

论中国西部岩石圈三维结构及其对 寻找油气资源的启示

袁学诚

(中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘要:利用卫星重力异常研究中国西部岩石圈构造,发现中国西部壳内存在规律、清晰的平行线状排列盆山构造。自北而南是:额尔齐斯盆地、北准噶尔隆升带、天山北盆地(或天北盆地)、天山隆升带、淖毛湖—乌力吉盆地、天山南盆地(或天山盆地)、库鲁克塔克—北山隆升带、阿尔金山—祁连山北盆地(或塔南盆地)、西昆仑—阿尔金—祁连山隆升带以及柴达木盆地和藏南盆地。壳内盆地主要形成于印支—燕山期强烈的挤压褶皱带内。喜马拉雅期,在印度板块自南西向北东的俯冲作用下,使婆罗科努山—察布查尔山—阿拉沟山—额尔宾山—霍拉山等山系横向隆升,和天山山脉一起,将新疆地区分割成伊宁盆地、准噶尔盆地、吐哈盆地和塔里木盆地,形成当今新疆地貌。研究表明,上述横向隆升山脉和其他北西—南东向新构造,在岩石圈地幔中均有相应的卫星重力异常,推测新构造运动的动力来自岩石圈地幔。对青藏高原的研究表明,青藏高原以雅鲁藏布江断裂、班公湖—怒江断裂、澜沧江和金沙江断裂等一系列相互平行的断层和其夹持的条形地块为特征,表层构造与壳内构造不符。这些条形构造和青藏高原地壳向东南的逃逸构造仅发生在上地壳。研究还表明印度板块俯冲到地幔仅发生在西藏西南部。在川西—藏东存在南北向的稳定地块,阻挡了印度板块向青藏高原俯冲的进程。从这项研究中得到启示,西部寻找油气资源应考虑:①不要局限于新生代盆地;②研究盆地的构造背景要考虑深部构造的控制;③基础研究对寻找油气资源能发挥重要的预测作用,可以为寻找古生代、中生代油气田提供线索,为部署工作提供参考。尤其应对天北盆地、天南盆地、塔南盆地、柴达木盆地,以及藏南盆地的深部整体面貌及它们对地表构造的控制作系统的调查研究。

关键词:卫星重力;深部构造;西部盆山构造;青藏高原深部构造;油气资源

中图分类号:P534.45~46 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2005)01-0001-12

1 卫星重力异常与岩石圈结构

通常油气普查都看重近地表地球物理方法,有效勘探深度一般不超过上地壳。而笔者是首先对中国西部岩石圈进行三维结构研究,在此基础上讨论中国西部寻找油气的远景地区。

中国岩石圈历经分裂、运移、拼合等复杂过程,到中生代时已成为一个统一的大陆,夹持于西伯利亚板块、印度板块和太平洋板块之间^[1],中、新生代强烈的构造运动,对这个拼合的大陆又重新改造,才成为今天的岩石圈。

在地球动力作用下,大陆遭受改造发生构造变形的主要形式之一是形成新的盆地和山岭。盆地和山岭的形成都是由于岩石圈局部应力的改变。当岩石圈受到拉张时,积聚的局部应力常常通过地壳厚度或密度的调整而释放,达到 Airy 重力均衡或 Platt 重力均衡。但若岩石圈受到挤压时,局部应力

的聚集不能释放,物质质量在流变性强的地区聚集,形成山岭,流变性弱的地区形成盆地。在自由空气重力异常图、卫星重力异常图和均衡重力异常图上,都会产生明显的异常。中国东西部的重力均衡异常有很大差异^[2],也就是因为东部在地壳受到拉张减薄的过程中,应力通过岩石圈内,尤其是壳幔附近的塑性物质的流动而释放,不断作出均衡调整。西部在挤压过程中,应力积聚无法释放,重力均衡异常值很高,岩石圈尚处在强大的不均衡的挤压环境中。

利用重力研究岩石圈构造时,卫星重力具有独特的作用。利用卫星重力资料不但可以得到较深处物质产生的重力场,并且可以利用对重力场的分解处理,得到分层深度的异常特征,用以分析研究不同深度物质对重力场的贡献。

获得卫星重力异常有几种不同方法,其中之一是对卫星的轨道进行分析,用地球重力场模型的位系数推算得到^[3]。将重力

收稿日期:2004-10-18;改回日期:2004-12-22

基金项目:国土资源部专项计划项目(200010103)资助。

作者简介:袁学诚,男,1928年生,教授级高级工程师,主要从事深部地球物理工作;Email:xcyuan@263.net.cn。

位展开为球谐函数级数,不同阶数的卫星重力异常反映异常源的深度不同。阶数愈高,场源愈浅;阶数愈低,场源愈深。

重力位及大地水准面的球谐函数展开式如下:

$$g = \frac{fM}{a} \frac{1}{r} \sum_{n=2}^{30} \sum_{m=2}^n (n-1) \left(\frac{a}{r}\right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin\theta) \quad (1)$$

$$N = \frac{fM}{a} \frac{1}{g_0} \sum_{n=2}^{30} \sum_{m=2}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin\theta) \quad (2)$$

f 为万有引力常数, M 是地球质量, a 是地球赤道半径, g_0 是正常重力值 ($g_0 = 980 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$), Φ, θ 和 r 是计算点以地心为坐标轴零点的纬度、经度和离地心的距离。 C_{nm} 和 S_{nm} 是 n 阶 m 次全归一化球谐系数; $P_{nm}(\sin\Phi)$ 是缩合 Legendre 多项式。

Bowin^[4]发现,重力位和大地水准面展开为球谐函数,它们的某一特定阶次的比是一常数。将 n 阶的重力 g_n 和大地水准面 N_n 的球谐表达式相除,得到:

$$\frac{g_n}{N_n} = \frac{980(n-1)}{r} \quad (3)$$

其中

$$g_n = \frac{fM}{a} \frac{1}{r} \left(\frac{a}{r}\right)^n (n-1) \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin\theta) \quad (4)$$

$$N_n = \frac{fM}{a} \frac{1}{g_0} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin\theta) \quad (5)$$

可见, n 阶的重力 g_n 和 n 阶的大地水准面 N_n 的球谐表达式之比 g_n/N_n 不依赖球谐系数,仅仅依赖于阶次 n 和地球半径 a 。

若假定某一阶次的异常由深度为 d_n 处的等价质点所引起,就可得到重力场球谐函数阶次与场源深度的 Bowin 近似关系式:

$$d_n = \frac{a}{n-1} \quad (6)$$

其中, n 为重力场球谐函数阶次(重力异常阶次), a 为地球半径(约 6400 km)。

笔者将按 Bowin(6)式定义的深度称为“Bowin 深度”。

中国地球物理图集^[5]中刊登了 5 幅卫星重力异常图。它们的阶数各为 2-49 阶^[3]、2-180 阶^[6]、2-360 阶^[7]、50-100 阶^[8]和 101-180 阶^[9]。按公式(6)计算得到 2-49 阶的 Bowin 深度为 6400~130 km, 2-180 阶的 Bowin 深度为 6400~36 km, 2-360 阶的 Bowin 深度为 6400~18 km, 50-100 阶的 Bowin 深度为 130~65 km, 101-180 阶的 Bowin 深度为 65~36 km。

将 Bowin 深度用于估计若干阶次之间的场源深度是没有严密的数学根据的,但利用它们的 Bowin 深度之差可以给

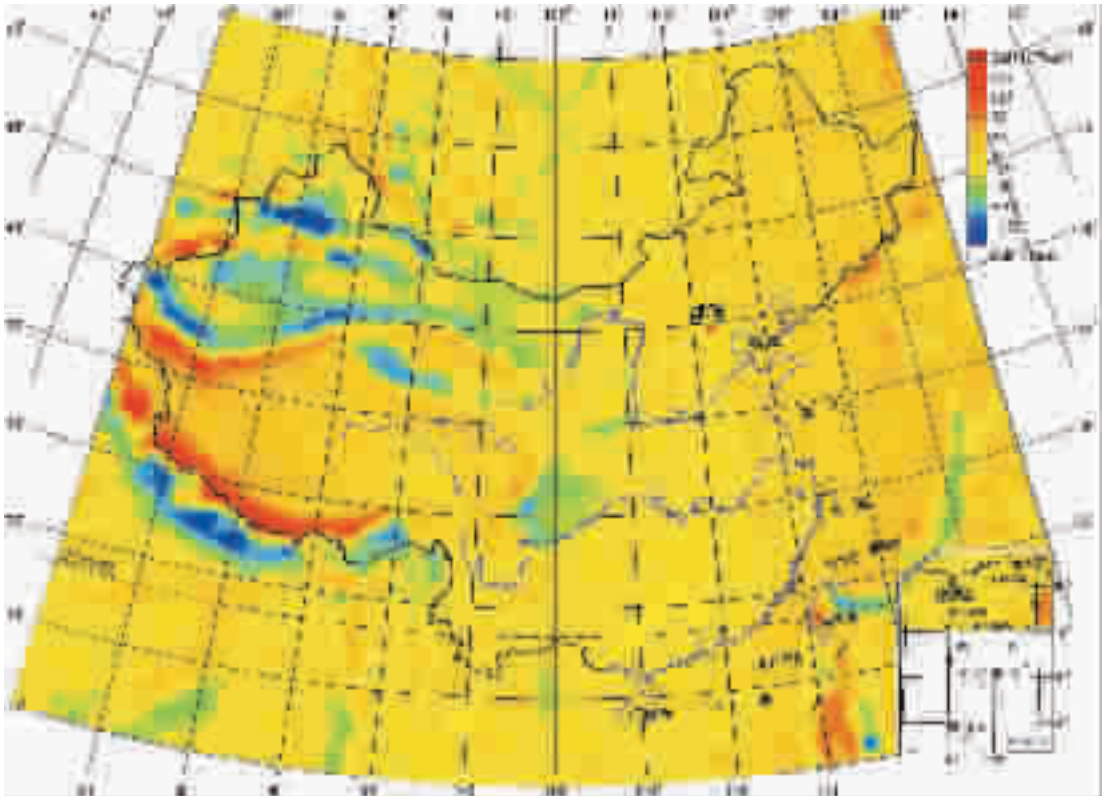


图 1 2-360 阶卫星重力异常图^[7]

Fig.1 2-360 satellite gravity anomaly^[7]

人们一个深度的定性估计概念。中国东西部岩石圈结构不尽相同。在研究西部岩石圈构造时,不妨称 Bowin 深度大于 130 km 的深度为 Bowin 地幔;Bowin 深度为 65~130 km 的深度为 Bowin 岩石圈地幔;Bowin 深度为 36~65 km 的深度为 Bowin 下地壳;Bowin 深度为 18~36 km 的深度为 Bowin 中地壳。而称 Bowin 深度小于 18 km 的深度为 Bowin 上地壳。

2 高切卫星重力异常

高切卫星重力异常是指切除了高于 360 阶高频谐波的卫星重力异常,或 2~360 阶卫星重力异常(图 1)。它的 Bowin 深度为 18~6 400 km。是中国地球物理图集^[9]所刊的 5 幅卫星重力图中,涵盖深度范围最广的重力图。

虽然它包含从地壳到地心几乎整个地球的重力场,但是由于不同阶次的异常的波长极不相同,它们在异常图上的表现也极不相同。如 360 阶卫星重力异常的波长约为 100 km,而 2 阶卫星重力异常的波长约为 20 000 km。所以,在 2~360 阶卫星重力异常图上明显的局部异常主要是谐波较高阶的或者说较浅的物体产生的异常,低阶异常只能作为宽广的背景值存在。

卫星重力异常属自由空气重力异常。2~360 阶卫星重力异常与地表测量得到的自由空气重力异常相比较,它的分辨率较低,但它的测量点高度大,不受测点周边物体引力的影响。

西方石油勘探工作者往往看重地表自由空气重力异常,其原因之一是它的零值线与盆地的边界相近,所以常可用它来圈定盆地。对于 2~360 阶卫星重力异常,由于它包含更多的长波长成分,按它的零值线勾画出来的是大区域构造(图 2)。据它可以将中国西部划分出一个巨型盆地构造,即是青藏高原和环青藏高原山地。

但如勾画出 $-50 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 等值线,将 $-50 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 等值线与盆地的边界比较,发现 $-50 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 等值线的位置与几个大盆地边界基本一致。这就说明,长波长重力异常幅度约为 $-50 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 。按 $-50 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 等值线圈定的中国西部盆地可以有(图 3):准噶尔盆地、塔里木盆地、三塘湖盆地、吐哈盆地、柴达木盆地、四川盆地、墨脱盆地,以及其他一些规模较小的盆地,包括临河盆地、银川盆地和渭河盆地等。

卫星异常显示准噶尔盆地与伊宁盆地、克拉玛依盆地在深部相连,同属一个盆地带,这个盆地带向西延伸到哈萨克斯坦的阿拉木图。高切卫星重力异常还揭示,塔里木盆地向东延伸到敦煌、酒泉、张掖、终至于武威,并与巴丹吉林沙漠相连。而巴楚隆起和库鲁克塔克则不包括在塔里木盆地内。三塘湖盆地在重力异常图上是一个独立的盆地,规模不小。

从 2~360 阶卫星重力异常图上还可以识别出 3 个重要隐伏断层(图 3):

北塔山—乌鲁木齐—库尔勒断裂,此断裂是塔里木盆地的西北部和准噶尔盆地的东界,同时又为吐哈盆地和淖毛湖—乌立吉盆地的西界。

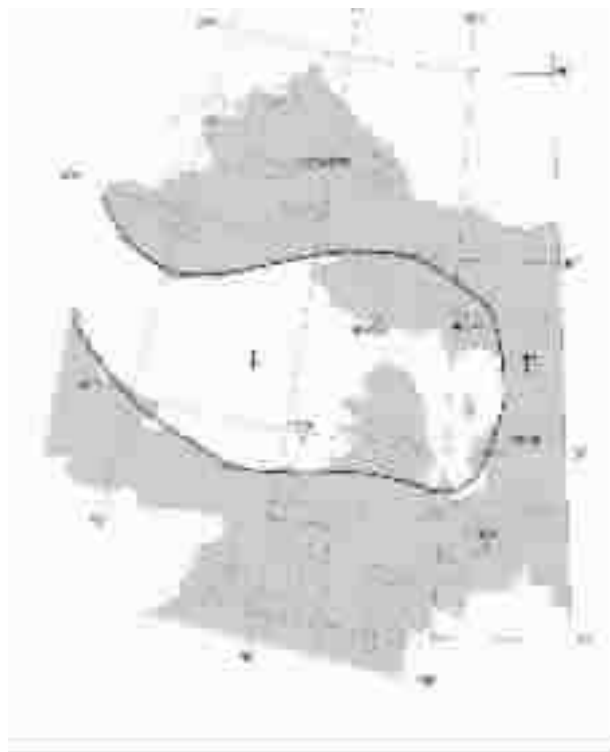


图 2 2~360 阶卫星重力异常正(白色)负异常(灰色)区分布

I—青藏高原;II—环青藏高原山地

Fig.2 The distribution of positive value(white) and negative value(grey) of 2~360 satellite gravity anomaly

I—Qinghai-Tibet plateau;

II—Hilly country surrounding the Qinghai-Tibet plateau

下马崖—白山断裂,是吐哈盆地和淖毛湖—乌立吉盆地的西界。

于田—克里雅河断裂,是巴楚隆起的东界。目前尚不清楚它和北塔山—乌鲁木齐—库尔勒断裂的关系。如果它们相连,是同一断层,则意义更为重大。

3 中国岩石圈 Bowin 下地壳结构

101~180 阶卫星重力异常是切除了区域重力场背景和近地表地壳不均匀引起的重力场后剩余的卫星重力异常(图 4)。在图 4 上,整个西部地区呈现条带多环状正负相间重力异常群。东部地区则接近正常场。

3.1 新疆地区 Bowin 下地壳结构

虽然在许多地球物理图件中(如布格重力异常图),新疆和青藏有明显区域异常,但在 101~180 阶卫星重力异常图中,却找不到明显的与这两个地区吻合的区域异常。这说明在 Bowin 下地壳的深度范围内,整个西部地区只有局部的不均匀,而没有区域性的差异。

在 101~180 阶卫星重力异常图中,新疆和青藏高原的分

界,只能从绵亘在西昆仑—阿尔金山—祁连山的局部重力高带识别出来。西昆仑—阿尔金山—祁连山重力高带呈串珠状,一共有4个局部异常。紧挨着这条重力高带,在其北侧和南侧各有一条重力低带。北侧的塔南(和田—且末—罗布泊—河西走廊)重力低带也呈串珠状,有4个局部重力负异常,位置与西昆仑—阿尔金山—祁连山的重力高带上的4个局部正异常相对应。南侧的青藏高原北部重力低异常带中,如果将柴达木重力低也算上,也有4个串珠状局部异常与之相对应。这可能意味着,塔南重力低和青藏高原北部重力低同为西昆仑—阿尔金山—祁连山的山前盆地,它们与西昆仑—阿尔金山—祁连山孪生,在它们的双向挤压下,形成西昆仑—阿尔金山—祁连山山链。并且,沿整个西昆仑—阿尔

金山—祁连山山系,碰撞挤压的应力强度是不均匀的,出现局部重力高和局部重力低的地区是造山运动应力较强的地区。

自西昆仑—阿尔金山—祁连山重力高向北,卫星重力异常带依次为:

(1)塔南重力低。从和田经且末、罗布泊到河西走廊。重力低带由4个重力低组成。和田重力低从叶县到和田,且末重力低位于且末之北,河西走廊重力低从罗布泊东经红柳园至金昌。

(2)巴楚—库鲁克塔格—北山重力高。由巴楚重力高,库鲁克塔格重力高,公婆泉—巴丹吉林沙漠重力高等3个重力高组成。在巴楚重力高与库鲁克塔格重力高之间还可以看到

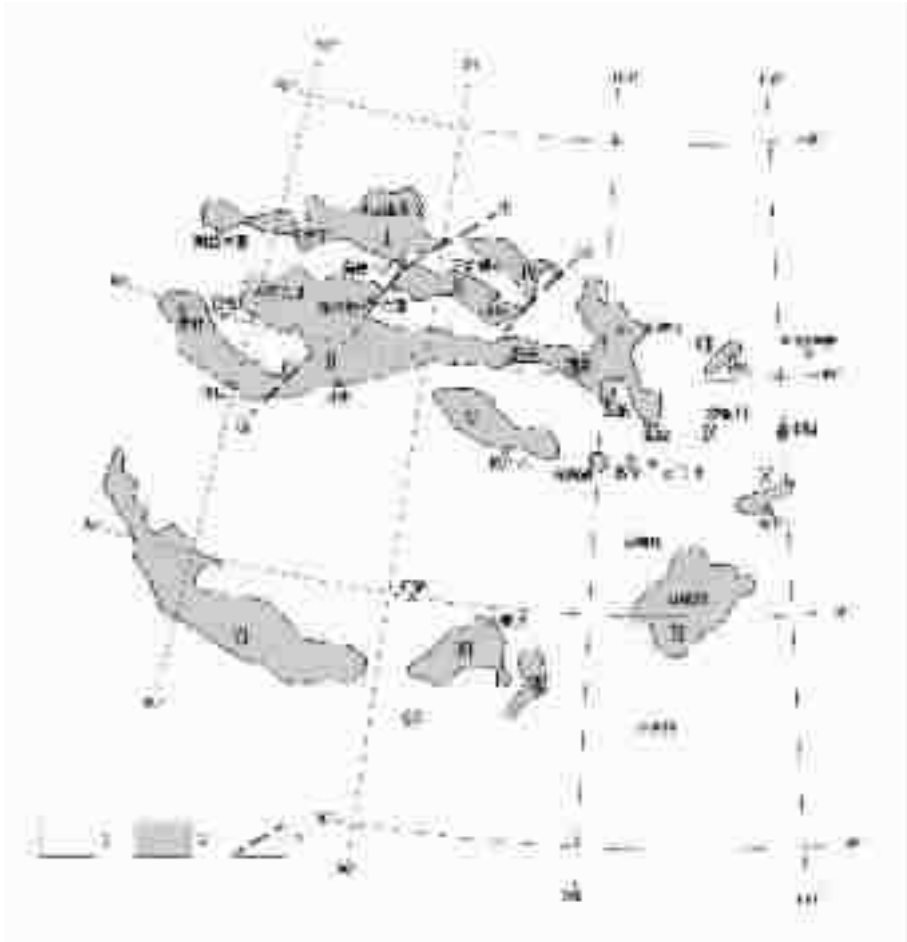


图3 2-360阶卫星重力异常 $-50 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 等值线圈定盆地范围

Fig.3 Basins Outlined by $-50 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ contours of 2-360 satellite gravity anomaly

1—重力异常值 $>-50 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$; 2—重力异常值 $<-50 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$; 3—推测断层: ①北塔山—乌鲁木齐—库勒断裂;

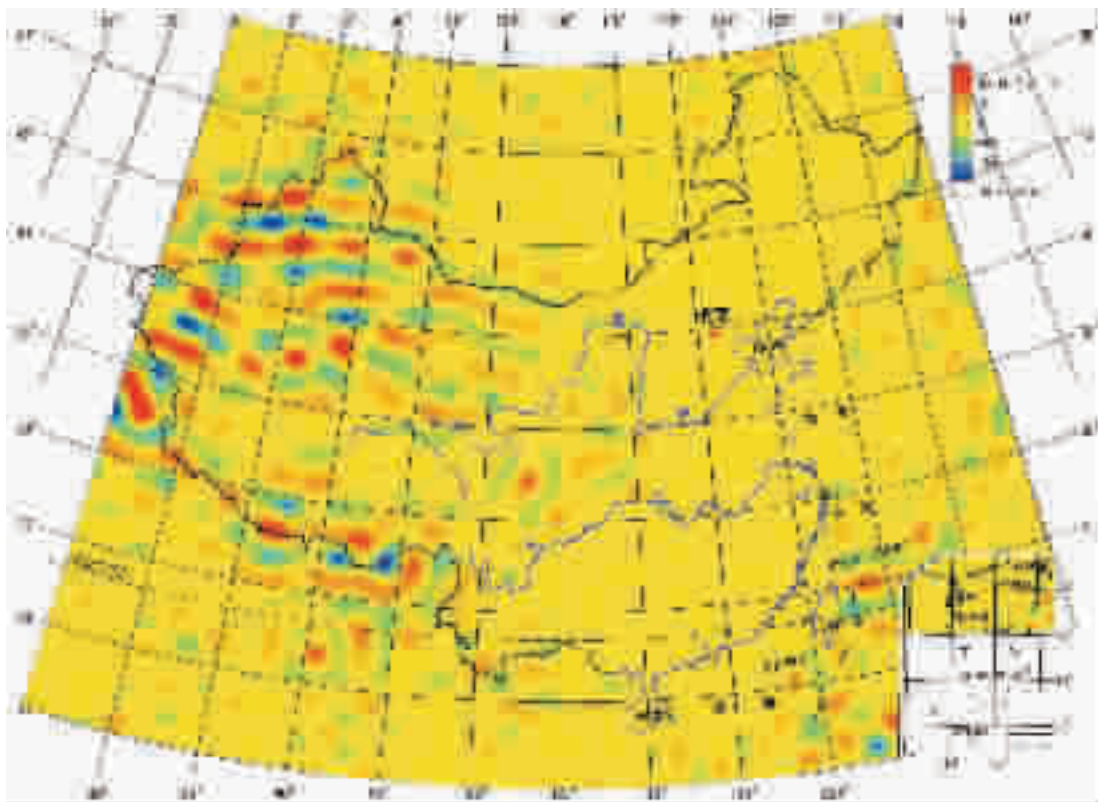
②下马崖—白山断裂; ③于田—克里雅河断裂; 4—盆地: I—准噶尔盆地; II—塔里木盆地; III—吐哈盆地; IV—三塘湖盆地;

V—柴达木盆地; VI—恒河盆地(印度); VII—墨脱盆地; VIII—临河盆地; IX—银川盆地; X—渭河盆地; XI—四川盆地

1-Gravity anomaly value $>-50 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$; 2-Gravity anomaly value $<-50 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$; 3-Interpreted faults: ①-Beitashan-Urumqi-Kolra fault;

②-Xiamaya-Baishan fault; ③-Yutian-Keriya River fault; 4-Basins: I -Junggar basin; II -Tarim basin; III - Tuha basin; IV -Santanghu basin;

V-Qaidam basin; VI - Ganges River basin(India); VII - Medog basin; VIII - Linhe basin; IX - Yinchuan basin; X - Weihe basin; XI-Sichuan basin

图 4 101-180 阶卫星重力异常图^[9]Fig.4 101-180 satellite gravity anomaly^[9]

塔中隆起异常(图 4-5),它的强度低且走向多变。

(3)天南重力低。从阿克苏经库尔勒、焉耆盆地到吐哈盆地。这条盆地带是目前油气前景最好的地域之一。

(4)天山重力高。天山山脉地理上划分为北天山(吐哈盆地以北)、西天山(伊犁盆地以北)和南天山(伊犁盆地以南—吐哈盆地与塔里木盆地之间)。天山重力高的西段与地表南天山的位置相符,东段与北天山的位置相符。但没有重力高与西天山吻合。

(5)淖毛湖—哈日熬日布格重力低。约从淖毛湖经经济纳旗到呼和浩特,沿中蒙边境分布。比 2-360 阶卫星重力异常图中的三塘湖略靠北,它们可能是深度略异的同一盆地带。

(6)天北重力低。西从伊宁盆地开始,经奎屯、准噶尔盆地内昌吉凹陷到哲金。

(7)北准噶尔重力高。这一重力高在准格尔盆地内大体上与准格尔盆地内陆梁隆起位置上相符,向西延伸到阿拉套山,到哈萨克斯坦的萨尔坎德;向东经二台至蒙古国的布尔干。

(8)额尔齐斯重力低带。在中国境内仅有布尔津到富蕴盆地一小段。

(9)阿尔泰重力高带。在中国境内,只有纳雷姆山到科布多一小段。

从卫星重力异常图中还可以识别出 5 个不连续带,它们

可能是区域性大断层或区域韧性剪切带。

(1)巴彦敖包—西宁不连续带;巴彦敖包—西宁不连续带在 2—360 阶和 2—180 阶卫星重力异常上均有明显显示。它是新疆盆山构造的东界。北起蒙古国的巴彦敖包,到中蒙边界处约为东经 105°E,与近年来颇受地学界重视,认为是划分中国东部与西部岩石圈分界线的南北地震带吻合。往南延伸到西宁。此不连续带往南可能延续到甘孜、察隅。该不连续带的两侧,异常特点不同。在此带以西,重力异常带的走向近似东西,如:淖毛湖—乌力吉重力低,北山重力高,河西走廊重力低等。所有这些重力异常带到巴音敖包—西宁不连续带嘎然而止。此带以东重力异常走向突然变为近南北。

(2)淖毛湖—茫崖不连续带;淖毛湖—茫崖不连续带与 2—360 阶卫星重力图上的下马崖—白山断裂相近,略偏东。如果它们是同一断层,那么可能断层面面向西倾斜。在 2—180 阶、101—180 阶和 50—100 阶卫星重力异常图上,这一连续带均有明显显示。它从蒙古国的阿尔泰经伊吾、哈密、到青海茫崖。不连续带两侧,构造明显不协调,天山重力高到这连续带消失,其东在它的延伸线上出现淖毛湖—乌力吉重力低。天南重力低到这里终止。

(3)于田—克里雅河不连续带;于田—克里雅河不连续带在 2—360 阶卫星重力异常图(图 1)上反映清晰。在 101—

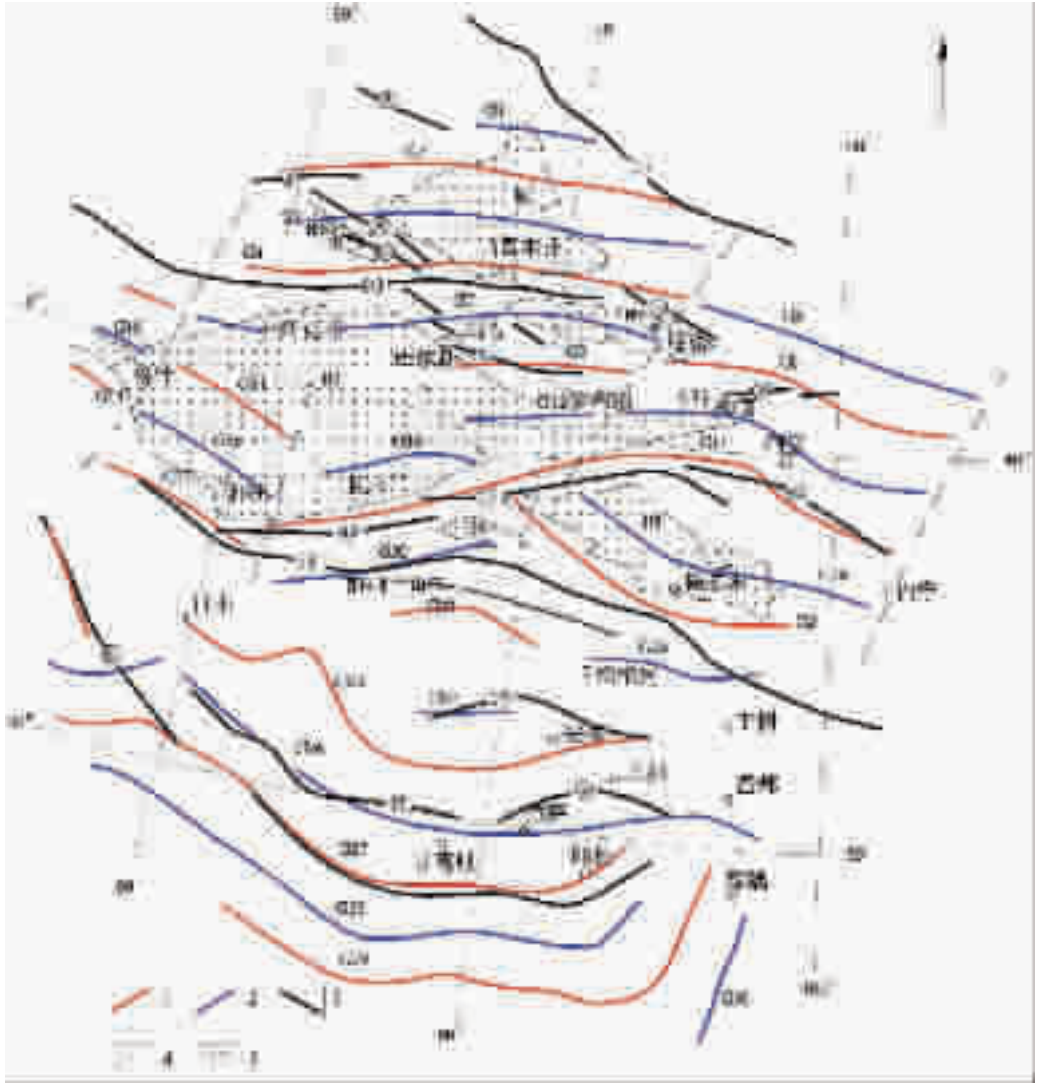


图5 盆地、山岭和 101—180 阶卫星重力异常

- 1—重力高异常轴;2—重力低异常轴; G1—额尔齐斯重力低;G2—准北重力高;G3—天北重力低;G4—天山重力高;G5—淖毛湖—乌力吉重力低;G6—纳伦重力高;G7—天南重力低;G8—北山重力高;G9—库鲁克塔格重力高;G10—喀什重力低;G11—巴楚重力高;G12—罗布泊重力低;G13—河西走廊重力低;G14—公格尔重力高;G15—和田重力低;G16—且末重力低;G17—西昆仑重力高;G18—阿尔金—祁连重力高;G19—柴达木重力低;G20—喀拉米兰山口重力低;G21—柴达木南重力高;G22—可可西里重力高;G23—日土—安多重力高;G24—唐古拉重力低;G25—沱沱河重力低;G26—冈底斯重力低;G27—喜马拉雅重力高;G28—恒河重力低(印度); G29—德干高原重力高(印度);
- 3—山岭:①—阿尔泰山;②—塔尔巴哈台山;③—阿拉套山;④—婆罗科努山;⑤—察布查尔山;⑥—天山;⑦—巴里坤山—哈尔库克山;⑧—库鲁克塔格山;⑨—北山;⑩—昆仑山;⑪—阿尔金山;⑫—祁连山;⑬—唐古拉山;⑭—喜马拉雅山;⑮—冈底斯山;⑯—念青唐古拉山;
- 4—推断断层;5—盆地;B1—准噶尔盆地;B2—塔里木盆地;B3—伊宁盆地;B4—吐哈盆地;B5—柴达木盆地;B6—库木库里盆地

Fig.5 101-180 satellite gravity anomaly, basins and mountains

- 1-Axis of gravity high;2-Axis of gravity low; G1-Ertix gravity low;G2-North Junggar gravity high;G3 -North Tianshan gravity low; G4-Tianshan gravity high;G5- Naomaohu -Wuliji gravity low;G6-Nalun gravity high;G7-South Tianshan gravity low;G8-Beishan gravity high; G9-Kuruktag gravity high;G10-Kashi gravity low; G11-Bachu gravity high;G12-Lop Nur gravity low;G13-Hexi Zoulang gravity low; G14 -Kongur gravity high;G15-Hotan gravity low;G16-Qiemo gravity low;G17 -West Kunlun gravity high;G18-Altun-Qilian gravity high; G19-Qaidam gravity low;G20-Karamiran Pass gravity low;G21 -South Qaidam gravity high;G22-Hoh xil gravity high;G23- Rutog-Ando gravity high;G24-Tanggula gravity low;G25-Tuotuohe gravity low;G26-Gandise gravity low;G27-Himalaya gravity high;G28-Ganges gravity low(India);G29- Deccan Plateau gravity high(India);3-Mountains:①-Altai;②-Tarbagatai;③-Alataw;④-Borohoro;⑤-Qapqa;⑥-Tianshan; ⑦-Barkol-Harlik;⑧-Kuruktag;⑨-Beishan;⑩-Kunlun;⑪-Altun;⑫-Qilian;⑬-Tanggula;⑭-Himalaya;⑮-Gangdisse;⑯-Nyainqentanglha Shan;4- Inferred faults;5-Basins:B1-Junngar basin;B2- Tarlim basin;B3-Yining basin;B4 -Tuha basin;B5- Qaidam basin;B6-Kumukuli basin

180阶卫星重力异常图(图 4)上不连续带靠低重力值识别出来。巴楚重力高、和田重力低、西昆仑重力高和它们的东部异常明显不协调,并且在连续处,重力异常走向突然由北西—南东走向转为北东—南西方向。

(4)阿拉木图—塔什库尔干不连续带;也是靠低重力值识别出来,在 2—360 阶重力异常图上有明显显示。穿过阿拉木图—塔什库尔干不连续带,纳伦重力高变成塔北—吐哈重力低,喀什重力低变成巴楚重力高。

3.2 青藏岩石圈 Bowin 下地壳结构

青藏高原北以西昆仑重力高、阿尔金—祁连重力高与塔里木盆地为界,南部以喜马拉雅重力高与恒河平原为界。重力高异常带成串珠状,它们的地理位置与西昆仑山、阿尔金山、祁连山、喜马拉雅山相吻合。在这些异常的靠高原腹地一侧,均有重力低异常。在阿尔金重力高南的是喀拉米兰山口重力低,在祁连重力高南的是柴达木重力低,在喜马拉雅重力高北的是冈底斯重力低。

根据 101—180 阶卫星重力异常可以将青藏高原分成 3 个单元:柴达木—青海湖地块、羌塘地块和拉萨地块。

柴达木—青海湖地块以柴达木盆地与青海湖盆地为核心,北被祁连山重力高所限,南被柴达木南重力高(地理上包括祁漫塔格山和布尔汉布达山)所限。

拉萨地块是一个线性的重力低异常。它西部的地理位置与冈底斯山相吻合,东部与念青唐古拉山相近。

羌塘地块是青藏腹地,它表现为一个地域广袤的弱重力场地区。弱重力局部异常包括:可可西里重力高,唐古拉重力低,日土—安多重力高和沱沱河重力低。

可可西里重力高约位于澜沧江断裂与金沙江断裂之间,可可西里南缘乌兰乌拉湖—玛尼处,地表发现有第四纪火山。它是这个弱异常区的中心。

青藏地区地表构造特征为一系列被相互平行规模巨大的断层所限的条形地块,断层走向略成东西,向东逐渐向东南收缩,成倒扫帚状。地表地质多认为这些断层是向北俯冲的缝合带,时间越往北越新。雅鲁藏布江断裂是古新纪缝合带;班公湖—怒江断裂是侏罗纪缝合带;澜沧江和金沙江断裂同为三叠纪缝合带。将地表地质所显示的扫帚状断层夹持地体的构造面貌与 Bowin 中下地壳重力异常相对比,在形态上是异多同少。在卫星重力异常图上,柴达木地块内的重力高与重力低与地表山链与盆地有很好的对应关系,它们的走向同为北西—南东。在中国西部甚为重要的昆仑山没有很好与之对应卫星重力异常。但在这无重力异常的界线两侧,地质地球物理特点迥异。昆仑山脉以南,地表地质所厘定的金沙江深断裂,澜沧江深断裂,班公湖—怒江深断裂,雅鲁藏布江深断裂,以及它们之间所夹持的地体的走向均由北西转为南东并强烈收缩。但在重力异常图上,在昆仑山脉以南,唐古拉山口—拉萨以东地区,卫星重力异常的走向由北西转向北东,继而呈弧形向南突出。在昆仑山以北,地表地质与卫星重力异常吻合,而

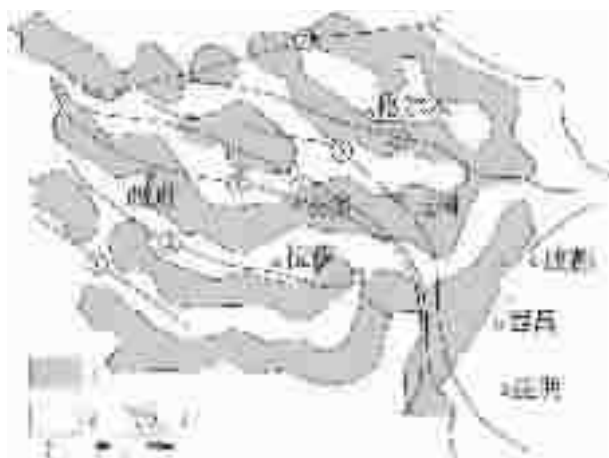


图 6 西藏地区 101—180 阶卫星重力正负异常与地表缝合带分布对照图

- 1—卫星重力正常区;2—卫星重力异常区;
3—断层:①—西瓦里克主边界断裂;②—雅鲁藏布江断裂;
③—班公湖—怒江断裂;④—澜沧江断裂;⑤—金沙江断裂;
⑥—阿尼玛卿—略阳断裂;⑦—阿尔金断裂

Fig.6 Distribution of positive and negative values of 101—180 satellite gravity and sutures in Tibet

- 1- Positive gravity anomaly; 2-Negative gravity anomaly;
3- faults:①- Siwalik main boundary fault;②-Yarlung Zangbo fault;
③- Bangongco-Nujiang fault;④- Lanchangjiang fault;
⑤- Jinshajiang fault;⑥ -A' nyemaqen-Lueyang fault;⑦-Altun fault

在昆仑山脉以南,地表地质与重力异常不再吻合,这意味着在昆仑山以南地区上地壳与中下地壳脱耦,上部地壳向东南逃逸,昆仑断裂是这种逃逸构造的北界。昆仑以南地区地表地质厘定的深断裂,连同昆仑断裂都不是深断裂,向下延伸不会超过壳内低速带(深度约 15km)。唐古拉—拉萨以东地区,地表构造与深部构造之间存在巨大差异。

4 中国岩石圈 Bowin 地幔结构

2—49 阶卫星重力异常(图 7)的 Bowin 深度为 6400~130 km,要比图集中其他阶次的卫星重力异常更多的反映地幔物质不均匀。在 2—49 阶卫星重力异常图上,新疆地区和青藏地区的重力异常有明显差异,说明新疆和青藏的 Bowin 地幔物质质量存在很大差异。新疆地区有一个显著的区域卫星重力低。异常范围包括整个新疆,并向东延伸到阿拉善地区。这个重力低异常有 3 个局部重力极小值,分别位于塔里木、吐鲁番与巴丹吉林沙漠。其中,数值最低范围最大的重力低是吐哈盆地与罗布泊间地区。吐哈盆地被海拔高度 1500~5400m 的天山山脉所环抱,形成于 60~180 Ma。其中的艾丁湖海拔高度为-154m,是大陆上最低的地方。显然,它们这种特殊的地理地质特征与 Bowin 地幔结构有关,可能是软流圈

强烈上升处。

在青藏高原之南,重力低异常成带状断续分布。异常带包括印度的恒河重力低、巴基斯坦和缅甸边界的那加山重力低、四川重力低和南华北重力低。

在 2-49 阶卫星重力异常图中,一个显著的重力高位于青藏高原西南部的重力高带,极大值达 $80 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 。按 $30 \times 10^{-5} \text{m/s}^2$ 等值线,其分布范围约从帕米尔到拉萨,推断是俯冲到西藏下方地幔中的印度板块所引起。俯冲带走向西北—南东,俯冲方向北东。

Bowin^[4]研究球谐项的空间分布特征时曾指出,核幔边界的质量异常,主要表现在 2-3 阶异常中;地幔异常和会聚板块的质量过剩,主要表现为 4-10 阶异常中。通常认为核幔边界不太可能有巨大的质量不均匀,因为如果有较大的质量不均匀,就会产生巨大的应力差。如有 2 km 的隆起,应力差可达 $1 \times 10^5 \text{kPa}$ 。地幔异常和会聚板块的质量过剩形成的异常形态常为狭长的重力高。所描绘的低阶异常特点完全适用于青藏高原西南低阶重力高。

将青藏地区 2-49 阶卫星重力异常与地表重要断层线画在一起作形式上的对比可见,地表地质在青藏高原所见到的扫把状构造格局在低阶卫星重力异常图上没有显示。

按低阶卫星重力异常青藏地区东西分块可分出:西部重

力正异常区(包括藏西南重力高和可可西里重力高)、藏东重力高及藏中重力低。如上所述,藏西南重力高推断是俯冲到地幔中的印度板块所引起。可可西里重力高处有第四纪火山活动,极可能是一个上地幔穹隆。西藏东部重力正异常分布在都兰、玉树、甘孜、义敦、盐边等地区,它的北部伸入松潘—甘孜地区,南部为三江褶皱带。在这东西两重力高带之间,有一条南北向的藏中重力负异常带。它的西界约从芒崖经沱沱河、比如到朗县;东界约经察隅、昌都到玉树。北部包括柴达木盆地的主要地域,它是青藏高原中的一个稳定地块。

藏中重力低带在 2-49 阶、2-180 阶和 2-360 阶卫星重力异常图上,均有明显显示,但受到地表构造产生异常叠加的影响,在高阶异常图上范围变小,退缩到南部。

藏中重力低带揭示在川西—藏东存在南北向的稳定地块,阻挡了印度板块向西藏俯冲的进程。

青藏地区 Bowin 地幔结构与地表构造的巨大反差进一步说明,地表显示的扫帚状、块状结构只发生在浅部地壳,没有向深部延伸。浅部地壳与其下地壳间发生拆离,拆离面可能是青藏高原普遍存在的深约 15 km 的低速低阻带。

5 中国西部岩石圈 Bowin 地幔盖层结构

50-100 阶 Bowin 深度为 130~65 km(图 9)。如将 50-100

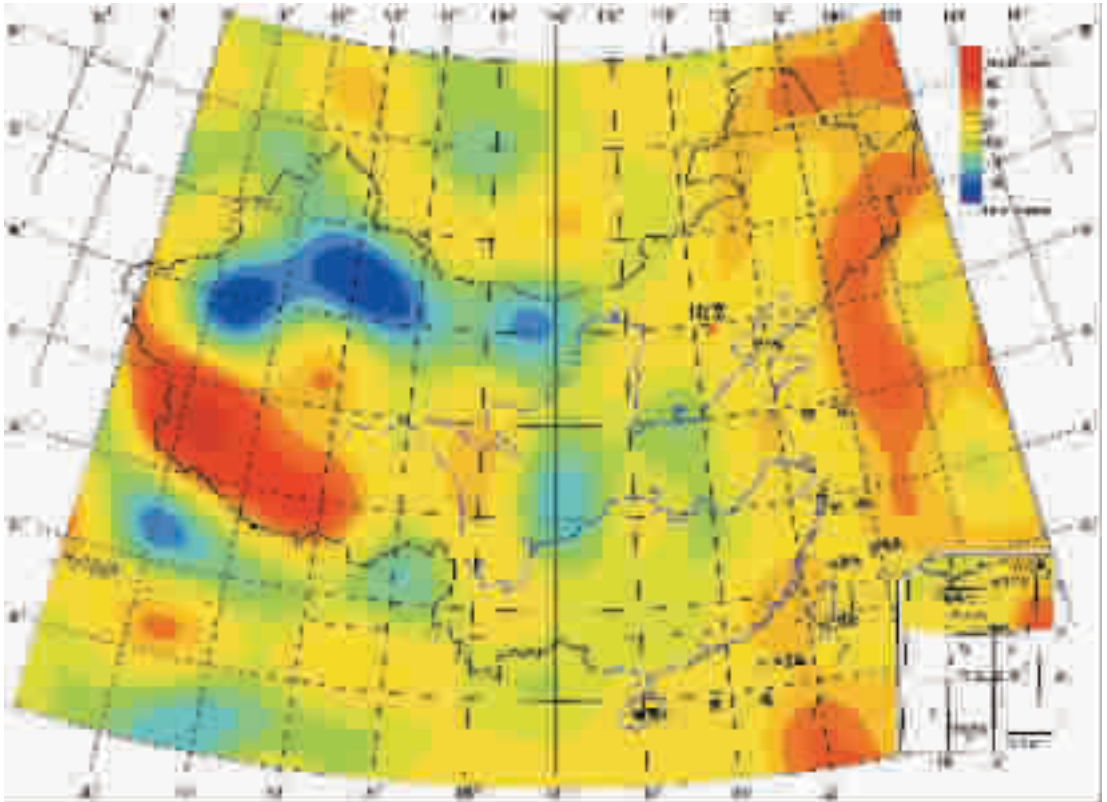


图 7 2-49 阶卫星重力异常图^[9]

Fig.7 2-49 satellite gravity anomaly^[9]

阶卫星重力异常按正负异常划分的重力高与重力低与地表地质所确定的盆地和山岭分布相比较(图 10),发现地表已知盆地大部分有重力低与之对应,而大部分山脉则与重力高相对应。

准噶尔盆地(G1)与准噶尔重力低在位置和范围上都极相似。塔里木盆地则由北西—南东走向的塔东北重力低(G3)、塔西南重力低(G2)和夹持在它们之间的巴楚重力高(巴楚隆起)等 3 个异常带组成,塔东北重力高和柴达木重力低依稀相连,连接处在罗布泊到阿克塞—芒崖,柴达木重力低一直向东南延伸到青海湖盆地。

吐哈盆地的大部分地区位于天山重力高中,东部一小部分进入到阿拉善重力低。伊宁盆地整个位于天山重力高内,没有引起明显的重力低异常。

从正地形来说,阿尔泰山、天山、巴楚隆起、昆仑山、阿尔金山、祁连山、喜马拉雅山都有重力高与之相对应。阿尔泰山的主脉在蒙古境内,约从列宁诺戈尔斯克,经阿勒泰到钱德曼,有一串珠状重力高和它的位置相符。组成串珠状异常带的局部异常分别位于列宁诺戈尔斯克、青河北、车车格与钱德曼等处。天山山脉对应一个强重力高,覆盖北天山、西天山和南天山。西昆仑、阿尔金山和祁连山都有强重力高,在阿克塞与芒崖间被塔东北—柴达木重力低所截断。

喜马拉雅重力高强度最大,异常向东南延伸到日喀则与拉萨之间,然后出现颇为特殊的围绕南迦巴瓦重力低的环状重力高异常。它是在陆陆碰撞过程中,环绕南迦巴瓦坚硬陆块发生的现象,也是岩石圈弱流变性质的一个证据。

令人深思的是在羌塘地块中的局部异常,都有 101-180 阶重力异常与之吻合,但极性正好相反。可可西里重力高变为重力低异常,唐古拉重力低变成重力高异常,日土—安多重力高异常变为重力低异常,沱沱河重力低异常变为重力高异常。拉萨地块也是一样,它在 50-100 阶卫星重力异常上为重力高,但在 101-180 阶卫星重力异常图上则为重力低。

对这些“上高下低、上低下高”的重力异常的反常现象初步解释是:羌塘地块和拉萨地块以外,包括新疆地区和青藏高原的四周,莫霍界面的深度均小于 65 km,50-100 阶和 101-180 阶卫星重力异常均反映下部地壳和岩石圈地幔的物质不均匀。但在羌塘地块和拉萨地块,莫霍界面的深度超过 65 km,101-180 阶卫星重力异常的深度段是在地壳内,但 50-100 阶卫星重力异常的深度段则包括下部地壳与岩石圈地幔,包含山根所在深度范围。山根的形态与地表地形正好相反,地表为山岭时,山根为凹陷,地表为盆地时,山根为隆起。因而,当 101-180 阶为重力高时,50-100 阶便变成重力低。当 101-180 阶为重力低时,50-100 阶便变成重力高。50-100 阶卫星重力图上的阿拉善重力低与青藏重力低等两个重力低,它们代表深部的两个凹陷。阿拉善重力低从巴丹吉林沙漠一直延伸到哲金到蒙古境内。青藏重力低包括藏南重力低与藏中重力低。藏南重力低从日土经措勤到昌都。藏中重

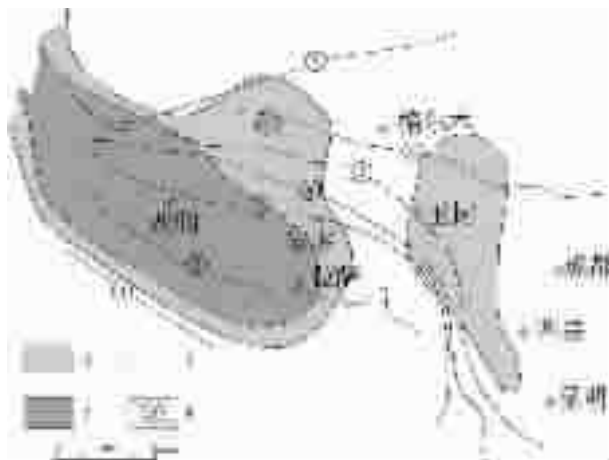


图 8 青藏地区 2-49 阶卫星重力异常与地表重要构造线的对比

- 1—卫星重力异常 $>30\times 10^{-5}\text{m/s}^2$;2—卫星重力异常 $>0<30\times 10^{-5}\text{m/s}^2$;3—卫星重力负异常区;4—断层:①—西瓦里克断层;②—雅鲁藏布江断层;③—班公湖—怒江断层;④—澜沧江断层;⑤—金沙江断层;⑥—阿尼玛卿—略阳断层;⑦—阿尔金断层

Fig.8 2-49 satellite gravity anomaly in the Qinghai-Tibet region area and its correlation with structures on the surface

- 1-Gravity anomaly $>30\times 10^{-5}\text{m/s}^2$;2-Gravity anomaly $>0<30\times 10^{-5}\text{m/s}^2$;3-Negative gravity anomal;4-Faults:①-Siwalik main boundary fault;②-arlung Zangbo fault;③-Bangongco-Nujiang fault;④-Lanchangjiang fault;⑤-Jinsha jiang fault;⑥-A'nyemaqen-Lueyang fault;⑦-Altun fault

力低成为一个分支从改则到若拉岗。在藏南重力低与藏中重力低之间,有唐古拉山的插入。因此,整个青藏便形成一山(昆仑山)两盆(柴达木重力低与青藏重力低)的格局。

从深度异常带还可以看到,中国 50-100 阶卫星重力异常带走向的主导方向是北西—南东,只有华南和上扬子地区的走向近于南北。

6 对寻找油气资源的启示

从卫星重力对西部岩石圈三维结构的研究中,得到对西部寻找油气资源的几点启示:

1)在西部寻找油气资源不要只局限于新生代盆地。通常寻找油气资源都局限在地表出露的新生代盆地。中国西部的油气资源丰富,新疆石油资源约占中国陆上石油资源量的 1/4,天然气资源量约占全国陆上天然气资源量的 28%,探明储量主要也是在准噶尔、塔里木、吐哈等三大新生代盆地。但中国盆地大都经历了多期构造运动,不同构造期的盆地又叠加在一起。根据肖序常等研究结果,新疆可分成位于准噶尔盆地东北外侧的西伯利亚板块,包括准噶尔盆地、吐哈盆地在内的哈萨克斯坦—准噶尔板块和包括塔里木盆地及其东西延伸的塔里木板块等 3 个板块。晚寒武世—早奥陶世,西

伯利亚板块和哈萨克斯坦—准噶尔板块之间的古亚洲洋北支斋桑—额尔齐斯洋盆关闭,两板块沿额尔齐斯缝合带拼合。早二叠世末,位于哈萨克斯坦—准噶尔板块与塔里木板块之间的古亚洲洋南支沿中天山南缘断裂关闭,新疆地区拼合成一个完整的大陆。

印支运动期使中国西部大面积大幅度上隆,新疆地区受挤压隆升,到早中侏罗世一度夷平。燕山运动是一个强烈的造山运动期,它使新疆地区的基底和盖层一起褶皱,形成盆山构造。101—180 阶卫星重力异常所反映的盆山构造主要是印支—燕山期形成的褶皱构造。它不但在中国西部,也在东部造成强烈褶皱的盆地和山岭。它们不受准噶尔、塔里木、吐哈和伊犁等盆地的地表地貌限制,超越地表盆地界限形成连续的东西向平行线状构造。这种构造格局覆盖整个新疆。在东部延伸到阿拉善,直至鄂尔多斯北。

虽然当今出露地表的准噶尔盆地、塔里木盆地和吐哈盆地都形成于新生代,但新疆地区的含油层不只是限于新生代,古生代、中生代和新生代地层中均有含油层,近年来新发现的库车凹陷油田便是一个以寒武系—奥陶系为工业性油气源,海相成因的盆地^[7]。因而,研究揭示不同时期盆地的形态就显得格外重要。

不同时期的构造在地表或隐或现都会有显示。它们在深

部地壳内更完整地保留了它们的遗迹。卫星异常发现中国西部地壳内存在规则的平行盆山构造。这些壳内盆山构造不成块状,而成狭长带状,与地表盆地分布面貌毫无相同之处。它们横过整个新疆,地域广大。这对扩大油气远景,确定普查范围意义重大。

2) 在西部研究盆地的构造背景要考虑深部构造的控制。当今新疆地区三山(阿尔泰山、天山和阿尔金山)四盆(准噶尔盆地、塔里木盆地、吐哈盆地和伊宁盆地)的构造格局是新近纪—第四纪喜马拉雅期构造运动改造的结果。印度板块自西南而东北的强烈推挤,强烈地改变了新疆地区的地表构造格局。它使婆罗科努山—依连哈比尔尕山横向隆升,向东南穿过库车勒与吐鲁番之间后与库鲁克塔格相连。伊宁盆地、准噶尔盆地和塔里木盆地下降。

在 101—180 阶重力图上,婆罗科努山—依连哈比尔尕山异常不很明显,甚至没有反映,说明它们都是很浅的表层构造。

印度板块的北东向俯冲挤压还在新疆地区形成一个强大的力耦,致使阿尔金大距离走滑,并形成了新疆地区一系列北西—南东走向褶皱和北东—南西走向断层(或韧性走滑带)。在地表出露的婆罗科努山、依连哈比尔尕山、巴里坤山、哈尔库克山等山系均为北西—南东向山系,在准噶尔盆地内的乌伦古凹陷、陆梁隆起、漠区凹陷、准中隆起等盆地内构造

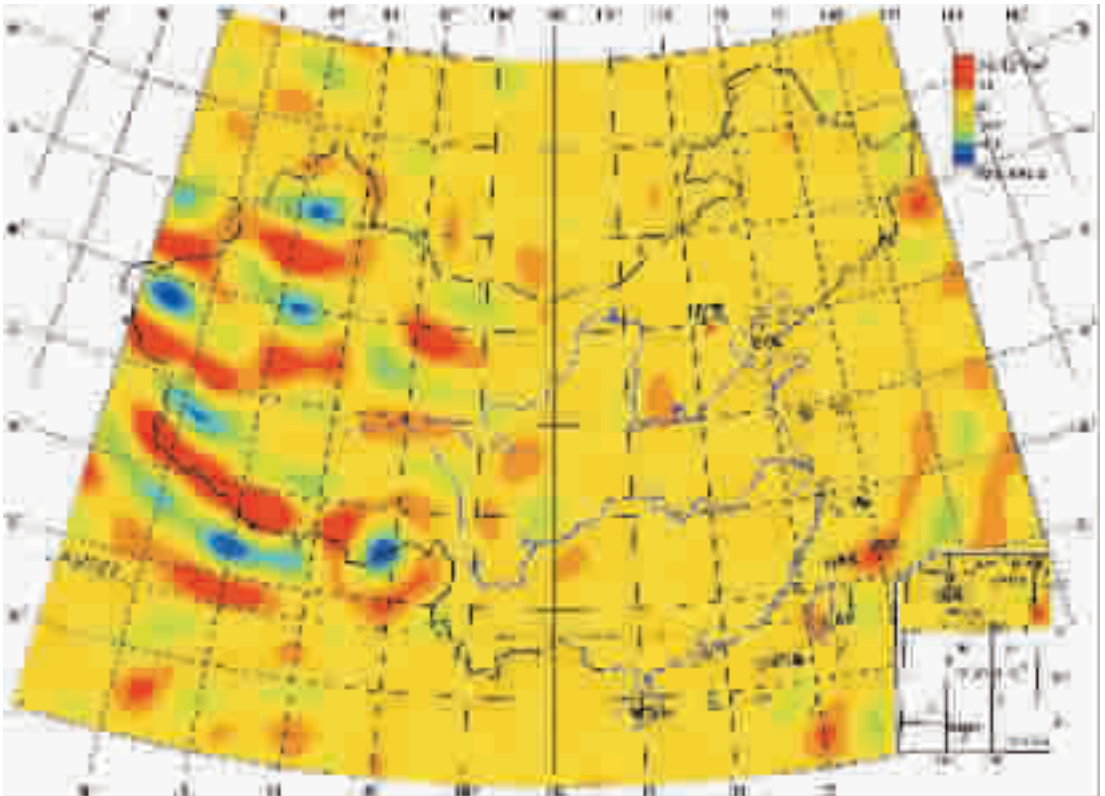


图 9 50—100 阶卫星重力异常图^[8]

Fig.9 50—100 satellite gravity anomaly^[8]

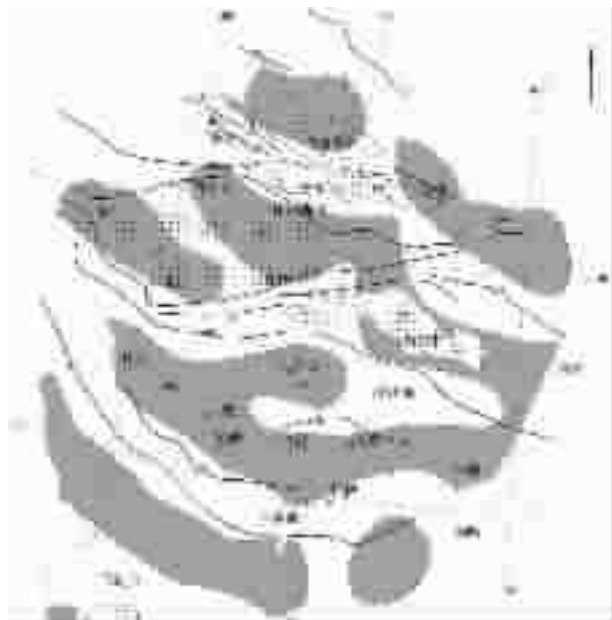


图 10 50-100 阶卫星重力异常正负异常分布图

1—卫星重力正异常区;2—卫星重力负异常区;
3—山岭(编号与图 5 同);4—盆地

Fig.10 Positive and negative values of
50-100 satellite gravity anomaly

1-Positive gravity anomaly;2-Negative gravity anomaly;
3-Mountains;4-Basins

都呈北西走向。塔里木盆地内的满加尔凹陷、巴楚隆起、喀什—和田凹陷等盆地内构造也都呈北西向走向。这种 X 形构造格局控制新疆地区当今构造面貌格局。

3)分析壳内盆山构造对地表出露盆地的构造背景控制。

①根据天北重力低划分的天北盆地带是从伊宁盆地,经奎屯、准噶尔盆地内昌吉凹陷,到哲金的一个狭长的地带。通常认为伊宁盆地和准噶尔盆地是两个独立的盆地,但它们却在深部相连。克拉玛依位于此带北部,如今已是亿吨级油田。

②根据天南重力低划分的天南盆地带是从阿克苏,经库车盆地、焉耆盆地,到吐哈盆地。这个盆地带跨过塔里木和吐哈等两个盆地。塔里木是中国最大的内陆盆地。天南盆地带中所包括的塔里木盆地中的库车凹陷,通常认为是塔里木盆地的边缘凹陷。吐哈盆地被认为是被天山围绕的山间盆地。两个盆地分别隶属于不同的构造区域。但从深部构造来说,库车盆地、吐哈盆地和焉耆盆地同属一个盆地带。因而,在吐哈盆地、焉耆盆地、应该同样存在与库车盆地类似的深部储藏。如果这种推测被证实,天南盆地带的前途无可估量。

③根据塔南重力低划分的塔南盆地带是从和田经且末、罗布泊,到河西走廊。重力低带由 4 个重力低组成。这个盆地带的划分可能没有什么分歧,但深部构造显示,它是一条完整的极长的山前凹陷,有很大的找油气远景。

④淖毛湖—哈日熬日布格重力低。约从淖毛湖,经额济

纳旗到呼和浩特,沿中蒙边境分布,规模不亚于吐哈盆地,值得进一步工作。

4)基础研究对寻找油气资源十分重要。虽然绝大多数石油工作者都重视基础工作,但还有人认为,基础研究对找油直接作用不大,远水救不了近渴。但往往通过基础研究能揭示本质问题,对中国西部这样复杂的地区尤其如此。笔者是利用卫星重力资料在这方面做一个尝试。

卫星资料所得到的是概略的,加之地球物理解释的多解性,深部构造难于验证,因而笔者的工作只是提出问题,离解决问题还有很长一段路程。

参考文献(References):

- [1] 黄汲清,陈炳蔚. 中国及邻区特提斯海的演化[M].北京:地质出版社,1987.109.
Huang Jiqing, Chen Bingwei. The Evolution of the Tethys in China and Adjacent Regions [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1987.109(in Chinese).
- [2] 左愚,刘立言,李跃秋. 均衡重力异常图[A].见:袁学诚主编. 中国地球物理图集[C]. 北京:地质出版社,1996.30~31.
Zuo Yu, Liu Liyan, Li Yueqiu. Isostatic gravity anomaly[A]. In: Yuan Xuecheng (ed.).The Atlas of Geophysics in China[C].Beijing: Geological Publishing House,1996.30~31(in Chinese).
- [3] 宁津生,李建成,陈建国,等. 2-49 阶卫星重力异常图[A]. 见:袁学诚主编. 中国地球物理图集[C].北京:地质出版社,1996.33~34.
Ning Jinsheng, Li Jiancheng, Chen Jianguo, et al. 2-49 satellite gravity anomaly [A]. In:Yuan Xuecheng (ed.). The Atlas of Geophysics in China [C].Beijing: Geological Publishing House,1996.33 ~34 (in Chinese).
- [4] Bowin C. Depth of principal mass anomalies contributing to the Earth's geoidal undulations and gravity anomalies[J].Marine Geodesy, 1983, 7(1): 61~101.
- [5] 袁学诚. 中国地球物理图集[C]. 北京:地质出版社,1996.
Yuan Xuecheng . Atlas of Geophysics of China [C]. Beijing: Geological Publishing House,1996 (in Chinese).
- [6] 宁津生,李建成,陈建国,等. 2-180 阶卫星重力异常图[A]. 见:袁学诚主编. 中国地球物理图集[C]. 北京:地质出版社,1996.46~47.
Ning Jinsheng, Li Jiancheng, Chen Jianguo, et al. 2-180 satellite gravity anomaly[A].In:Yuan Xuecheng(ed.).The Atlas of Geophysics in China[C].Beijing: Geological Publishing House,1996. 46~47(in Chinese).
- [7] 宁津生,李建成,陈建国,等.2-360 阶卫星重力异常图[A]. 见:袁学诚主编. 中国地球物理图集[C]. 北京:地质出版社,1996.50~51.
Ning Jinsheng, Li Jiancheng, Chen Jianguo, et al. 2-360 satellite gravity anomaly[A].In:Yuan Xuecheng(ed.).The Atlas of Geophysics in China [C].Beijing: Geological Publishing House,1996.50~51(in Chinese).
- [8] 宁津生,李建成,陈建国,等.50-100 阶卫星重力异常图[A]. 见:袁学诚主编. 中国地球物理图集[C].北京:地质出版社,1996.38~39.
Ning Jinsheng, Li Jiancheng, Chen Jianguo, et al. 50-100 satellite

- gravity anomaly[A].In: Yuan Xuecheng(ed.).The Atlas of Geophysics in China [C].Beijing: Geological Publishing House, 1996.38~39 (in Chinese).
- [9] 宁津生, 李建成, 陈建国, 等. 101-180 阶卫星重力异常图[A]. 见: 袁学诚主编. 中国地球物理图集[C].北京: 地质出版社, 1996. 42~43.
- Ning Jinsheng, Li Jiancheng, Chen Jianguo, et al. 101-180 satellite gravity anomaly[A].In: Yuan Xuecheng(ed.).The Atlas of Geophysics in China [C].Beijing: Geological Publishing House, 1996.42~43 (in Chinese).
- [10] 何发歧, 俞仁连, 云露. 老盆地新油藏[A].见: 周玉琦主编. 朱夏油气地质理论应用研讨文集[C]. 北京: 地质出版社, 2001.33~38.
- He Faqi, Yu Renlian, Yun Lu. Old basins, New oil field[A].In: Zhou Yuqi(ed.). Symposium on Applications of Zhuxia's Petroleum Geology Theories[C]. Beijing: Geological Publishing House, 2001. 33~38 (in Chinese).

3D lithospheric structure of western China and its enlightenment on petroleum prospecting

YUAN Xue-cheng

(*Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing, 100037, China*)

Abstract: The 3D lithospheric structure of western China studied by using satellite gravity anomalies revealed that in the crust of western China there exist regular, distinct, parallel, linear basin-range structures. From north to south, there are: the Ertix basin belt, North Junggar uplift belt, North Tianshan basin belt, Tianshan uplift belt, Naomaohu -Olji basin belt, South Tianshan basin belt, Kuruktag-Beishan uplift belt, Altyn Tagh(Altun)-North Qilian belt (or South Tarim basin belt) and West Kunlun-Altyn Tagh-Qilian uplift belt, as well as the Qaidam basin belt and southern Tibet basin belt. These crustal basin belts formed by strong basal compression folding in the Indosinian-Yanshanian period. In the Himalayan period, northeast-directed subduction of the Indian plate resulted in uplift of the Borohoro-Qapqal -Ala Gou-Erben-Horo mountains, and they together with the Tianshan Mountains divide Xinjiang into the Tarim basin, Junggar basin, Tuha basin and Yining basin, forming the present-day geomorphology of Xinjiang. These NW-SE mountains and other NW-SE neotectonics have their corresponding satellite gravity anomalies in the lid of the lithosphere. Thus it is inferred that the dynamic force of the neotectonic movement was derived from the lithospheric mantle. In Tibet, the idea that the Tibetan Plateau is regarded as the superficial structure formed by a number of parallel faults such as the Yalung Zangbo fault, Bangong Co-Nujiang fault, Lanchang River fault and Jinsha River fault and the elongated blocks sandwiched therein does not conform to the crustal structure at ~15 to 18 km depth. This kind of elongated block structure and the southeast-directed escape structure only occur in the upper crust. Study also indicates that subduction of the Indian plate to the mantle only occurs in southwestern Tibet. In western Sichuan-eastern Tibet there exists a stable block which interrupts subduction of Indian plate beneath Tibet. The study provides the following enlightenment on petroleum prospecting: (1) petroleum prospecting in western China should not be restricted in Cenozoic basins; (2) in the study of the tectonic setting of basins in western China one should consider the structural control at depths; and (3) basic research may play an important role in petroleum prospecting and furnish clues leading to finding Paleozoic and Mesozoic oil/gas fields, and the research results may be used for reference in work arrangement, and especially we should carry out a systematic investigation and study of the whole deep aspects of the North Tianshan basin belt, South Tianshan basin belt, South Tarim basin belt, Qaidam basin belt and North Tibet basin belt and their control on the surface structures.

Key words: satellite gravity; deep structure; basin-range structure in western China; petroleum; Qinghai-Tibet Plateau

About the author: YUAN Xue-cheng, male, born in 1928, geophysicist majoring in the Earth's interior; E-mail: xcyuan@263.ner.cn.