

高精度航空磁测在塔里木盆地 油气勘查中的几点新认识

乔日新, 张用夏

(中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

摘要:以 1988 年和 1998 年高精度航磁资料为基础,探讨了塔里木盆地基底结构和断裂分布规律与特征,提出盆地由双重基底构成,巴楚隆起在中新生代曾发生过顺时针转动,民丰北及柯坪弧形褶断带分别是盆地南北缘出现的大型逆冲—推覆构造带等新认识。

关键词:塔里木盆地,高精度航磁,构造研究

中图分类号: P631.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2002)05-0334-06

我国航空磁测始于 50 年代中期,目前已拥有自制的先进仪器设备,如 HC-90K 高精度航空磁测仪(灵敏度为 0.002 5 nT),XXH 型电子补偿器, DW9603 微机收录系统, BG1.5、BG3.0 雷达测高仪及 GG-24 双星座卫星导航定位系统等。近 10 a 完成了塔里木盆地 1:20 万航磁测量,全区测量总精度为 ± 1.27 nT。航磁资料的解释采用了航遥中心研制的数据处理系统及改进外奎尔法,自动进行分层深度计算。通过对盆地基底构造研究,沉积地层磁性测定和弱小磁异常的分析,断裂、火成岩及局部构造的分布规模与异常特征的研究,特别是对挤压动力环境下地质构造的研究,提出了一些新的认识。

1 盆地深部基底变质相与构造特征

塔里木盆地的形成与演化一直受到该区深部构造的控制,区域航磁资料是了解该区深部构造的有效途径。在航磁 ΔT 图上,塔里木盆地显示为大范围宽缓升高的正磁异常区,磁场强度为 100~450 nT。在 400 km 高度的卫星磁场图上也显示为北东东走向的正磁力高,幅值达 0.8 nT。产生塔里木正磁异常区的磁源体具有很强的磁性,并具有巨大的范围与较大的厚度。经反演计算,该磁源体上界埋藏深度为 10~20 km,下界深度大于 40 km,视磁化强度为 $(200 \sim 1\,500) \times 10^{-3}$ A/m,推测盆地基底的主体是由中基性岩浆杂岩到超铁镁岩组成。

这些磁源体是属前寒武系结晶地块^[1],主要由

两类结晶基岩组成。一类为视磁化强度大于 600×10^{-3} A/m 的强磁性致密岩块,由中基性火成岩组成,其变质相多属基性麻粒岩相及角闪岩相,与米兰群和托格拉克布拉克群变质相一致^[2],前者铀—铅年龄值为 2 462.5 Ma,后者锆石蒸发年龄为 $2\,487.7 \pm 5.1$ Ma;另一类为视磁化强度小于 200×10^{-3} A/m 的弱磁性变质岩组成,变质岩相多属中酸性麻粒岩相、绿片岩相或斜长片麻岩等。

据重力资料计算,中国许多沉积盆地的地壳平均密度均大于相邻山区的平均密度,如果把补偿盆地内上层低密度($2.3 \sim 2.5$ g/cm³)的疏松沉积层的因素考虑进去,那么下伏结晶基岩的密度值还应高些,至少应高于地壳平均密度值(刘之龙,1978)。因此,塔里木结晶地块不仅具有较强的磁性,而且具有较高的密度,由致密的刚硬岩块组成^[1]。

塔里木盆地基底具双层结构特征,由上下 2 套不同磁性的变质岩组成。下层为航磁异常反映的磁性基岩,其时代属太古宙,一般均埋深在 10~20 km 以下。上层基底介于磁性基岩面与地震 T_g 界面(相当于元古宇顶界面)之间,其时代属元古宙,磁性不强或微弱,其磁化率一般均小于 20×10^{-5} SI,厚度变化在 1~8 km 之间。

塔里木结晶地块处于中元古界阿克苏群绿片岩系及下元古界变质岩系之下,它无疑是太古宙形成的。塔里木结晶地块至少由两三次构造旋回形成,因为那里出现了几组不同方向的磁异常带相互交汇

现象。第一组是塔中近东西向正磁异常带,称为喀什—罗布泊构造系。第二组由4条北东向正负相间的磁异常组成,称为和田构造系。第三组显示为北西向的磁异常,主要出现在巴楚与麦盖提之间的地区,分布较局限。从它们的相互交叉关系可以推测其相对时代。由于北东向和田构造系被近东西向的喀什—罗布泊构造系切断,因此前者的形成时间较早。如果喀什—罗布泊构造系为晚太古代形成,那

么和田构造系则可能形成于中太古代。

塔里木结晶地块的范围具有全盆地性,它不仅限定在北纬40°线以南地区,而是向北扩展到塔里木河附近(图1),其北界大致位于乌恰、阔什布拉克、柯坪、阿瓦提、轮台、草湖至尉犁一线,其西南界处于英吉沙、叶城南至和田一线的西南侧,东南边界则以民丰北1号断裂和车尔臣1号断裂为界,向东延伸到罗布泊地区,终止于东经91°附近。

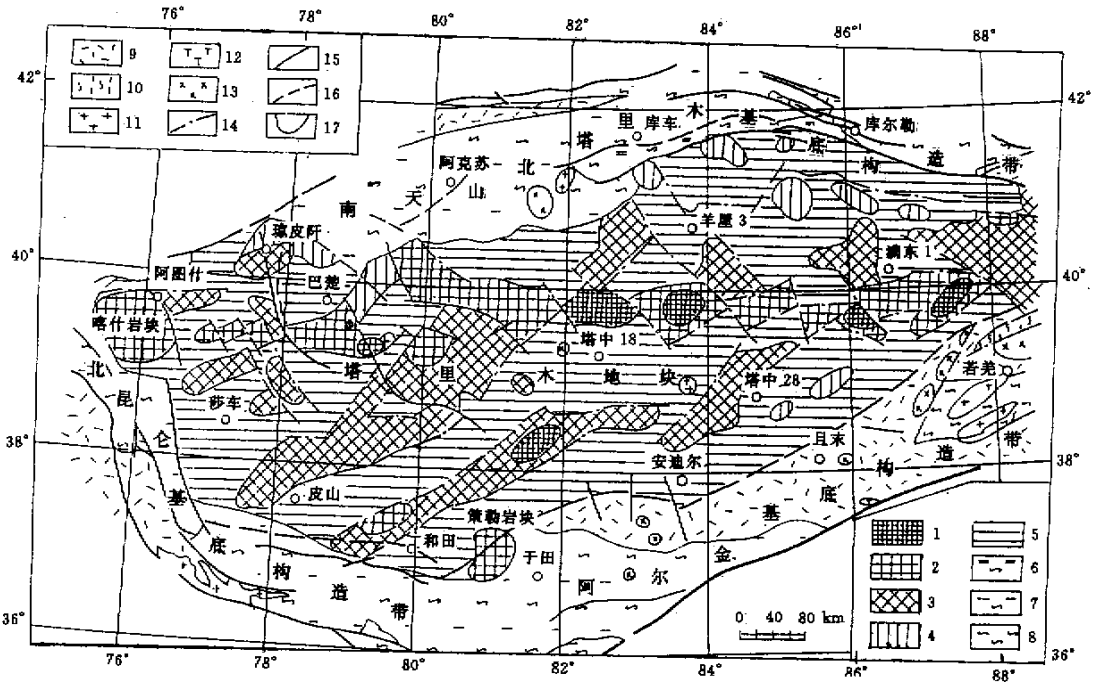


图1 塔里木盆地基底岩相构造

1— $M_s > 1500 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 具有很强磁性的太古宇刚硬岩块 2— M_s 为 $(1000 \sim 1500) \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 具强磁性的太古宇刚硬岩块 3— M_s 为 $(600 \sim 1000) \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 具较强磁性的太古宇刚硬岩块 4— M_s 为 $(200 \sim 600) \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 具磁性的太古宇刚硬岩块 5— $M_s < 200 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 前寒武系致密岩块 6— $M_s < 50 \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 弱磁性低绿片岩相塑性基底 7— M_s 为 $(0 \sim 200) \times 10^{-3} \text{ A/m}$ 弱磁性低绿片岩相(黑云母级)塑性基底 8—弱磁性高绿片岩相塑性基底 9—低角闪岩相塑性基底 10—绿片岩相与角闪岩相未分区塑性基底 11—中酸性火成岩侵入体 12—基性、超基性岩体 13—时代与岩性不明的火成侵入体 14—太古宙形成的基底古断裂 15—已确认的基底大断裂或岩石圈断裂 16—航磁推测断裂 17—基底岩相分界线。注:盆地内依据磁场特征、岩石磁化强度并结合部分露头 and 钻井资料而推断的,盆地周边依据地质资料和磁场特征确定的。

2 中央隆起带的特征及巴楚隆起的旋转位移

塔里木盆地中分布着一条近东西向的大型基岩隆起,自西向东由巴楚隆起、塔中隆起及塔东隆起组成,其中巴楚隆起是一个呈向西南突出的弧形基岩隆起,它的西段呈北北西向,东段呈北西西向。

巴楚隆起向东南延伸有2种情况(图2):第一,它向东与塔中隆起成斜列关系,其间被一条北西向鞍状凹槽隔开;第二,它向东南延伸直接插入民丰北凸起(逆冲构造带)之下。利用3~10 km非线性滤波深度数据编图,可以看出巴楚隆起以两排凸起和

一排凹陷的构造格局向东南方直接插入民丰北凸起之下。这两种延伸都可能是客观存在的,可能是不同时代或不同层次构造的反映。它呈北西向插向民丰北凸起之下,是巴楚隆起在喜山晚期构造的显示,而呈近东西延伸则是中央隆起在海西晚期的构造表示^[3]。

塔中隆起不是一个完整的基岩隆起,而是由7 km等深线圈出的2个北西向基岩凸起组成。这2个凸起呈北西向雁行式斜列关系,它们之间被一条呈北北西向的鞍状凹槽隔开,凹槽磁性基岩深度在9~10 km。区域构造单元之间呈斜列组合关系,表

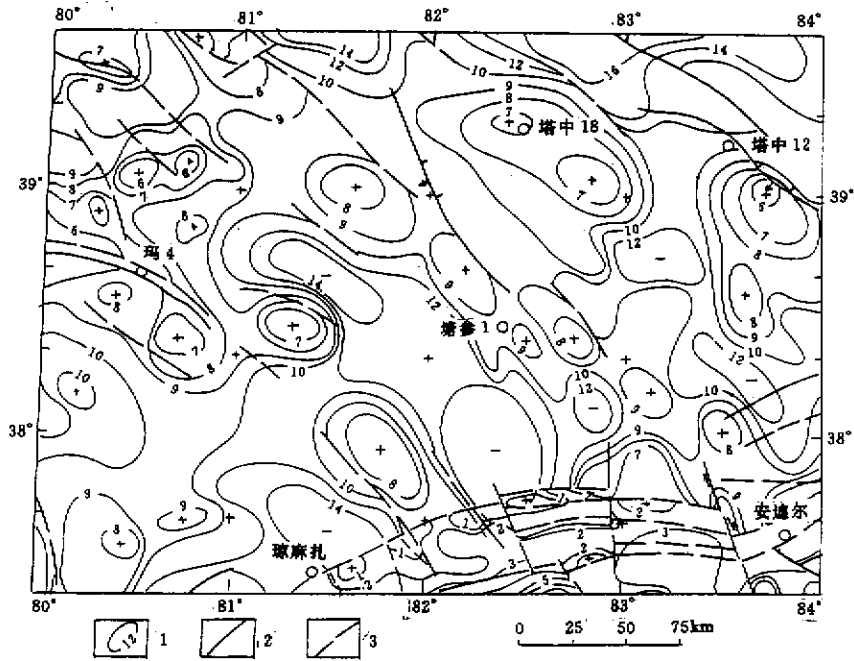


图 2 在 3 ~ 10 km 滤波深度图上显示的巴楚隆起与民丰北凸起之间的关系

1—前寒武系磁性基岩深度线 2—已知断裂 3—航磁推测的断裂

明它们是受到水平压扭力的作用而形成。

塔东隆起与塔中隆起、巴楚隆起所属的构造系列有明显差别。后两者是属于北西向压扭构造系列,而塔东隆起则属北东向基底构造系列。塔东隆起呈北东向,宽约 80 km,延伸长达 370 km 以上,磁性基岩埋深 4 ~ 7 km,东北段埋深稍浅,西南段相对较深。元古宇基岩之上覆盖有 3 000 ~ 4 000 m 厚的寒武系及奥陶系地层,中生界侏罗系及白垩系地层直接覆于奥陶系或石炭—二叠系地层之上,新生界地层厚度为 1 700 ~ 1 800 m。

塔东隆起与塔东南地区罗布庄凸起之间直接以车尔臣—星星峡断裂为界,在大部分地段上两者之间没有凹陷隔开。这种特殊的接触关系不是由同一个基底发生大面积波动形成,而是由于阿尔金走滑断裂系的平移错动,使 2 个异地的正向构造单元发生直接接触,这显然是后期地壳运动改造的结果。

属于巴楚隆起的吐木休克南凸起、塔中二号凸起及塔中一号凸起之间呈北西向雁行式排列,表明该区曾受到一对水平压扭力的作用。这对水平压扭力还使巴楚隆起的西段发生了顺时针转动。

通过航磁数据处理清楚地显示出巴楚隆起两侧边界断裂并不是以一条完整的弧形断裂出现,而是由 3 条弧形断裂在平面上组成犁式结构(图 3)。第一条弧形断裂为玛扎塔格断裂;第二条弧形断裂为罗斯塔格断裂;第三条弧形断裂继色力布亚断裂。

这 3 条弧形断裂在平面上呈犁式组合,显示出巴楚隆起的西南边界曾发生过多顺次顺时针水平旋转。

航磁资料还显示出巴楚隆起两侧边界断裂具有反“Y”字型组合特征,如它的东北侧呈北西西向的吐木休克—印买里断裂与呈北北西向的阿恰断裂之间、西南侧的北北西向的色力布亚断裂与北西向阔什布拉克断裂之间就具这种组合特征。它们实际上是 2 组不同方向的平行断裂组合,即呈北北西向的阿恰断裂与色力布亚断裂为一组,呈北西向的印买里断裂与阔什布拉克断裂为另一组。每对边界断裂的走向平行,而逆冲方向相反,显示出巴楚隆起的形成与水平挤压活动有关。前一对平行断裂具背向逆冲与平移走滑特征^[4],并被认为是巴楚隆起现今边界断裂的反映。那么后一组平行断裂又具有什么地质意义呢?如果说阿恰断裂及色力布亚断裂分别是现今巴楚隆起的东北边界西南边界的话,那么航磁资料显示的印买里断裂与阔什布拉克断裂则很可能是中生代时的古隆起西段边界断裂的表示。因为这 2 条北西向断裂向北切断了柯平隆起上古生界地层,其活动时间应在古生代之后。

航磁资料还显示出塔里木盆地中央存在一条近东西向分布的古隆起^[1],向东延伸到塔中地区,在地质历史中一直延续到加里东期至海西早期,隆起轴部位于麦盖提至和 2 井附近。呈东西向分布的中央古隆起转变到现今呈北北西方向分布巴楚隆起,

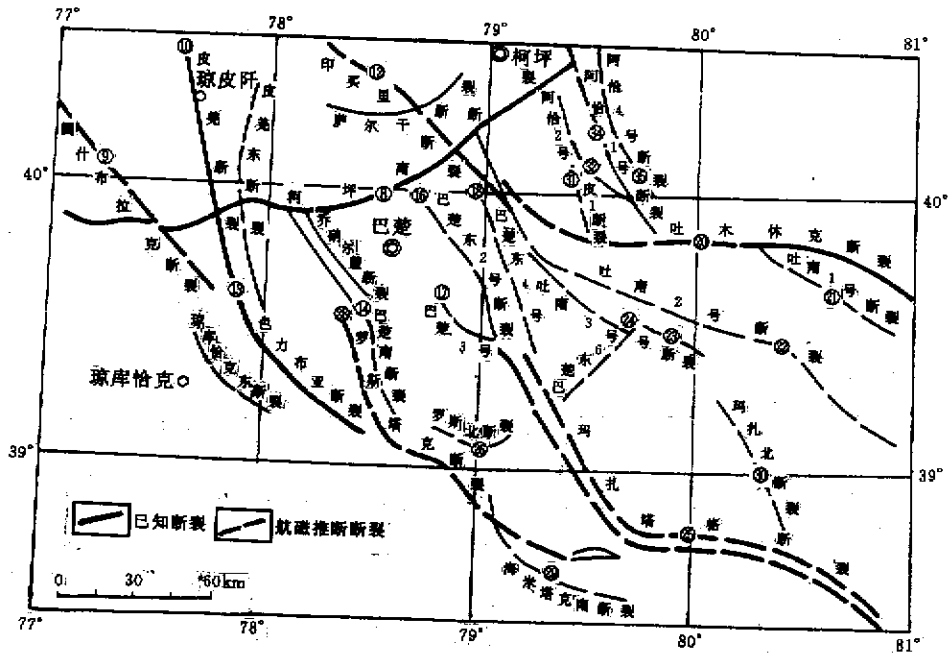


图3 巴楚隆起边界断裂展布特征

表明自海西期以来古隆起曾发生过顺时针旋转位移,其转角近70°

目前对于塔里木盆地中央古隆起的西段曾发生过顺时针旋转位移的动力机制已可以解释。从现今巴楚隆起西南缘的弧形边界与帕米尔及西昆仑隆起东北缘的弧形边界是何等相似与平行,就不难发现这些构造线是在统一的地应力场作用下形成的。自古生代以来,中亚地区不断受到南来的羌塘、冈底斯及印度等微板块的碰撞与拼合,引起中亚大陆内不均一的水平挤压。印度陆块增生到亚洲大陆时间发生在始新世,陆块的前锋部位并不是一条直线,而是以东北与西北端2个“突刺”先行插入。西北突刺向北挤压形成了帕米尔隆起,在它的东西两侧出现了向西南突出的前陆拗陷,也使原来近东西向的塔里木中央隆起的西段向北旋转成北北西向的巴楚隆起。这就是因为板块碰撞在中亚陆内引起的远程效应之一。

3 盆地边缘大型逆冲—推覆构造研究

从研究航磁异常与地质构造之间的关系中发现,中国西北地区宽缓正磁异常区显示的前寒武系结晶地块的范围,也是地块型沉积盆地原始范围的表示(张用夏,1989)。塔里木结晶地块控制着沉积盆地的形态与范围。在塔里木盆地西部地区呈北东向宽缓正磁异常的西南端并未终止于和田断裂附近,而是向西南延伸插入到铁克里克基岩“隆起”之下,至少向南扩展20~60 km,显示出塔里木结晶地

块的南缘边界并未终止于和田断裂附近,盆地的南界向南扩展到铁克里克北缘断裂附近及其南侧。

据地震资料,在和田断裂与铁克里克北缘断裂之间,震旦系底界深度处于0.5~7 km,而航磁反映该区磁性基岩深度大于14 km(图4)。这种现象有可能是该区存在双层基岩顶面,航磁反映14 km深度界面是沉积盆地原始底界深度的表示,而地震反映的0.5~7 km深度则是推覆面之上外来推覆基岩深度的表示。如果有这种可能,近水平的推覆滑脱面大致深8~10 km。

从和田县西桑株河地质剖面上看,由石炭系灰岩组成的飞来峰向北推覆到西域砾岩(Q_{1x})或上新统之上。石炭系飞来峰是以铁克里克北缘断裂北侧康开断层向北推覆过来,其水平推覆距可达10 km以上,推覆时间为上新世之后。推覆面为和田断层面,上陡下缓,Tg₈界面推覆到第三系之上,推测断面深度处于海平面下7 km附近。如果从航磁基岩10 km等深线所圈的范围估算,在和田、墨玉南侧掩覆的凹陷面积约6 000 km²。

在策勒至北民丰地区也显示可能有一条巨大的推覆构造带。在航磁ΔT平面图上,策勒附近是一个宽缓的正磁异常区,它很像喀什正磁异常那样,是一个深埋的结晶岩块的反映。在策勒—北民丰地区则有2种深度出现,一类是在大于10 km滤波深度图上显示的深度值大于14 km,是一个基岩深凹的表示;另一类在0~3 km滤波深度图上则出现大片0~2.0 km的深度值。在地质图上兰帕附近已零星

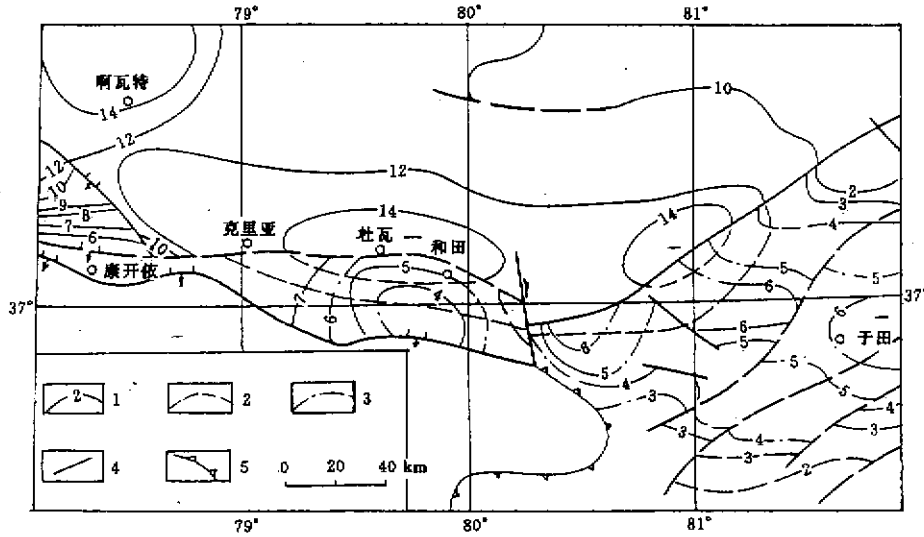


图4 盆地南部航磁与地震所反映的基岩深度

1—航磁基岩深度线 2—航磁推测的基岩深度线 3—地震反映的基岩深度线 4—基底断裂 5—盆地边界

出露元古宇长城系变质岩,表明该区是个基岩隆起。策勒至北民丰地带与和田断裂南侧的构造特征很类似,也可能出现一条大型的逆冲推覆构造带。处于14 km 以下的深度值可能是盆地主体部分基岩深度的显示,而处于2 km 以上的深度值则是外来席体基岩深度的显示。穿过民丰北断凸的地震剖面也显示民丰北断凸构造带向北逆冲到北侧塘古孜巴斯坳陷古生界及新生界之上,逆冲断面南倾,上陡下缓(图5)。如果依据12 km 等深度线所圈定的范围估算,这部分被掩覆的凹陷面积可达5 000 km²。

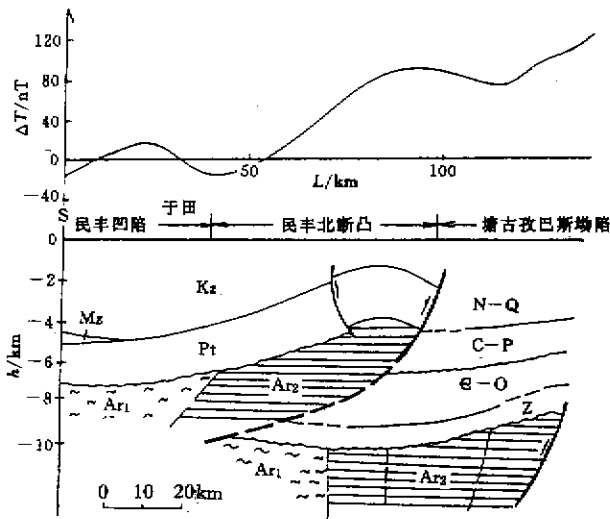


图5 民丰北断凸航磁 ΔT 异常与地震解释剖面对比

Ar₁ 为太古宇具磁性基底; Ar₂ 为太古宇弱磁性基底

和田断裂是由一两条断面南倾的犁式逆冲断层组成,断面上陡下缓,在深部两断面合入石炭统滑脱面上^[41]。和田断裂的强烈活动时期在中新世末,地

壳滑脱面大致处于地下16~22 km 深度间,与大地电磁测量反映的壳内高导层深度一致(图6)。

从航磁与地震剖面分析,西昆仑山前逆冲推覆构造带主要分布在铁克里克地带(叶城—和田地段南)和塔东南策勒—北民丰地带。它们连接起来是一条大型的呈近东西向的逆冲推覆带,延伸长度达500 km 以上。虽然它们处在同一条带上,但各段的发育程度及表现形式却有差别。

叶城至和田南侧是逆冲推覆最强烈的地带。航磁资料表明刚硬的塔里木结晶地块插入到铁克里克元古宇变质岩及古生界地层之下,被掩覆宽度达20~60 km。它表示了铁克里克地区并不完全是一个生根的基底断隆,而是西昆仑山前逆冲推覆带的外来岩席。更重要的意义还在于塔里木盆地西南坳陷的南界并不仅仅处于现今的盆地边界附近,而是向南还扩展了很大的面积,有可能在元古宇或古生界之下存在中、新生界沉积地层。

塔北东南策勒—北民丰地带也有较大的坳陷面积被掩覆在元古宇变质岩带之下。据地震资料反映在民丰北断凸上元古界顶界面深度一般处于6.0 km 以上至出露地表,而航磁反演的磁性基岩深度可达12~14 km。这种界面深度差异不可能用巨厚的非磁性变质岩来解释。因为通过于田河的地震剖面也显示民丰北断凸变质岩基底向北逆冲到新断层之上。从现今很少的地震剖面资料确定逆冲水平推覆距为20 km,但从航磁资料确定被掩覆的刚硬基底分析,向北逆冲水平推覆距可达40~60 km。根据克里阳地区和和田断裂已影响到中新统及上新统地层

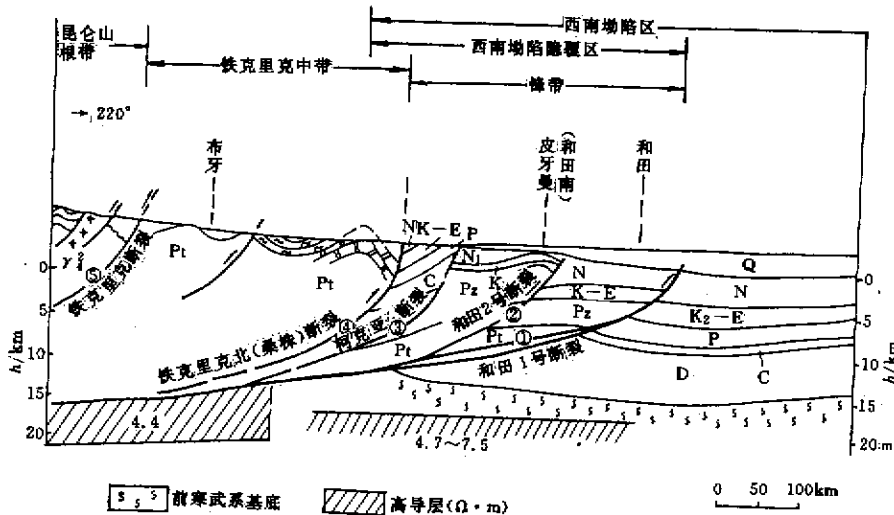


图 6 铁克里克逆掩推覆构造带剖面(张用夏,1995)

判断,这条逆冲推覆构造带主要形成于上新世晚期。正是塔里木盆地西南坳陷基底急剧下沉,接受 8 ~ 10 km 厚度的碎屑岩沉积,也包括昆仑山在内的青藏高原急剧上升时期,被抬升 3 500 ~ 5 000 m。毫无疑问,西昆仑山前逆冲推覆构造带的形成与塔里木盆地及青藏高原的构造演化密切相关。

西昆仑山前逆冲推覆构造带并不是孤立地出现于中亚地区,还在准噶尔盆地南缘、西北缘、东北缘出现。在吐哈盆地的北缘及塔里木盆地的北缘也被发现。在塔里木盆地北缘,柯坪地区由一系列向南突出的呈弧形分布的叠瓦逆冲构造带组成,这些逆冲岩席主要是以古生界单面山形式出现,断面大都北倾,上陡下缓,向下延伸都归入到柯坪南断裂的主断面。

在新编的磁性基岩深度图上,处于印买里断裂以西的柯坪隆起西部地区并不是以基岩隆起出现,沿琼皮阡地带呈一个近东西向分布的凹陷,即琼皮阡凹陷,基岩埋深大于 10 km,向西与喀什凹陷相连通。隆起东北部则存在 2 个呈北东东向展布的凹陷,即乌什凹陷和温宿凹陷,虽然它们的基岩深度仅有 5 ~ 6 km,但它们是库车坳陷向西的延伸,可能与库车坳陷具有相同的沉积特征。在柯坪隆起中部的柯坪、阿合奇至阿克苏地区仍然以基岩隆起面貌出现,基岩深度一般在 3.0 km 左右,阿克苏西侧已显露中元古界阿克苏群绿片岩系。

柯坪隆起西部地区地面地质构造与航磁显示的深部构造相矛盾,地面为弧形断褶带,深部为基岩凹陷,这可能与该区特殊的构造变动有关。从塔里木盆地边缘构造分析,柯坪弧与北民丰弧有许多相似性,柯坪弧位于盆地北缘并向南突出,而北民丰弧位

于盆地南缘则向北突出。前者水平推力来自天山,后者水平推力来自西昆仑山。民丰北弧形逆冲带是一个巨大的推覆构造,柯坪弧也可能是盆地北缘另一个巨大的推覆席体。

近年的地震成果也显示出柯坪南断裂可能是一条推覆滑脱面,断裂上盘的二叠系向南逆冲到新生界第四系(T₂界面)之上。该断面北倾,上陡下缓,再往深处延伸已转为近水平产状,因此柯坪断褶带可能是外来的逆冲岩席。主要滑脱面是寒武系下部页岩及含石膏泥岩,其活动期为喜马拉雅期。柯坪塔格逆冲推覆面深度可能埋深于 3 ~ 4 km 之间。在区域滑脱面之下,该区可能还余有 2 ~ 6 km 的深度段,这可能是被掩覆的原盆地沉积地层厚度的表示。这套地层除有 1 ~ 3 km 厚度的新生界外,余下的地层当属古生界。这些逆冲构造带有一个共同的规律,都是从相邻山区向盆地内逆冲推覆。这种构造现象既与中亚地区处于水平挤压的动力环境有关,又与中亚地壳组成的不均匀性有关。据航磁资料分析,中亚地区是由具磁性的刚硬结晶地块与具弱磁性的塑性基底带镶嵌组合而成,前者包括塔里木、准噶尔、吐哈及伊犁等结晶地块,后者则界于上述结晶地块之间的山系地带。

当受到相同的水平挤压动力作用时,不同刚硬(或塑性)的基底构造变形也有差异。致密的刚硬地块往往下沉成盆,而低密度的塑性基底则往往上拱褶皱成山,这就像处于未固结的稠泥浆中的砖块,当受到水平挤压时发生下沉,而塑性泥浆则上拱成隆一样。在泥浆与砖块间塑性基底与刚硬地块之间将出现由前者向后者的推覆或逆冲。

(下转 371 页)

THE APPLICATION OF TEM TO GEOTHERMAL EXPLORATION IN TENGCHONG

LI Wen-yao , Liao Zhong

(*Geophysical Prospecting Party , Southwest Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals , Kunming 650500 , China*)

Abstract : There are rich geothermal resources in Tengchong. The TEM of line source array was applied to geothermal prospecting in Tengchong. Through drill hole verification of TEM anomaly , a geothermal body was discovered at a depth of over 1000 m.

Key words : TEM line source array ; geothermal exploration application ; Tengchong

作者简介 : 李文尧(1961 -) 男 , 广东化州县人 , 1983 年毕业于桂林工学院物探专业 , 高级工程师。现任西南有色地质勘查局物探队副队长兼总工程师、云南省地球物理学会常务理事、云南省地质学会理事。发表论文数篇。

(上接 339 页)

4 结论

1. 塔里木盆地具双层结构特征 , 上层为中、下元古界变质岩系 , 下部是太古宇结晶地块 , 结晶地块具有全盆性。

2. 巴楚隆起两侧边界断裂具背向逆冲与平移走滑的特征 , 表明它的形成与水平挤压活动有关 , 并在挤压过程中发生旋转位移。

3. 盆地南北边缘在水平挤压作用下 , 形成了多处逆冲推覆构造带 , 在这些推覆构造带之下可能有中、新生界沉积地层存在 , 因此要重视在推覆构造带上的找油气前景。

参考文献 :

- [1] 张用夏. 塔里木盆地区域构造特征[J]. 地球物理学报 , 1982 , 25(3).
- [2] 陈哲夫 , 戚守德 , 梁云海 , 等. 新疆开合构造与成矿[M]. 乌鲁木齐 : 新疆科技卫生出版社 , 1997.
- [3] 贾承德 , 魏国齐. 盆地构造演化与区域地质[M]. 北京 : 石油工业出版社 , 1995.
- [4] 康玉柱. 中国塔里木盆地石油地质特征及资源评价[M]. 北京 : 地质出版社 , 1996.
- [5] 张德润 , 郑广如 , 孙国明 , 等. 罗布泊及周围地区磁场构造特征及含油气远景[J]. 物探与化探 , 1987 , 11(5) : 321 - 327.
- [6] 张德润. 塔里木地台与华北地台的关系[J]. 物探与化探 , 1990 , 14(2) : 114 - 117.

NEW KNOWLEDGE OBTAINED FROM THE APPLICATION OF HIGH - PRECISION AEROMAGNETIC SURVEY TO OIL AND GAS EXPLORATION IN TARIM BASIN

QIAO Ri-xin , ZHANG Yong-xia

(*China Aerogeophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources , Beijing 100083 , China*)

Abstract : Based on high-precision aeromagnetic survey conducted in 1988 and 1998 , the authors deal with the basement structure and distribution of faults in Tarim basin. Some new opinions are put forward in this paper : the basin is characterized by double structure ; Bachen uplift experienced clockwise rotation in Meso-Cenozoic period ; Minfengbei and Keping arcuate folded-faulted zones are large-scale thrusting - nappe tectonic zones occurring at the southern and northern edges respectively.

Key words : Tarim basin ; high-precision aeromagnetic survey ; tectonic investigation.

作者简介 : 乔日新(1950 -) 男 , 内蒙古察右后旗人。1976 年毕业于长春地质学院石油物探专业。现为国土资源航空物探遥感中心高级工程师从事航空物探生产和科研工作 , 发表论文十余篇。