洪洞 8 级大震区霍山深部断裂的地震转换波测深研究[G]//山西临汾地震研究与系统减灾. 北京: 地震出版社: 251–260.
- Shao X Z, Zhang J R, Xu C F, Li Z J, Li H S. 1993. Study on seismic converted wave sounding on Huoshan deep fault in Hongtong  $M=8.0$  seismic area, Shanxi Province[G]//*Earthquake Research and Reduce Disaster Systematically*

- in *Shanxi Linfen*. Beijing: Seismological Press; 251–260 (in Chinese).
- 宋美琴, 郑勇, 葛黎, 李斌. 2012. 山西地震带中小震精确位置及其显示的山西地震构造特征[J]. 地球物理学报, **55**(2): 513–525.
- Song M Q, Zheng Y, Ge C, Li B. 2012. Relocation of small to moderate earthquakes in Shanxi Province and its relation to the seismogenic structures[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(2): 513–525 (in Chinese).
- 孙洁, 史书林, 江钊, 王继军, 晋光文, 徐常芳. 1993. 山西临汾盆地及外围地区大地电磁与地壳构造活动研究[G]//山西临汾地震研究与系统减灾. 北京: 地震出版社: 261–274.
- Sun J, Shi S L, Jiang Z, Wang J J, Jin G W, Xu C F. 1993. Study on magnetotelluric and crustal tectonic activity in Linfen basin and its outlying areas in Shanxi Province[G]// *Earthquake Research and Reduce Disaster Systematically in Shanxi Linfen*. Beijing: Seismological Press; 261–274 (in Chinese).
- 王汝雕. 1983. 临汾盆地历史强震发震条件的初步讨论[J]. 山西地震, (3): 1–7.
- Wang R D. 1983. Preliminary discussion of historical earthquakes occurred in Linfen basin[J]. *Earthquake Research in Shanxi*, (3): 1–7 (in Chinese).
- 武烈. 1985. 洪洞和临汾八级地震的闭锁结构及发震构造[J]. 地震研究, **8**(1): 65–72.
- Wu L. 1985. The locked configuration and seismogenic structure of Hongdong and Linfen earthquakes ( $M=8$ ) [J]. *Journal of Seismological Research*, **8**(1): 65–72 (in Chinese).
- 谢富仁, 刘巍, 梁海庆, 刘光勋. 1993. 山西断陷带及周缘构造应力场分析[G]//山西临汾地震研究与系统减灾. 北京: 地震出版社: 59–66.
- Xie F R, Liu W, Liang H Q, Liu G X. 1993. Analysis of stress field in Shanxi fault subsidence zone and its surrounding area[G]// *Earthquake Research and Reduce Disaster Systematically in Shanxi Linfen*. Beijing: Seismological Press; 59–66 (in Chinese).
- 杨文采, 施志群, 侯遵泽, 程振炎. 2001. 离散小波变换与重力异常多重分解[J]. 地球物理学报, **44**(4): 534–541.
- Yang W C, Shi Z Q, Hou Z Z, Cheng Z Y. 2001. Discrete wavelet transform for multiple decomposition of gravity anomalies[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **44**(4): 534–541 (in Chinese).
- 张家声. 1993. 临汾地区地壳结构和强震成因[G]//山西临汾地震研究与系统减灾. 北京: 地震出版社: 397–405.
- Zhang J S. 1993. Crust structure and cause of strong earthquakes in Linfen area[G]// *Earthquake Research and Reduce Disaster Systematically in Shanxi Linfen*. Beijing: Seismological Press; 397–405 (in Chinese).
- 张世民, 刘光勋. 1993. 山西及临区新构造运动分区及其特征概述[G]//山西临汾地震研究与系统减灾. 北京: 地震出版社: 23–30.
- Zhang S M, Liu G X. 1993. Overview of divisions of neotectonics and its features in Shanxi and its adjacent area[G]// *Earthquake Research and Reduce Disaster Systematically in Shanxi Linfen*. Beijing: Seismological Press; 23–30 (in Chinese).
- 张先, 张先康, 刘敏, 赵丽. 2003. 华北地区 8 级大震的深部构造特征及地震成因的探讨[J]. 地震学报, **25**(2): 136–142.
- Zhang X, Zhang X K, Liu M, Zhao L. 2003. Deep structural characteristics and seismo-genesis of the  $M=8.0$  earthquakes in North China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **25**(2): 136–142 (in Chinese).
- 赵文星. 1988. 临汾地区的深部构造综合研究[J]. 山西地震, (4): 18–24, 28.
- Zhao W X. 1988. Comprehensive study on deep structure in Linfen area[J]. *Earthquake Research in Shanxi*, (4): 18–24, 28 (in Chinese).
- 周蕙兰. 1990. 地球内部物理[M]. 北京: 地震出版社: 82–86.
- Zhou H L. 1990. *Interior Physics of the Earth*[M]. Beijing: Seismological Press; 82–86 (in Chinese).
- 祝治平, 张建狮, 周雪松, 朱晚霞. 1994. 山西临汾震区地壳上地幔构造的研究[J]. 华北地震科学, **12**(1): 77–84.
- Zhu Z P, Zhang J S, Zhou X S, Zhu W X. 1994. Study on the structure of the crust and upper mantle in Linfen earthquake region in Shanxi[J]. *North China Earthquake Sciences*, **12**(1): 77–84 (in Chinese).
- Pedersen L B. 1977. Interpretation of potential field data: A generalized inverse approach[J]. *Geophys Prosp*, **25**(5): 199–230.
- Ramussen R. 1979. End correction in potential field modeling[J]. *Geophys Prosp*, **27**(4): 749–760.



**吕苗苗** 中国地震局地球物理研究所在读博士研究生。2012年长安大学固体地球物理学专业毕业，获理学学士学位。现主要从事地震定位、震源机制解和地球内部深部结构方面的研究工作。



**倪红玉** 安徽省地震局预报研究中心工程师。2005年安徽师范大学物理学专业毕业，获理学学士学位；2008年中国科学技术大学物理化学专业毕业，获理学硕士学位。曾从事水等重要大气分子的近红外弱吸收带的研究工作，现主要从事震源机制、视应力、构造应力场和地震预测等方面的研究工作。



**张佩** 中国科学技术大学地球和空间科学学院在读硕士研究生。2012年吉林大学地球物理学专业毕业，获理学学士学位。现主要从事微地震震源机制反演方法的研究工作。SEG学生会会员。



**李勇江** 中国地震局地球物理勘探中心实习工程师。2011年长江大学固体地球物理学专业毕业，获理学学士学位；2015年中国地震局地球物理研究所地球探测与信息技术专业毕业，获工学硕士学位。现主要从事重力观测、资料处理及地震监测预报方面的研究工作。



**黄显良** 安徽省地震局地震工程研究院高级工程师。1996年安徽大学数理统计专业毕业，获理学学士学位；2005年中国科学技术大学固体地球物理学专业毕业，获理学硕士学位。曾从事地震观测技术和地震预测预报方法的研究工作，现主要从事地震中长期预报方面的研究工作。安徽省地震学会理事。



**韩晓明** 内蒙古自治区地震局高级工程师。2004年河南理工大学大地测量专业毕业，获工学学士学位；2007年中国地震局兰州地震研究所固体地球物理学专业毕业，获理学硕士学位。现主要从事地震学和地震预测方法的研究与应用工作。内蒙古自治区地震学会会员。