

鄂尔多斯盆地西部逆冲推覆构造带 重力资料数字处理及其应用

张 军

(长庆石油勘探局勘探开发研究院)

本文用拉普拉斯方程的级数解形式,对研究区的重力资料作了解析延拓处理,进而阐明逆冲推覆带滑脱面的性质、空间展布及深层构造特征。

一、概 述

鄂尔多斯盆地西部逆冲推覆构造带北起磴口,南到陇县,东始天环向斜西翼,西止贺兰山、六盘山西麓,长达600 km,宽50—100 km,面积达45 000 km²,由南北向构造带和六盘山弧形构造带组成(图1)。该区是中国东西两大构造单元的分界,长期以来,各大地质构造学派从不同的观点对这个区域的地质构造特征进行过很多讨论。但已往的研究或只侧重于地表地质调查,或仅限于某一局部地区,而对全区深层的地质情况研究甚少。由于种种原因,已往地震普查面积还不到该带总面积的20%,因此,有效地利用覆盖全区的1:50万重磁资料,就成为研究深部构造的重要手段。但是,地面测量所得的重力异常是地下不同深度、不同强度场源的综合反映。为了分开不同深度、不同强度的重力异常源,使重力资料在分析判断不同深度的地质体上能起到更重要的作用,本文拟从场源延拓理论出发,对重力场源进行分离,用拉普拉斯方程的级数解,在近波数域中做重力数据处理,处理内容包括延拓处理和求重力位高阶导数,从不同延拓面的异常源变化情况,分析异常源的形态、埋深和强弱演变,结合区域地质、钻井、地震、磁法和天然地震等多种地质和地球物理资料,应用逆冲推覆构造理论,分析区内逆冲推覆构造的规模、深浅层构造关系、内部结构、断面产状等地质特征,为综合研究鄂尔多斯盆地西部逆冲推覆构造带提供地球物理依据。

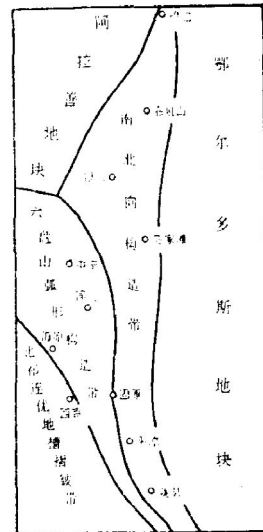


图1 鄂尔多斯盆地西部逆冲推覆构造带位置图

二、重力资料延拓处理的地质意义

地面上测量的重力异常是深度、密度、大小不同地质体具有的异常源相互叠加的综

合反映。为了从异常图中分辨出浅部和深部地质体的异常,利用电子计算机,按场源延拓理论对重力资料进行处理已被普遍应用。用这种方法分析推覆构造,国内从70年代末开始且取得了成效^[1,2]。

重力异常的解析延拓处理就是用地面得到的重力资料经过数学变换,计算出新研究面上的重力异常值,该值与重力异常源在新研究面上引起的重力异常值是等效的。新的研究面在原测量面以上者称向上延拓,在原测量面以下者叫向下延拓。

根据牛顿万有引力定律可知,重力场的向上延拓能压制浅层局部异常源,突出深层区域异常源,而向下延拓则与之相反。因为在观察点上重力异常值与万有引力常数及地质体的剩余质量成正比,而与地质体埋深的平方成反比。

推覆体或逆冲席为无根的外来岩体,它与深层的原地岩体构造形态差异较大。从本区典型的逆冲推覆地震剖面可以看到,在推覆体系内部,断裂非常发育,成叠瓦状覆盖于原地岩体之上,而原地岩体由于受力较弱,断裂少,断距小,多形成宽缓低幅度的褶皱;同时,二者的构造从走向、范围和埋深都有差别,这种深浅层不协调的构造关系为应用重力场的解析延拓资料进行分析研究提供了基础。

三、重力场解析延拓的计算方法

由于鄂尔多斯盆地西部为一狭窄带状区域,以西没有资料,为了克服空间域延拓计算的严重边界损失问题,我们采用拉普拉斯方程的级数解形式,对本区的1:50万重力资料和现有的1:20万重力资料进行了延拓计算并求了重力位的高阶导数,延拓计算的具体公式如下^[3]:

$$\Delta g(x, y, z) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N \left(A_{mn} \cos 2\pi m \frac{x}{L_x} \cos 2\pi n \frac{y}{L_y} + B_{mn} \cos 2\pi m \frac{x}{L_x} \cdot \sin 2\pi n \frac{y}{L_y} + C_{mn} \sin 2\pi m \frac{x}{L_x} \cos 2\pi n \frac{y}{L_y} + D_{mn} \cdot \sin 2\pi m \frac{x}{L_x} \sin 2\pi n \frac{y}{L_y} \right) \exp 2\pi z \left(\frac{m^2}{L_x^2} + \frac{n^2}{L_y^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\begin{aligned} \text{式中} \quad A_{mn} &= \frac{e_{mn}}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \Delta g(x, y, 0) \cos 2\pi m \frac{x}{L_x} \cos 2\pi n \frac{y}{L_y} dx dy \\ B_{mn} &= \frac{e_{mn}}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \Delta g(x, y, 0) \cos 2\pi m \frac{x}{L_x} \sin 2\pi n \frac{y}{L_y} dx dy \\ C_{mn} &= \frac{e_{mn}}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \Delta g(x, y, 0) \sin 2\pi m \frac{x}{L_x} \cos 2\pi n \frac{y}{L_y} dx dy \\ D_{mn} &= \frac{e_{mn}}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \Delta g(x, y, 0) \sin 2\pi m \frac{x}{L_x} \sin 2\pi n \frac{y}{L_y} dx dy \end{aligned}$$

$$\text{其中} \quad e_{mn} = \begin{cases} 1 & (m=n=0) \\ 2 & (m=0, n>0 \text{ 或 } m>0, n=0) \\ 4 & (m>0, n>0) \end{cases}$$

(1) 式中 $\frac{x}{L_x}$, $\frac{y}{L_y}$ 为 x 方向、 y 方向单位长度的波数, $\Delta g(x, y, 0)$ 为坐标为 (x, y)

处的布格重力异常值, $\Delta g(x, y, z)$ 是延拓高度为 z 的 (x, y) 处的延拓重力异常值, z 为负值时是向上延拓, 不难看出该式具有近似波数域计算的特点。

从计算得到的延拓重力异常图可以看到, 应用拉普拉斯方程级数解边界畸变范围约2个网格距, 使边界损失大大减少, 而且公式简单, 便于计算。应用(1)式编出计算程序对盆地东部的富县重力高作了试验处理, 所得延拓重力异常与已知勘探成果非常吻合, 证明这种计算方法的效果是理想的。

四、地质成果认识

鄂尔多斯盆地西部逆冲推覆带跨越两个大地构造单元, 由位于华北地台的南北向构造带和位于秦祁地槽的六盘山弧形构造带组成。地台区的结晶基底是由太古代和早元古代地层组成, 其北部基底属太古代, 构造方向呈东西向, 南部基底可能是固结程度不高的早元古代地层; 六盘山弧形构造带为加里东基底。

本区的构造发展经历了早元古代的早期三叉裂谷阶段、早古生代的晚期三叉裂谷阶段和晚古生代的前渊和碰撞裂谷阶段¹⁾, 从这几期的地层等厚图上可以看到沉积近南北向展布。中生代在图2所示的应力场作用下, 本区产生向东部的强烈挤压力, 使贺兰裂谷中沉积巨厚的中元古—中生界较软的沉积岩发生褶皱并向东逆冲推覆, 该期是本区南北向逆冲带主要形成和发展阶段。新生代是六盘山弧形构造带的形成时期, 在地面沿逆冲断层可以看到六盘山群逆冲到第三系之上。

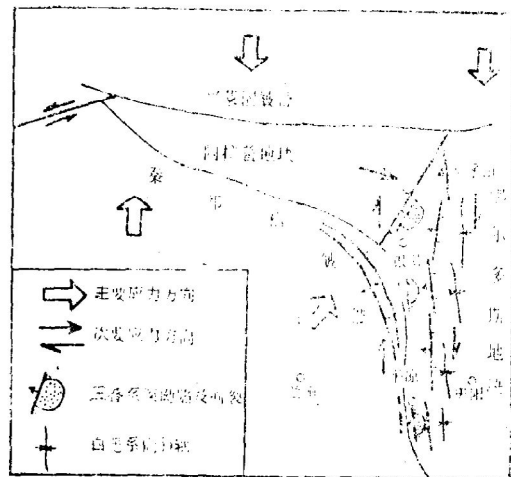


图2 鄂尔多斯盆地西部中生代应力场示意图
(据汤锡元等, 1986)

本区从太古界到第四系都有出露, 早古生代及以前沉积以海相碳酸盐岩为主, 晚古生代及以后沉积以陆相碎屑岩为主。据前人研究²⁾鄂尔多斯盆地主要存在三个区域密度界面, 即第四系与下伏地层的密度界面(低密度界面)、侏罗系与三叠系间的密度界面和奥陶系与其上覆地层的密度界面。其中, 奥陶系与其上覆地层的密度界面是引起除盆地东部以外重力异常的主要密度界面。本区的岩性密度值与盆地综合密度值最接近, 因此上述三个密度界面的综合解释成果, 为我们分析逆冲构造特征提供了较好的条件。

本区目前已有1:50万普查重力成果和部分1:20万重力资料, 我们对两种比例尺的资料都作了延拓运算, 并由计算机将计算值绘制成图。根据计算机绘图要求, 该带分为南北两区处理, 两区分界约在中宁—石沟驿一线, 由于资料限制, 北区又分为桌子山段和银川段。所获地质认识分述于下:

1) 郭忠铭、王定一、汤锡元, 1986, 陕甘宁盆地西部逆冲推覆带构造特征及油气勘探,
2) 杨志光, 1974, 陕甘宁盆地重磁力资料综合研究总结报告,

1. 北区桌子山段

本段重力异常的方向为北北西向, 由惠农东的铁克苏庙和磴口两重力高及磴口南重力低所组成(图3-A), 布格重力异常值最大可达 -90 mGal , 是整个盆地西部重力异常值最高区, 亦是磁力异常值最大区, 磁异常值达 $+500$ — $+850 \gamma$, 重磁异常位置近乎重合, 磁性体深度计算得本段磁性体埋深为 10 Km 以上¹⁾。该段出露最老地层为太古代花岗片麻岩千里山群, 其上依次覆盖元古界和古生界, 地面见西倾逆冲断层发育, 多处可见寒武奥陶系灰岩逆冲于石炭二叠系煤系之上, 形成“飞来峰”, 而整个桌子山体为一西缓东陡、西宽东窄的背斜构造。本段出露地层的磁化率普遍很低, 千里山群只有 $20 \times 10^{-6} \text{ CGSM}$, 前人认为如此低值的磁化率, 是不能引起该区如此高值的磁异常的。

从图3可以看到, 随着延拓高度的增大, 磴口南重力低消失较快, 其反映的向斜构造较浅, 重力场由北北西向转变为东西向, 反映了本段深浅层构造方向不相同, 不是同一期构造运动的产物。本段向上延拓6个网格距后场源方向才发生了显著变化, 究其原因可能是一方面由于资料限制, 计算时采样区域小, 使得浅层(北北西向)场源衰减较慢, 另一方面可能是由于北北西向构造具有一定的深度, 东西向构造埋藏很深所致。

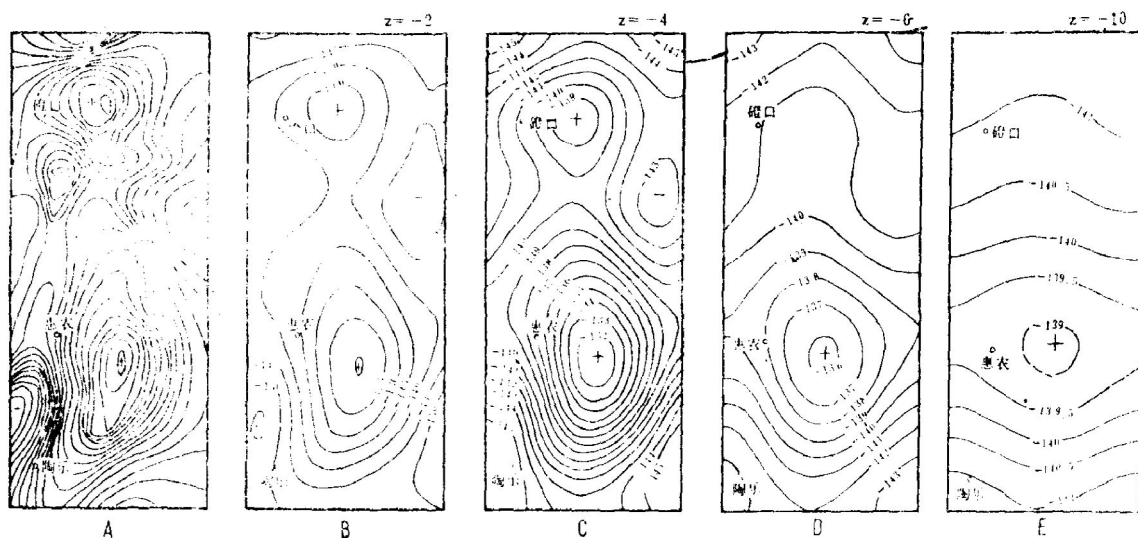


图3 北区桌子山段布格重力异常与延拓重力异常图

本段的区域磁场为东西向, 它是盆地北部内蒙磁异常区向本段延伸, 延拓重力异常图上出现的東西向场源应该和磁异常反映的地质体相同, 是太古代古陆核的反映。从本段的重磁场特征和地质特征可以推断桌子山段可能存在两个滑脱面: 一是深层的高密度、强磁性岩体与其上的高密度、弱磁性岩体(千里山群)的分界面, 深层地质体的构造线是东西向, 可能是伊盟隆起向本区的延伸, 其上的地质体沿该面发生了滑移, 推覆叠合在深层地质体之上, 它的构造线为北北西向; 一是较浅层的石炭二叠系煤系, 寒武奥陶系灰岩沿此柔软层发生滑脱, 形成地面出露的“飞来峰”构造, 这两层滑脱可能形成于同一时期, 为印支-燕山运动的产物。其双层滑脱特征如图4所示。

1) 杨志光, 1974, 陕甘宁盆地重磁力资料综合研究总结报告。

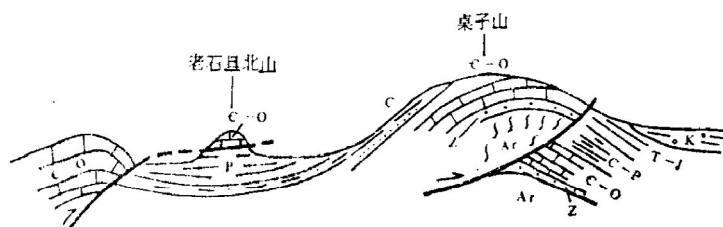


图4 桌子山段地质体双层滑脱特征示意图

2. 北区银川段

本段包括银川地堑、贺兰山隆起和横山堡-马家滩断褶带，其中横山堡-马家滩断褶带和银川地堑是整个逆冲构造带地震勘探程度最高的地区。该段除贺兰山以外，地表几乎全为黄土和沙漠覆盖，布格重力异常特征是以银川重力低为中心，四周被重力高所环绕，其中东侧为横山堡重力高和马家滩重力高，西是贺兰山重力高，北东为铁克苏庙重力高，南为南贺兰重力高和牛首山重力高，它们都以梯度带与银川重力低相接（图5-A）。

从图5的延拓重力异常可以看到：牛首山、贺兰山两重力高场源埋藏较浅，向上延拓时消失较快，为浅层构造的反映。横山堡和马家滩两重力高虽然幅度相差10 mGal以上，但几乎是同时消失，反映了两者场源埋深相近，而且从延拓3个网格距后这两个重力高依然形迹可辨，反映了它们的场源埋藏较深。通过重力、地震对比分析，横山堡重力高是横山堡后冲带T₉层以下构造轮廓的反映；马家滩重力高开阔平缓，是马家滩逆冲推覆带原地岩体的反映（图6）。横山堡、马家滩地区的断裂非常发育，这些断裂在重力异常中反映不明显，推测可能有两个原因：一是重力资料精度较低和分辨率差；一是由于马家滩、横山堡地区的断层多发生在上古生界及其以上地层，即使断开奥陶系其垂直断距也较小，不足以引起明显的重力异常特征。从磁力异常资料和重力场延拓特征综合判断，马家滩地区的原地岩体隆起和横山堡隆起都包括元古代地层。

银川段布格重力异常主要走向为北东向，特别是贺兰山重力高、银川重力低及横山堡重力高最为醒目。从图5可以看到，随着重力场的向上延拓，该段重力异常的走向随之发生变化，当向上延拓10个网格距高度时，重力异常走向变为东西向，延拓重力场特征与磁力异常特征相近，反映的地质特征可能是本段磁性结晶基底的构造形态，其中巴音浩特北的重力高可能是正谊关断层以南古老地质体隆起的反映，银川重力低为银川地堑的反映，该地堑沉积了7 000 m 以上的新生界。

从地震和地表地质调查资料来看，北区银川段是盆地西部南北向构造带逆冲推覆作用最强的地段，发育着典型的逆冲推覆构造，如贺兰山地区的小松山推覆体形成了飞来峰构造，横山堡地区是规模宏大的推覆后冲带，面积达3 000 km²以上，根据平衡剖面计算出马家滩地区推覆距离最大可达40 km。从深浅层重力场特征也可看到，该段深层构造为东西向，浅中层北东向构造叠加其上，马家滩、横山堡和贺兰山的重力高都是逆冲推覆作用产生的结果。

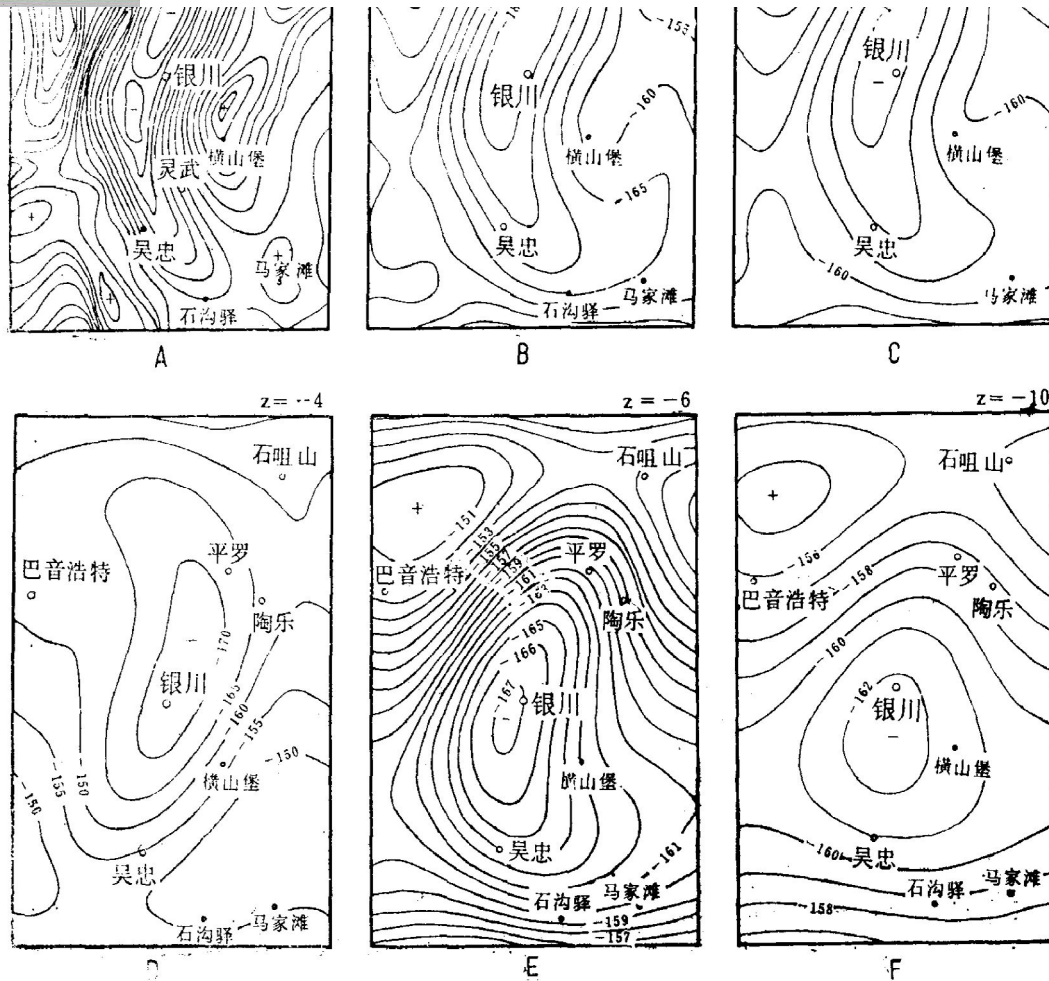


图5 北区银川段布格重力异常与延拓重力异常图

3. 南区

该区山大沟深，奥陶系及前奥陶系埋藏较浅甚至出露地表，区内东部的沙井子断褶带有较短的地震剖面，因是模拟剖面而精度较低。在区内的海原坳陷沿圆河做了一条数字剖面。整体看来该区深层地质资料较少，逆冲构造的结构特征不甚清楚。该区的布格重力异常规律性强，其平面组合特征主要是：①重力梯度带规模宏大，梯度值亦很大。如预旺-固原梯度带延伸近 400km，梯度值最大达每公里 12 mGal；②梯度带的平面位置与地面大断裂的位置吻合较好；③预旺-固原梯度带以东，重力高夹于梯度带之间，以西重力高和重力低相间排列；④重力高主要出现在现今地貌的高山区和老地层出露区；

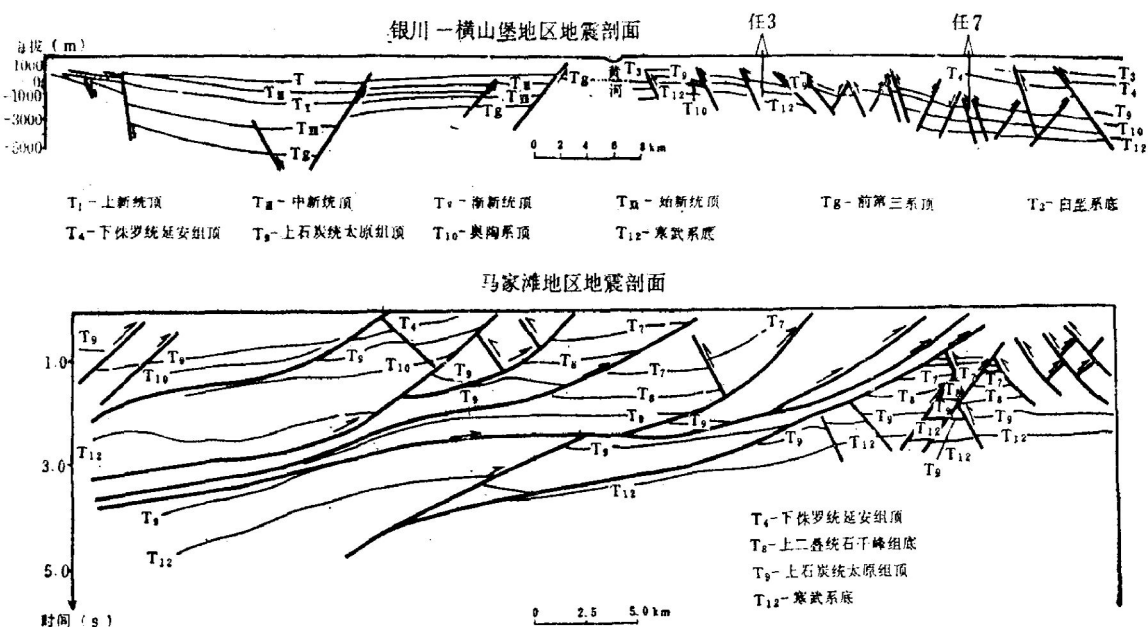


图6 横山堡地区、马家滩地区地震剖面图

⑤重力异常走向为两组, 预旺-固原梯度带以西为北西向, 以东为近南北向。

由于该区地震资料少, 为了判断断裂的向下延伸情况, 我们计算了重力位各延拓层的高阶导数, 以便从重力位高阶导数图中零值线的位移方向确定断裂的倾向, 从布格重力异常的梯度带特征结合重力位高阶导数零值线位移距离, 判断断裂的深浅层相对陡缓变化。从图7可以看到: 六盘山两侧断裂相向而倾, 东北侧西南倾, 西南侧东北倾。断裂沿走向倾角有明显变化, 在浅层, 六盘山西麓: 断裂两端缓、中部陡, 东麓: 断裂南段较陡、北段稍缓; 向深层, 两条断裂明显变缓。在向上延拓2个网格距的延拓重力异常图中(图8-B)和向上延拓4个网格距的重力位高阶导数图上, 这两条断裂特征消失, 推测这两条断裂向深部延伸有限。在图7中可以看出, 预旺-固原-隆德一线的断裂西倾为主, 可能在三营附近断裂局部反向, 但反向的段很短, 目前由于各种资料少, 难以排除这段局部反向特征是由于别的地质因素影响所致。从位置上看该断裂是青铜峡-固原大断裂的反映, 在布格重力异常图中, 反映这条断裂的梯度带梯度达每公里12 mGal, 随着延拓面的增高, 梯度值下降较快, 但在整个延拓过程中, 梯度带始终都能辨认出, 反映了这条断裂倾角浅部陡、深部缓、下延深的特征。该断裂西倾, 从断裂两侧出露地层看是本区的槽台分界线, 在地面地质调查中看到沿该断裂有多处辉绿岩侵入。

本区地面出露8条断裂, 其踪迹都能在布格重力异常图中看到, 但在延拓重力异常图中, 反映地面断裂的梯度带大多消失很快, 特别如北西向重力梯度带, 延拓1个网格距后或完全消失, 或合并, 反映了这些断裂浅部分开, 向深部合拢的特点。

从重力场看本区的区域构造特征比较明显, 在青铜峡-固原大断裂以西即六盘山弧

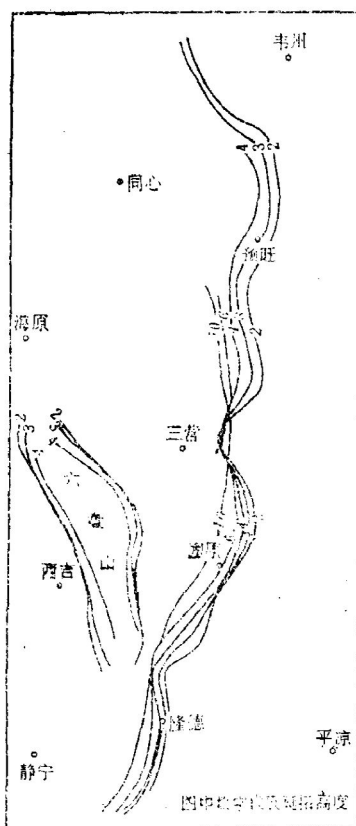


图7 南区重力位三阶导数
零值线位移图

形构造带,重力异常走向北西,重力高、低异常相间排列,从西南到东北依次为六盘山-南、西华山重力高、三营-海原重力低、窑山-烟筒山重力高、预旺-中卫重力低、罗山-牛首山重力高,除海原重力低外,这些重力异常场源很浅,向上延拓1个网格距就已消失,表明该区背斜为无根背斜,向斜为较浅的坳陷,是比较典型的外来岩体的构造特征,因此判断这些北西向构造具有较大的水平位移。从地面露头看到这些北西向构造是喜山运动的产物,其中有些断层至今仍在活动,震撼世界的1920年海原大地震就是发生在西华山-六盘山断裂上,以右行剪切逆掩推覆为主^[4]。从图8看到海原重力低随着延拓高度的增加,面积越来越大,方向由北西渐变为近南北向,这反映了海原坳陷的沉积面积较大,由于后来的逆冲推覆作用,使南、西华山和六盘山西北端逆冲于这个坳陷之上,现在的坳陷形态是改造后的产物。从圆河地震剖面上也清楚看到,由东北到西南地震反射层能量变强,为一西南倾的大斜坡,一直到南、西华山下,反射层突然中止,为杂乱反射。海原坳陷的西南端为推覆体所覆盖,对坳陷生油岩的成熟将大有好处,是一有远景的石油勘探地区。

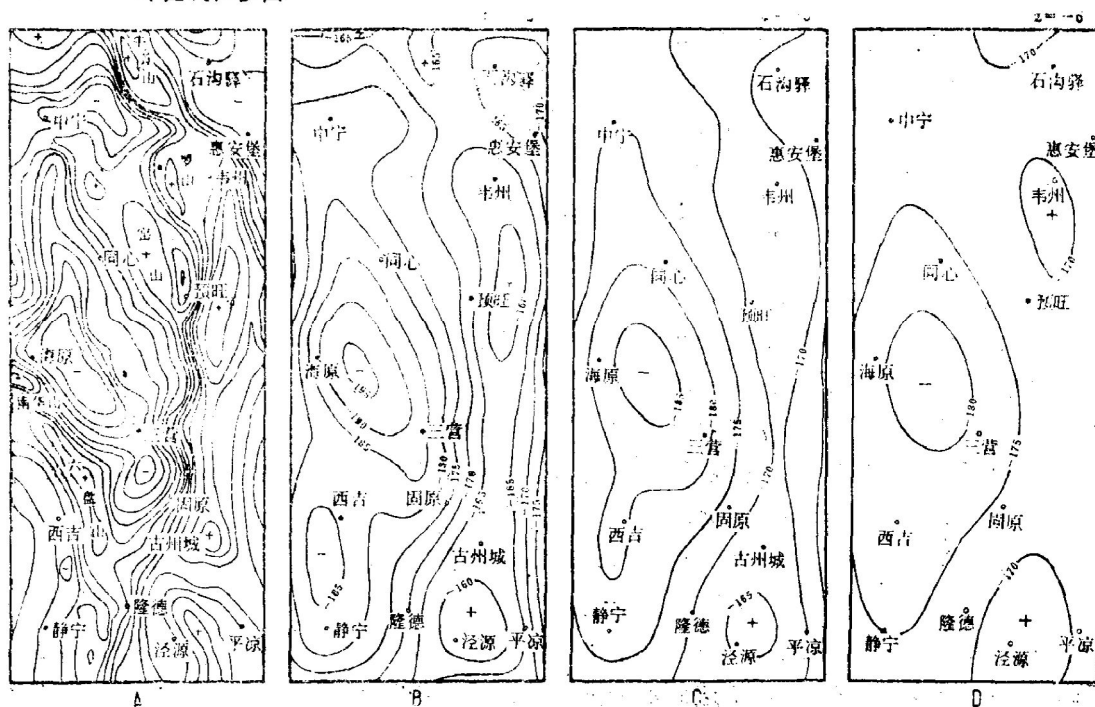


图8 南区布格重力异常与延拓重力异常图

在青铜峡-固原断裂东侧,即南北向构造带南部,重力异常为一南北向高带,随着延拓高度的增大,这个带的走向始终不变,反映了该区南北向重力高场源埋藏较深,也可能是浅部场源方向与深部场源方向相同的反映。从重力场特征看,掩冲推覆特征不明显,构造运动可能以逆冲平移为主,垂向位移较大。这些逆冲特征在沿冲沟做的地震剖面上也可看到,南北向构造带断裂为西倾逆冲断裂,断面倾角 60° 左右,且一直延向地下深处。

纵观鄂尔多斯盆地西部逆冲构造带深部,北区构造走向为近东西向,南区构造走向为近南北向,其中应有一大的断裂存在,根据地质特征,这条断层可能在中宁、中卫东西一线。

在本专题工作过程中,得到了郭忠铭副主任地质师、西北大学汤锡元教授、王定一副教授的悉心指导,本院电算室李超等同志协助完成计算和绘图,王乐、从国乾、帅世敏同志参加了许多基础工作,在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 李秀新、刘德良, 1979, 石油物探, 第2期。
- [2] 刘德良、李秀新, 1984, 地质科学, 第1期。
- [3] 肖敬涌等, 1983, 重力勘探资料解释手册, 地质出版社。
- [4] 宁夏地震队编, 1980, 一九二〇年海原大地震, 地震出版社。

DIGITAL PROCESSING AND APPLICATION OF GRAVITY DATA IN THRUST NAPPE BELT IN WEST ORDOS BASIN

Zhang Jun

(Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oilfield)

Abstract

The N-S stretched thrust nappe belt in west Ordos Basin is 600 km long and 50-100km wide with an area of 4500km². It is composed of N-S trending structural belt of the North China Platform in the east and the Liupanshan arc structural belt of Qinling-Qilianshan geocline in the southwest. The progressional solution of Laplace equation is used in this paper to make analytic continuation on gravity data of the present area. The nature and distribution of the slip surface of the nappe belt and the property of its deeper structures are explained as follows.

Zhuozishan Section: There are two slide surfaces in this section. One is the boundary surface between E-W trending high density-strong magnetic body and NNW trend high density-weak magnetic body (the Qianlishan Group), the other is the soft layer between Carboniferous-Permian coal measure and Cambrian-Ordovician limestones.

Yinchuan Section, The gravity low of Yinchuan is the reflection of Yinchuan graben. The gravity high of Niushou and Helan Mountains are the reflection of shallow structures; the gravity high of Hengshanbao and Majiatan reflects structural skeleton below T₁ and autochthonous rock bodies below the nappes respectively.

The South Section, The gravity positive anomaly to the west of the Qingtongxia-Guyuan rift (that is the arc structural belt of the Liupan Mountains) shows the structural property of allochthonous rock bodies. The area to the east of the rift shows gravity high and unevident feature of overthrust. It may be dominated by thrust and horizontal displacement.

The fault surfaces of N-S thrust belt of the present area dip west, the tilt angles of the shallow parts are steep and the deeper parts are gentle; the north section is gentle and the south section is steep with local parts inversed. The strike of deep-seated geological bodies stretches nearly EW in the north area and nearly SN in the south area. There is most likely a huge fault along Zhongning-Zhongwei line between these two sections.

龙门山北段地震勘探成果令人鼓舞

“川西北龙门山逆掩断层带有印支和喜山期的巨大推覆体存在；四川地质构造盆地向西北方向延伸了数十公里；而且，在推覆体基盘和推覆片中，有可供钻探的圈闭构造”。这一重大的勘探成果，是四川石油管理局地质调查处在1987年12月下旬召开的地震勘探汇报会上披露的。这是四川探区地震勘探工作在川西龙门山地区继70年代发现中坝气田之后取得的又一重要进展。

四川龙门山构造带是我国三大著名的推覆构造之一，又是四川油气勘探的一个后备区域。从1985年开始，四川石油管理局地质调查处与美国地球物理服务公司(GSI)联合组成中美地震队，采用较为先进的技术装备，在龙门山地区控制面积为3500km²的区域内，执行了为期两年的野外资料采集合同。两年中，他们共用了493个野外工作日，放了17390炮，作二维多次覆盖地震测线45条，长度为1645.708 km。他们的日平均生产效率、队年野外作业生产天数等多项指标，均创川内山地地震勘探新水平。

综合反映地震勘探成果的《龙门山区北段前山带地震详查总结报告》已于1987年12月按期提交并通过评审。取得的主要地质成果是：查明了龙门山区北段前山带有关层位的构造形态、高点位置、相互间的接触关系及断层展布情况；进一步落实了中坝等构造的形态、高点位置；首次利用地震资料证明了龙门山区北段有印支、喜山两期造就的巨大推覆体存在；发现了一批潜伏断高、潜伏背斜等。

有关技术人员分析认为，已经取得的地震勘探成果，证明龙门山构造带可供钻探的构造多、面积广、目的层深度适中，可望找到新的油气藏。一批建议钻探井位已由地质调查处正式向有关单位提交。

(屈永志)