

山西中南部地区地壳深部 地球物理场异常与地震^{*}

刘明清¹⁾ 祝治平¹⁾ 方盛明¹⁾ 刘明军¹⁾
张建狮¹⁾ 虎喜凤¹⁾ 杨 清¹⁾ 刘 敏¹⁾
啜永清²⁾ 景呈国²⁾

1) 中国郑州 450002 中国地震局地球物理勘探中心

2) 中国太原 030002 山西省地震局

摘要 对山西中南部地区的地壳结构、地球物理场异常和地震活动性进行了综合研究, 结果发现: 临汾北部和太原南部的灵石、介休一带, 仍存在发生中强地震的深部构造背景, 今后应给予足够重视.

关键词 山西中南部 地壳结构 地球物理场 地震活动性 地震

引言

山西中南部系指北纬 $34^{\circ}\sim 38^{\circ}$, 东经 $110^{\circ}\sim 115^{\circ}$, 包括山西省中南部以及相邻的河北省西南部和河南省西北部地区(图 1). 它一直是地震界关注的焦点, 近几年均被列为重点地震危险区.

有关研究表明(刘国栋, 1989; 王椿镛等, 1994a), 强震活动与各种深部地球物理场及地壳构造之间存在着密切的关系, 因此, 在地震重点危险区探测研究地壳结构及其物性和深部物质活动特征, 以及它们与地震活动和浅层构造的关系, 对于圈定强化监测区和探讨板内地震成因及其动力学过程, 均具有现实意义.

1 地壳上地幔结构异常研究

自 1976 年以来, 中国地震局地球物理勘探中心在华北地区开展了大规模的地壳上地幔探测研究工作, 其中进入和通过山西中南部的 5 条深地震测深剖面(图 2)分别是: I. 运城—定边—阿拉善左旗剖面(1986 年); II. 郑州—临汾—靖边剖面(1985 年); III. 菏泽—林县—长治剖面(1981 年); IV. 泰安—隆尧—忻州剖面(1991 年); V. 太原—宣化剖面(1983 年).

利用以上各条深地震测深的丰富资料, 孙武城等(1988)、祝治平等(1995)、

* 地震科学合同基金资助(95116 号). 中国地震局地球物理勘探中心科技论著编号 RCEG98010.
1998-05-07 收到初稿, 1999-02-02 收到修改稿并决定采用.

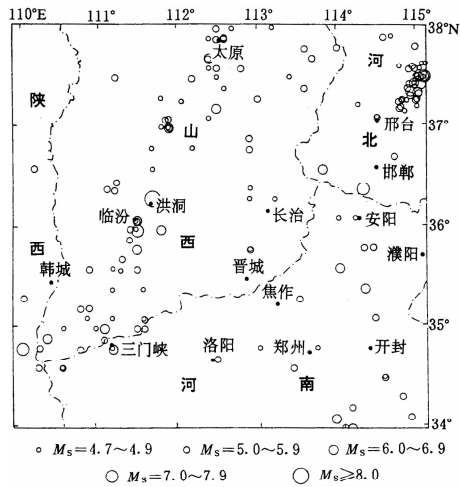


图 1 山西中南部震中分布图

刘昌铨等(1998)先后做了大量的研究,并取得了丰富的成果. 近期,祝治平、张建狮等对通过山西中南部的 5 条深地震测深剖面进行了统一的震相对比,并充分利用浅层地质和其它物探资料,综合研究了该区的壳幔结构.

经过对以上 5 条剖面资料的再解释和综合研究,重新获得了山西中南部地区较完整的地壳厚度(图 3),取得了以下几点新认识:

(1) 沿太行山山脉走向展布的东浅西深的地壳厚度变异带,与中国东部重力梯级带的展布方向一致;沁水—长治—孟县是地壳厚度最大的区域;山西断陷带在研究区内地壳厚度虽有起伏,但变化不大. 总的来看,与山西断陷带相对应的 M 面隆起,由运城的 35.0 km 向北北东方向逐渐加深,临汾为 38.6~39.0 km,太原为 40.0 km.

(2) 研究区上地壳内结晶基底的深度变化较大,它由华北平原区向山西高原加厚. 如果不考虑上地壳表层的新生代沉积盖层,上地壳的厚度在隆起区是比较稳定的,而华北坳陷上地壳的厚度迅速减薄,其减薄的厚度与新生代沉积盖层的厚度基本一致. 显然,新生代沉积厚度越大,上地壳内结晶基底的深度越小. 表明研究区新生代时期地表的下沉和接受沉积的总量完全是结晶上地壳张裂和侧向伸展的结果.

(3) 中地壳顶面的深度一般为 15.0~17.0 km,其底面的深度为 25.0~30.0 km,由平原区向山西隆起区加深. 它与结晶的上地壳相比,厚度变化较小,除了在局部地段有低速体外,中地壳一般为一弱速度梯度层或匀速层,它把脆性的上地壳和相对塑性的下地壳区分开来,起到在中、上地壳之间应力传递的解耦作用.

(4) 研究区的下地壳厚度在 9.0~18.0 km 之间变化,其底界面的埋深(M 面)在 32.0~42.0 km 之间变化,可见其下地壳厚度和底界面深度的变化均大于中地壳,并

且在华北坳陷的下方,其厚度和埋深均明显小于山西断隆,这表明华北新生代坳陷的形成与上地幔的隆起有直接关系. 上地幔的隆起导致了下地壳物质的侧向流动和太行山西侧下地壳的增厚. 另外,就下地壳的速度结构而言,它一般由上部的正速度梯度层和下部的负速度梯度层及靠近 M 面的强速度层所组成,其速度值一般从下地壳上部的 6.50 km/s 至

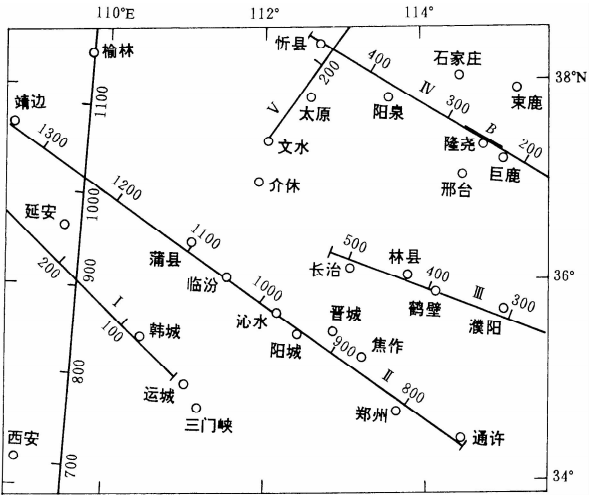


图 2 山西中南部地区人工地震测深剖面位置图

M 面增至 7.10 km/s，这大致相当于中性麻粒岩和基性麻粒岩的速度值。在山西断隆下地壳内有局部的速度逆转，它可能相当于酸性(长英质)麻粒岩夹层。

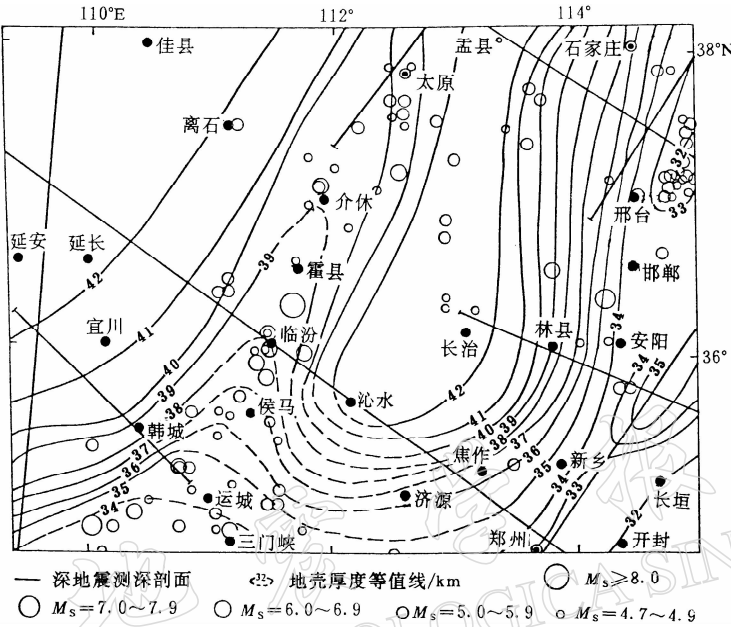


图 3 山西中南部及邻区地壳厚度图。本图为孙武城主持的“鄂尔多斯周缘地壳上地幔特征综合研究”项目成果图中的一部分，略有修改

(5) 华北平原与山西高原壳幔波组不仅存在着明显的差异，而且上地幔顶部的速度也有明显的变化。在华北平原上地幔顶部速度为 8.00~8.10 km/s，而山西高原上地幔顶部的速度均小于 8.00 km/s。

(6) 研究区内较大新生代断陷盆地的边界断裂和较大区域性基底断裂带的下部，一般均有地壳界面不连续现象，用此确定的地壳深断裂带通常延伸至 M 面。例如，邢台震区的牛家桥—东汪超壳断裂带、林县震区的采桑超壳断裂带和山西地震带的临汾超壳断裂带。

(7) 在太行山隆起区中上地壳一般不存在低速层。强烈的壳幔结构非均匀性，主要发生在太行山山前地带与华北平原的过渡带和山西断陷带。在这些断陷盆地，地壳多呈高低速相间的结构，中上地壳的速度逆转常常是局部的，并存在着延伸至 M 面的地壳深断裂带。在邢台震区、临汾震区和林县震区均存在着异常的壳幔结构，主要表现为：上地壳上部强烈的纵向和横向的非均匀性；中上地壳不连续的低速体的存在；高低速相间的壳幔结构；壳内界面的不连续和莫霍面的局部上隆；存在着延伸到莫霍面的高角度断裂带并与基底断裂的倾向不一致。在邢台震区， $M_s \geq 5$ 的地震中 85% 以上在深度 10~20 km 的范围内。这大致与中上地壳位置相当。可见，中上地壳是地震孕育和发生的主要层位。东汪 7.2 级地震和牛家桥 6.8 级前震的震源深度分别为 9 和 10 km，正好位于脆性的上地壳上部与上地壳下部低速层交界位置。深反射剖面十分清楚地揭示了震区内地壳深浅构造的关系：浅部的中到低角度的正断层与地壳内的高倾角超壳断层以及上地壳内的滑脱构造，共同组成了邢台地震区内特殊的断裂展布几何关系。在主震和强前震的震源位置上，分别显示了性质相似并延伸到莫霍界面的该高角度断层与震源机制解相一致，因此，这一北东向的断

层被推断为邢台地震的发震断层(王椿镛等, 1994b). 该断裂的近期活动可能是邢台地震发生的主要原因. 林县震区和临汾震区也存在着类似的深部构造. 据此, 上述特征可以作为潜在震源的深部标志.

2 重力场异常研究

在布格重力异常图上, 山西中南部地区重力场相对平稳, 走向以北北东为主. 东南部沿太行山为巨型重力梯级带. 它北起大兴安岭, 经太行山一直延向武陵山, 长达 4 000 km. 显然, 它的形成主要是深部地壳以及上地幔密度和构造变异引起的. 对中生代以来的构造运动起着明显控制作用.

依据本研究项目的要求, 我们首先对布格重力异常进行不同高度的解析延拓处理, 然后视异常场性质, 采用不同网格窗口进行场分离, 从而得到待研究的局部重力异常和区域重力异常. 尔后, 对局部重力异常反演了浅层(相对于基底界面)密度界面, 对深部重力异常作反演得到了该区 Moho 界面埋深情况.

由分离了区域异常场后反演计算的浅部密度界面深度图可知, 该界面应为新生界底界面, 密度差约为 0.45 g/cm^3 , 反映了中、新生代以来该区新构造运动特征. 在山西断陷带中南端, 运城盆地、侯马盆地、临汾和太原盆地轮廓清晰可辨, 尤其是运城盆地深度最大, 厚度达 4.2 km 以上, 且深度变化梯度大, 呈北东-东西走向. 盆地位于稷王山—侯马南山断隆以南, 至中条山山前大断裂, 运城盆地基底岩层可能为上元古界长城系变质岩, 历史上运城凹陷小震频繁; 临汾凹陷深度约 3 km, 凹陷中基底为寒武系、奥陶系、石炭系和二叠系. 临汾凹陷历史上地震的次数不多, 但强度较大. 6 级以上强震共有 4 次, 均发生在南北两侧边缘部位, 最大两次地震达 8 级以上. 从浅部重力异常图可见, 该区重力异常低值带与该区断陷带基本一致, 且地震亦分布在局部异常圈闭的边部. Moho 面埋深与强震分布图表明, 在临汾、介休有局部隆起, 且在临汾、侯马至运城一带有一个强梯度扭曲带. 该

强梯度扭曲带表现出 Moho 面向西倾突, 临汾、侯马至运城正好位于其向西倾突的前缘部位, 而地震大部分均发生在这种向西倾突的前缘部位附近. 另外, 据震源深度统计结果(刘占坡等, 1993), 70% 地震发生在壳下 10~25 km 深度范围内. 将这些地震分布与地壳厚度图进行对比分析, 发现本区中强地震与地壳厚度陡变带, 尤其是上地段隆起边缘斜坡带密切相关, 大约 65% 5 级以上地震分布在汾渭幔隆带内, 且主要分布在其边缘斜坡带上. 地震在空间上的这些分布似乎与该区这种特定的深部构造环境

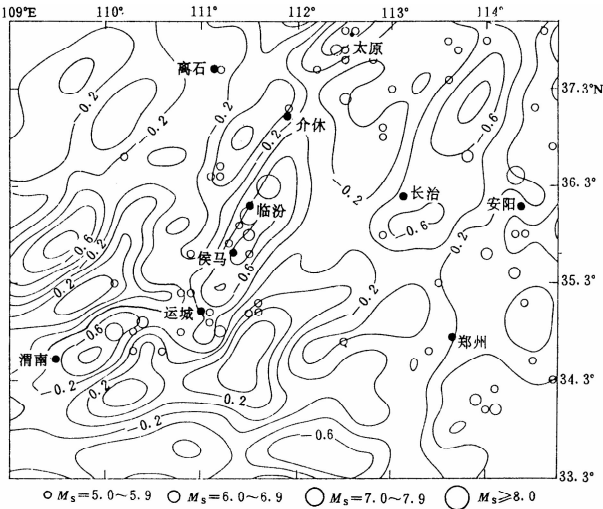


图 4 山西中南部地区 NW 向重力梯度异常图

有关. 山西断陷带的西缘是鄂尔多斯块体, 相对质量较大且很稳定; 东侧为沁水现代稳定地块; 南部是秦岭褶皱系. 在区域构造力的作用下, 必然是这种向前倾突的岩体部位应力最易集中, 因而也最容易发生地震. 进一步对研究区深部重力异常沿 NW 向求梯度, 得到区 NW 向梯度异常图(图 4). 显然, 运城、侯马、临汾地区的地震均在负梯度极值区, 大同、介休附近地震在正梯度极值区. 根据条件类比的原则, 未来中强地震仍有可能发生在正负梯度极大值的封闭曲线范围内, 特别是临汾南, 侯马、运城东南以及太原东南更值得注意.

3 航磁异常研究

我们知道,航磁异常主要为壳源部分的磁性层、磁性的综合反映,可归纳起因于:①地壳上层的磁铁矿体与磁性火成岩体;②前寒武纪古老变质岩系(主要是太古宙地层),其基底顶界面的升角、隆凹等;③中下地壳岩浆岩、变质岩层(磁性层)的厚度变化;④上地幔深源因素。航磁异常正是这些因素综合影响的结果(余钦范,马杏垣,1989)。对于山西中南部地区来说,航磁异常则主要为:①区域异常反映前五台太古代深变质岩系大范围的起伏变化;②局部异常反映磁性火成岩体及磁铁石英岩层;③条带状异常则反映大型深部构造带。

应用三维磁性层反演理论和方法,对山西中南部地区的航磁资料进行数据处理,反演计算了该区磁性基底埋深和视磁化强度分布.王西文(1989)计算了山西及邻区居里等温面埋深(图 5).

从图 5 可以看出, 山西中南部地区居里等温面总体上是一条北东向的隆起带. 运城盆地, 居里面隆起轴为北东向, 最浅值为 20 km; 临汾盆地, 居里等温面隆起轴为北北东向, 最浅值为 18 km; 太原盆地, 居里面隆起轴为北东向, 最浅值为 20 km. 侯马基本位于最浅值的中心部位, 灵石和介休处在磁性体底面等深线梯级带的最陡处附近. 居里面隆起带东西两侧是一系列凹陷区, 包括沁水、长治和榆社等地. 左权是一个隆起, 隆起幅度比太原、临汾和运城盆地都小, 最浅值为 22 km, 隆起轴向也是北东向.

从大地热流值实测结果可以看出(王西文, 1989), 太原、临汾和运城盆地都是高热流区。临汾盆地热流值最高, 达 79.53 mW/m^2 ; 太原盆地次之, 热流值最大为 71.18 mW/m^2 ; 运城盆地比太原盆地略低, 最大热

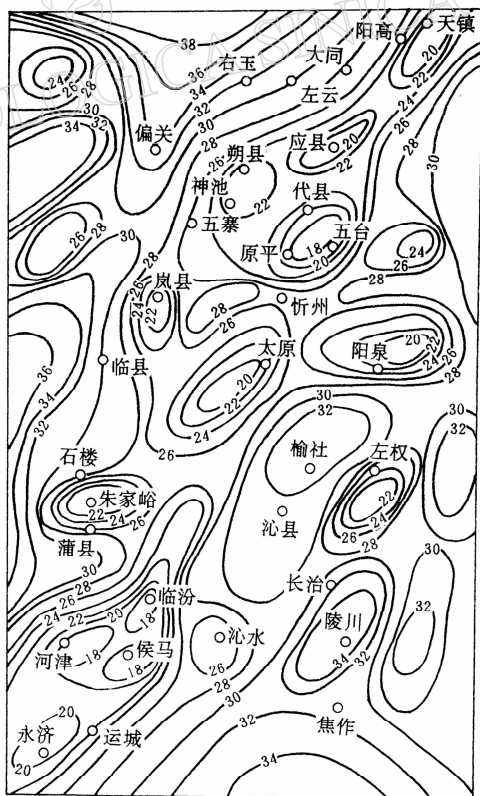


图5 山西中南部磁性层上界面等深图(等值线单位: km)

流值为 66.97 mW/m². 在东侧的中生代造山带是低热流区, 平均热流值均为 54.41 mW/m². 盆地中普遍有地热水存在.

虽然利用航磁资料探讨深部构造及其与地震的关系才刚起步(余钦范, 马杏垣, 1989). 但是我们将该区的深部构造、居里等温面埋深和地震分布的特点进行相关分析, 仍可得到以下几点启示:

(1) 地震孕育与壳幔热物质的上涌密切相关. 由于临汾盆地大地热流值高, 居里面隆起面积大, 说明深部地幔物质相对其它盆地上涌较强. 著名的临汾盆地两次 8 级大震, 即 1695 年临汾 8 级地震和 1303 年洪洞 8 级地震, 均分布于该地区.

(2) 强震孕育、发生和震级上限, 不仅与地壳磁性结构有关, 而且还与地壳介质的磁化率强度有关. 前者反映了地壳构造特点, 后者反映了地壳介质的力学强度. 临汾盆地的壳内高磁性物质的规模小于太原盆地, 表明其磁性体破碎程度相对较高, 具有发生强震的应力条件.

(3) 对比相关图件可以看出, 地壳深部地幔上拱的地方, 对应居里等温面高点, 热流值偏高, 因而形成了一定的热动力条件. 地热活动是地壳不稳定的主要因素之一, 地热与地震形影相随. 似乎可以说, 地热高值区就是地震频繁发生的地带.

4 地震活动异常研究

历史地震活动的研究表明, 山西中南部曾是 8 级地震和一系列中强以上地震的活动场所. 近年来我国大陆地区地震活动一直显示持续活动的图象. 与此同时, 大华北地区接连发生了包头 6.4 级、南黄海 6.1 级、张北-尚义 6.2 级以及范县 3.6 级地震, 表明华北地区也参与了全国地震活跃期的活动, 处在自己的第 5 个地震活跃期之中.

分析地震活动的时间分布特征, 有助于对研究区目前和未来所处的活动阶段, 以及对地震活动趋势作出正确估计. 地震活动的时间分布特征表现为地震随时间具有相对平静和显著活跃相互交替的活动周期. 公元 1000 年以来, 华北地震区已经历了 4 个地震活跃期(表 1). 在每个活跃期中, 地震频度都有显著差异. 在同一活跃期中又存在一个强度大频度高的高潮时段, 高潮时段后地震活动逐渐衰减. 高潮时段一般持续 10~30 年, 高潮时段的间隔为 300 年左右.

表 1 公元 1000 年以来华北地震活跃期划分

活跃期	起止年代	持续时间/a	地震次数(M≥6)	最大地震
第 1 活跃期	1022~1209	188	7	7¼
第 2 活跃期	1209~1368	79	29	8
第 3 活跃期	1484~1730	247	30	8½
第 4 活跃期	1815~ 1997	183	33	7.8

在持续二三百年的活跃期中, 还存在着时间尺度为二三十年较低层次的韵律活动, 称之为地震幕(马宗晋等, 1982). 蒋铭等(1991)详细研究了华北第 3, 4 两个活跃期的地震幕式活动特点, 发现它们具有某些相同的特征. 每幕持续 20~30 年, 包含相对活动和相对平静两个阶段, 其中活动时段为 10~20 年. 各幕的持续时间、地震次数、能量释放等并不均一, 活跃期开始几幕活动水平较低, 以后逐渐增强. 到高潮幕后, 还会经历 1~2 幕, 作为

活跃期的结尾幕,其地震活动呈衰减状态。

公元 1 000 年以来的 $M_s \geq 4\frac{3}{4}$ 地震的时间序列表明,地震活动同样具有活跃—平静相互交替的现象,可划分为与华北活跃期大体相同的 4 个地震活跃期(图 6)。在第 1 活跃期共发生 $4\frac{3}{4}$ 级以上地震 3 次,其中 6 级以上地震 2 次,发生的最大地震是太原 $6\frac{1}{2}$ 级地震和浮山 $6\frac{1}{2}$ 级地震;第 2 活跃期共发生 $4\frac{3}{4}$ 级以上地震 15 次,其中 6 级以上地震 3 次,最大地震是洪洞的 8 级地震;第 3 活跃期,共发生 $4\frac{3}{4}$ 级以上地震 40 次,其中 6 级以上地震 7 次,7 级以上地震 2 次,它们分别是 1501 年朝邑 7 级地震和 1695 年临汾 $7\frac{3}{4}$ 级地震;第 4 活跃期共发生 $4\frac{3}{4}$ 级以上地震 66 次,其中 6 级以上地震 4 次,7 级以上地震 1 次,即 1830 年磁县 $7\frac{1}{2}$ 级地震。除前 3 个活跃期内最大地震都发生在山西地震带上,75% 的 6 级以上地震也都集中在山西地震带上。第 4 活跃期发生在山西地震带的 6 级以上地震只占 25%,除平陆发生一次 $6\frac{3}{4}$ 级地震外,其它 2 次 6 级地震和 1 次 7 级地震都发生在河北平原地震带上。

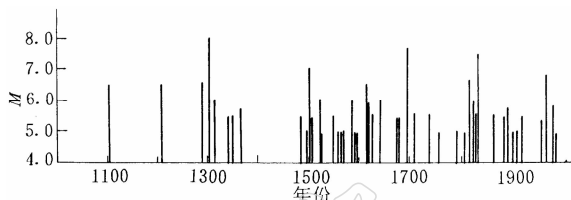


图 6 研究区域历史地震
时序图($M \geq 5.0$, 1000~1997 年)

对研究区域 b 值、 N 值、 M_f 值、 C 值、 D 值进行空间扫描,其结果表明:① 区域内 b 值较高,几乎都 ≥ 0.7 ,说明区域内普遍存在地震活动的平静性异常;② 临汾盆地中北部和太原盆地中北部是小震频度最高的地区;③ 地震强度因子 M_f 值未出现 ≥ 0.25 ,且面积 ≥ 4 平方度的异常;④ 空间集中度 C 值和地震危险度 D 值未出现 ≥ 2.0 的异常。只是在太原盆地北部和山西长治到河北邢台一带 C 值相对较高,在临汾盆地的侯马一带 D 值相对较高。

由此认为,上述各值在研究区内存在不明显的异常,值的大小和分布面积也未达到“八五”攻关所得出的中强地震的异常值域,但是几个相对高值区都较一致的地区在太原盆地北部、临汾盆地的中北部和侯马一带。太原盆地是山西地震带上中强、中小地震及震群活动最频繁的地区,震群活动往往具有前兆特征。自有台网记录以来,4 级以上地震活动由南向北迁移,在盆地南部形成了长达 17 年的 4 级地震空段;3 级以上地震的震中分布也出现了收缩、迁移和条块分布的异常图象;在时间序列上,1984 年以来呈现出地震活动的平静异常;非线性理论的广义时间在近年也出现了明显的低值异常。这些都表明,太原盆地在未来 122 年内有发生 5 级以上地震的危险,最危险的地区可能是太原—榆次或平遥—介休。临汾盆地是历史上山西地震带强震活动的主要场所,其地震活动属继承性活动。盆地内凹陷区是地震活动的集中区。因此,未来强震在临汾、河津凹陷区的概率高于其它地区。其中位于罗云山断裂南段的河津凹陷及其附近,介质的平均 Q 值和小震平均应力降均较高,是值得注意的地区。由近期地震活动图象分析,1989 年以来在盆地内形成了一个 4 级地震的空段,1996 年以来在 4 级地震空段内的偏北地区又形成了一个小震条带;在时间序列上,1994 年以来也相继出现了年频度、 b 值、缺震和加卸载响应比 γ 等异常。由此可推断,临汾盆地具有发生中强地震的中期背景,在未来几年内有发生 6 级左右地震的危险,最危险的地区在临汾盆地北部的霍州一带以及南部的侯马一带。

5 结论

综上所述,我们初步得到了山西中南部地区地壳与上地幔的一些构造特征和某些有意义的深部地球物理信息。在临汾和林县地区均存在着异常的壳幔结构,主要表现为:上地壳上部强烈的纵向和横向的非均匀性;中上地壳不连续的低速体的存在;高低速相间的壳幔结构;壳内界面的不连续和莫霍面的局部上隆等。从莫霍界面埋深情况可以看出,临汾、介休地区有局部隆起,且在临汾、侯马至运城一带有一个强梯度扭曲带,该强梯度扭曲带表现出 Moho 面向西倾突,临汾、侯马至运城正好位于其向西倾突的前缘部位。居里等温面总体上是一条北东向隆起带,其中以临汾、太原和运城断陷盆地为最浅且变化较大,而东西两侧的山区都明显加深,是磁性体底面的凹陷区;侯马基本位于最浅值的中心部位,灵石和介休处在磁性体底面等深线梯级带的最陡处附近;大地热流值的实测结果也证明了这一点。地震活动异常分布也表明,山西中南部的地震活动性异常大多集中在太原盆地和临汾盆地,最危险的地区可能是太原—榆次或平遥—介休和临汾盆地北部的霍州一带以及南部的侯马一带。按照条件类比的原则,我们认为:

(1) 临汾北部和太原南部的灵石、介休一带,仍存在发生中强地震的深部构造背景,是今后地震的强化监测地区,应该给予足够的重视。

(2) 侯马盆地和林县盆地虽没有灵石、介休一带的异常明显,但发生地震的深部构造背景还是存在的,可能是中小地震经常活动的场所。

参 考 文 献

- 国家地震局“鄂尔多斯周缘活动断裂系”课题组. 1988. 鄂尔多斯周缘活动断裂系. 北京:地震出版社, 77~113
- 国家地震局科技监测司编. 1988. 中国大陆深部构造的研究与进展. 北京:地震出版社, 19~37
- 蒋铭, 张国民, 姜秀娥. 1991. 地震活动的时间层次结构. 中国地震, 7(3): 42~53
- 刘占坡, 殷秀华, 刘铁胜. 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. 见:马宗晋主编. 山西临汾地震研究与系统减灾. 北京:地震出版社, 215~223
- 刘国栋. 1989. 华北地区深部孕震环境的探讨. 北京:地震出版社, 13~20
- 刘昌铨, 刘明军, 嘉世旭. 1998. 利用华北北部深部地球物理资料数值模拟地壳应力场. 地震学报, 20(3): 240~249
- 马宗晋, 傅征祥, 张郢珍, 等. 1982. 1966—1976 中国九大地震. 北京:地震出版社, 189~204
- 孙武城, 祝治平, 张利, 等. 1988. 中国大陆深部构造的研究和进展. 北京:地质出版社, 19~36
- 王西文. 1989. 用航磁异常寻找地热田. 山西地质, 4(2): 131~139
- 王椿镛, 张先康, 吴庆举, 等. 1994a. 华北盆地滑脱构造的地震学征据. 地球物理学报, 37(5): 613~620
- 王椿镛, 张先康, 林大洋, 等. 1994b. 束鹿断陷盆地及其邻近的地壳结构特征. 地震学报, 16(4): 472~479
- 武烈, 贾宝卿, 赵学普. 1993. 山西地震. 北京:地震出版社, 52~36
- 余钦范, 马杏垣. 1989. 华北地区航磁图像处理结果和地震构造解释. 地震地质, 11(4): 5~13
- 祝治平, 张先康, 盖玉杰, 等. 1995. 邢台震源区及相邻地区地壳上地幔速度结构研究. 地震学报, 17(3): 328~334