应用重力学第十一讲

地质解释与应用

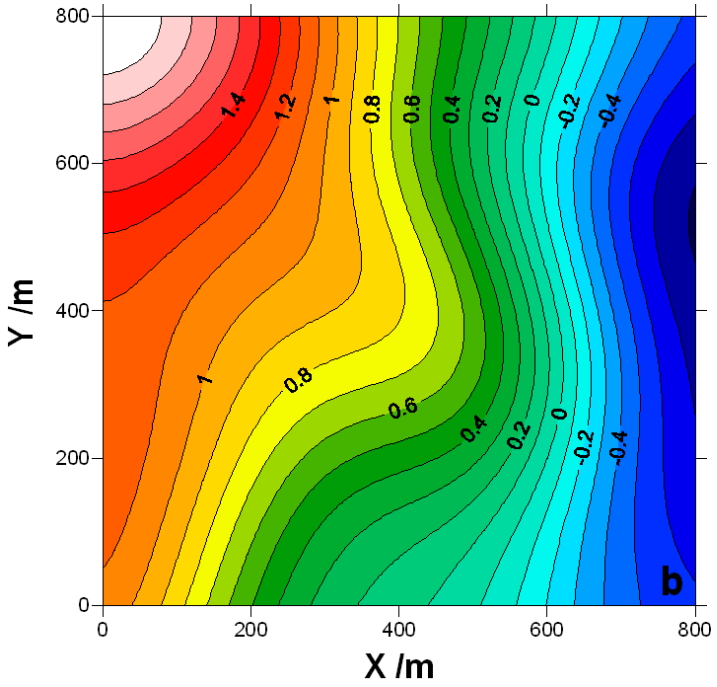
地质解释就是利用实测异常或经过适当数据处理的重力异常，结合工区地质资料对引起这些异常的原因作出地质上的结论或推断，这是重力勘探工作成果解释的最终目的。

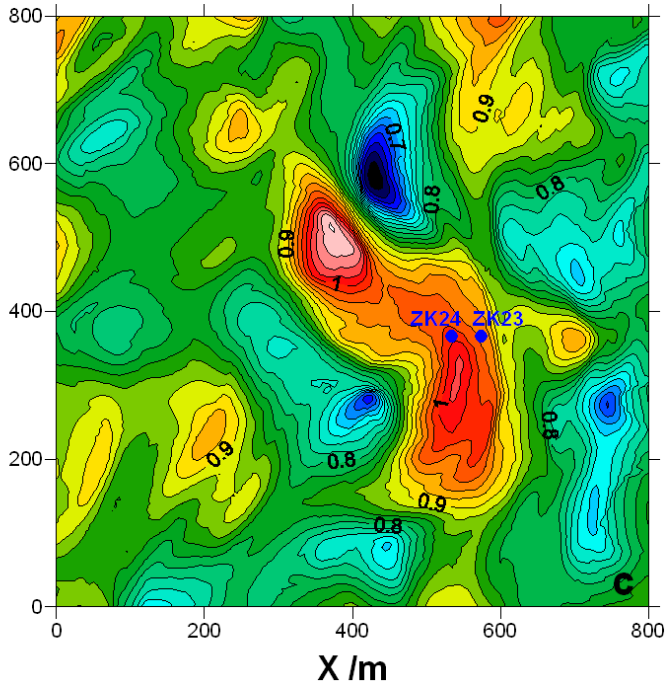
进行地质解释时应注意的问题

- 重力资料是否由研究的地质因素引起的？满足精度要求及必须的详细程度吗？
- 重力异常已分离为研究对象引起的异常？
- 解释从“读图”或异常识别开始，从区域到局部。
- 从已知到未知。
- 根据具体地质任务和条件选用相应的方法，选取效果最佳的解释方案。
- 增加已知条件或约束条件，限制反演多解性；综合其他物探方法。
- 有条件时，作验证。

一、重力异常的识别

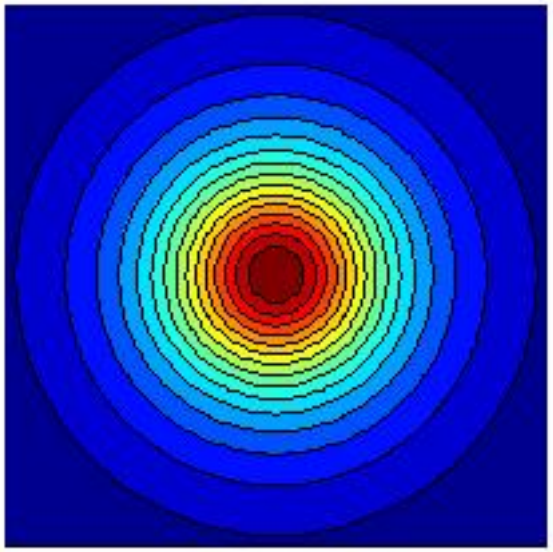
- 区域异常：走向及变化，异常变化幅度，区域性重力梯级带方向、延伸长度、平均水平梯度和最大水平梯度值等。
- 局部异常：弯曲和圈闭情况，对圈闭状异常应描述其基本形状，如等轴状、长轴状或狭长带状。是重力高还是重力低。重力高、低的分布特点，异常的走向及其变化，幅值大小及其变化等。





等轴状重力高

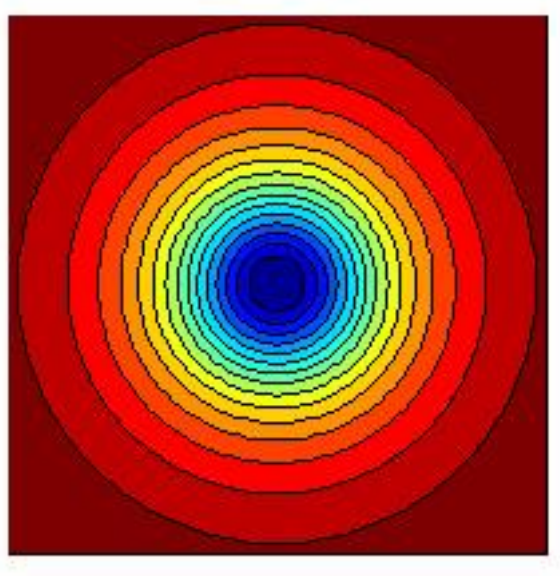
- 基本特征：异常等值线圈闭成圆形或接近圆形，异常值中心部分高，四周低，有极大值点。
- 对应的规则几何形体：剩余密度为正值的均匀球体，铅直圆柱体，水平截面接近正多边形的铅直棱柱体。



- 可能反映的地质因素：
- 囊状、巢状、透镜体状的致密金属矿体，如铬铁矿、铁矿，铜矿等；
- 中基性岩浆(密度较高)的侵入体，形成岩株状，穿插在较低密度的岩体或地层中；
- 高密度岩层形成的穹窿、短轴背斜等；
- 松散沉积物下面的基岩(密度较高)局部隆起；
- 低密度岩层形成的向斜或凹陷内充填了高密度的岩层，如砾石层等。

等轴状重力低

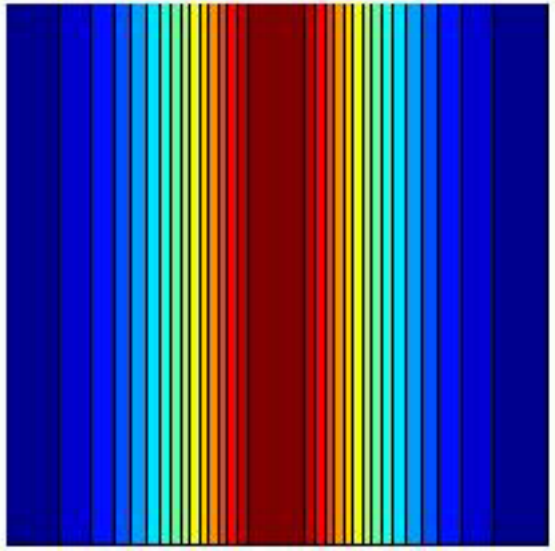
- 基本特征：异常等值线圈闭成圆形或近于圆形，异常值中心低，四周高，有极小值点。
- 相对应的规则几何形体：剩余密度为负的均匀球体，铅直圆柱体，水平截面接近正多边形的铅直棱柱体等。



- 可能反映的地质因素:
- 盐丘构造或盐盆地中盐层加厚的地段;
- 酸性岩浆(密度较低)侵入体，侵入在密度较高的地层中;
- 高密度岩层形成的短轴向斜;
- 古老岩系地层中存在巨大的溶洞;
- 新生界松散沉积物的局部加厚地段。

条带状重力高(重力高带)

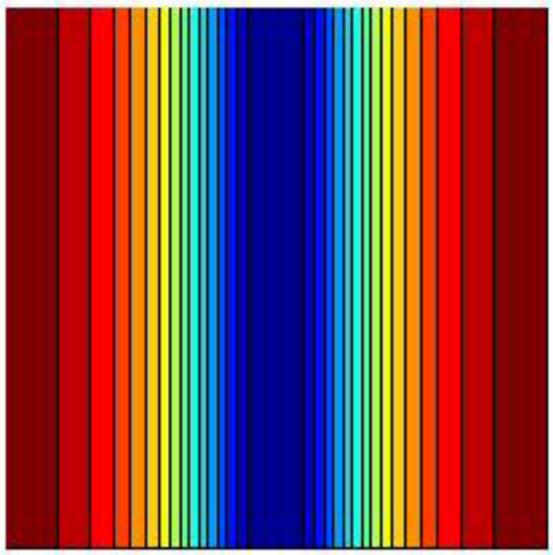
- 基本特征：异常等值线延伸很大或闭合成条带状，等值线的值中心高，两侧低，存在极大值线。
- 相对应的规则几何形体：剩余密度为正的水平圆柱体、棱柱体和脉状体等。



- 可能反映的地质因素：
- 高密度岩性带或金属矿带；
- 中基性侵入岩形成的岩墙或岩脉穿插在较低密度的岩石或地层中；
- 高密度岩层形成的长轴背斜、长垣、地下的古潜山带、地垒等；
- 地下的古河道为高密度的砾石层所充填等。

条带状重力低(重力低带)

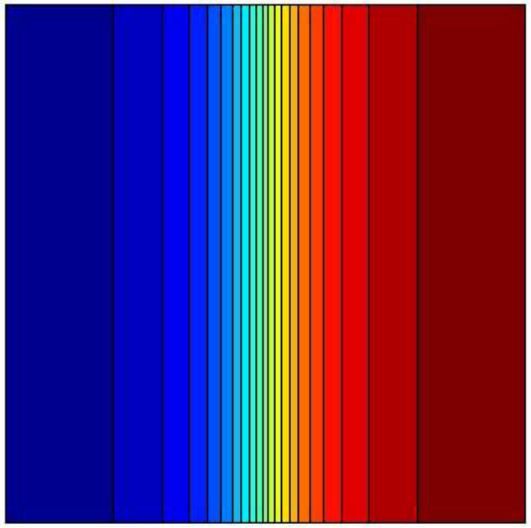
- 基本特征：异常等值线延伸很大，或闭合成条带状，等值线的值中心低，两侧高，存在极小值线。
- 相对应的规则几何形体：剩余密度为负的水平圆柱体，棱柱体和脉状体等。



- 可能反映的地质因素:
- 低密度的岩性带，或非金属矿带;
- 酸性侵入体形成的岩墙或岩脉穿插在较高密度的岩石或地层中;
- 高密度岩层形成的长轴向斜、地堑等;
- 充填新生界松散沉积物的地下河床。

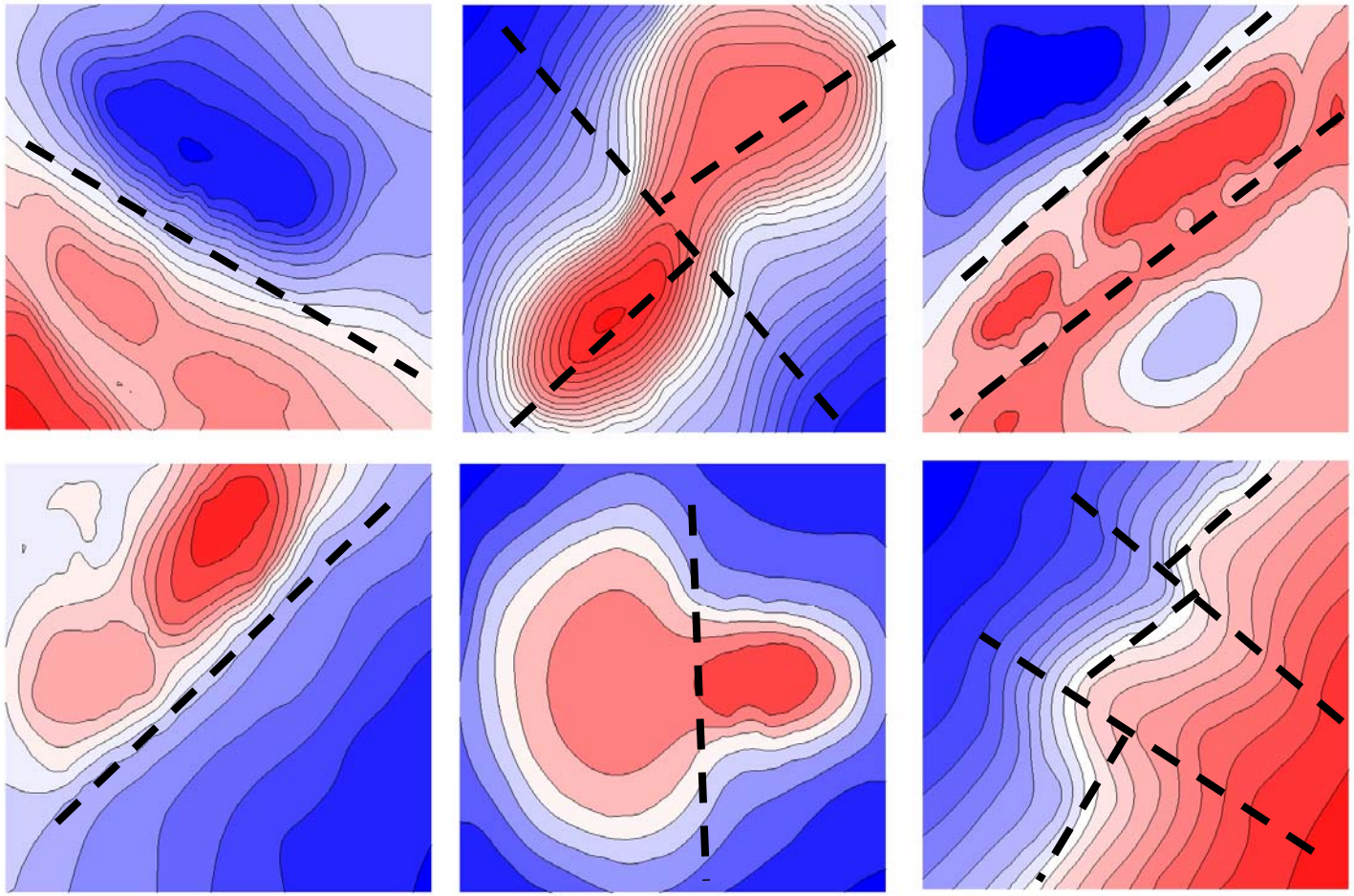
重力梯级带

- 基本特征：异常等值线分布密集，异常值向某个方向单调上升或下降。
- 相对应的规则几何形体：垂直或倾斜台阶。
- 可能反映的地质因素：垂直或倾斜断层、断裂带、破碎带；具有不同密度的岩体的陡直接触带；地层的拗曲。



断裂构造识别的标志

线性重力高低过渡带；轴线明显错动部位；串珠状异常两侧或轴部所在位置；



两侧特征明显不同分界线；封闭异常突然变宽、变窄部位；同形扭曲部位。

断裂构造识别的标志

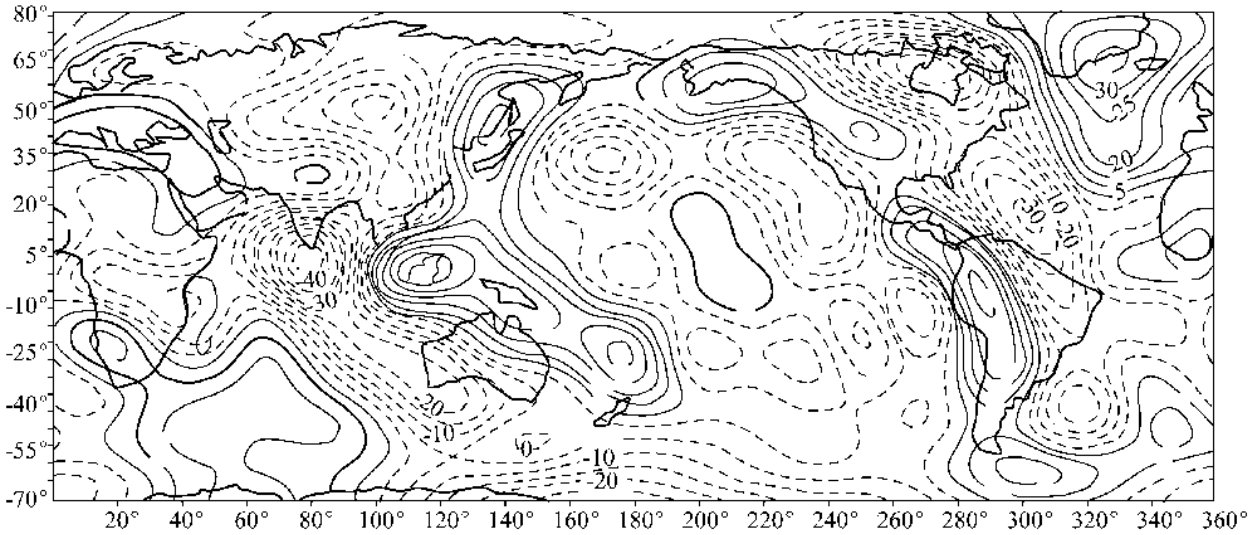
- 线性重力高与重力低之间的过渡带
- 异常轴线明显错动的部位
- 串珠状异常的两侧或轴部所在位置
- 两侧异常特征明显不同的分界线
- 封闭异常等值线突然变宽、变窄的部位
- 等值线同形扭曲部位

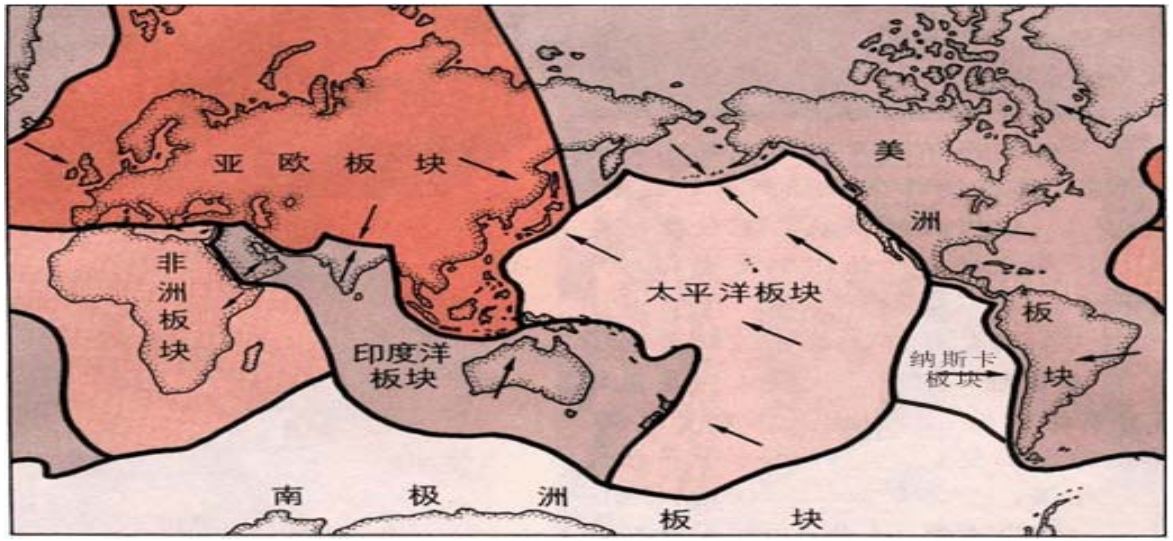
二、重力异常解释应用

(一)卫星重力异常在地球深部构造中的应用

- 1985年，曾维鲁利用GEM10B地球重力模型计算出三幅全球自由空气重力异常图，即2-12阶低阶图，13-36阶高阶图与2-36阶全阶图。
- 大于30的高阶异常源可能主要存在于岩石圈内;
- 小于10的低阶异常源可能应存在于下地幔和地核之间;
- 2-12阶自由空气重力异常图保留了全阶场中最基本的特征;
- 控制全球重力场的最主要异常源应该存在于软流圈以下。

2-12阶自由空气重力异常图(据曾维鲁，1985)





Xavier Le Pichon(1968)的七板块模式

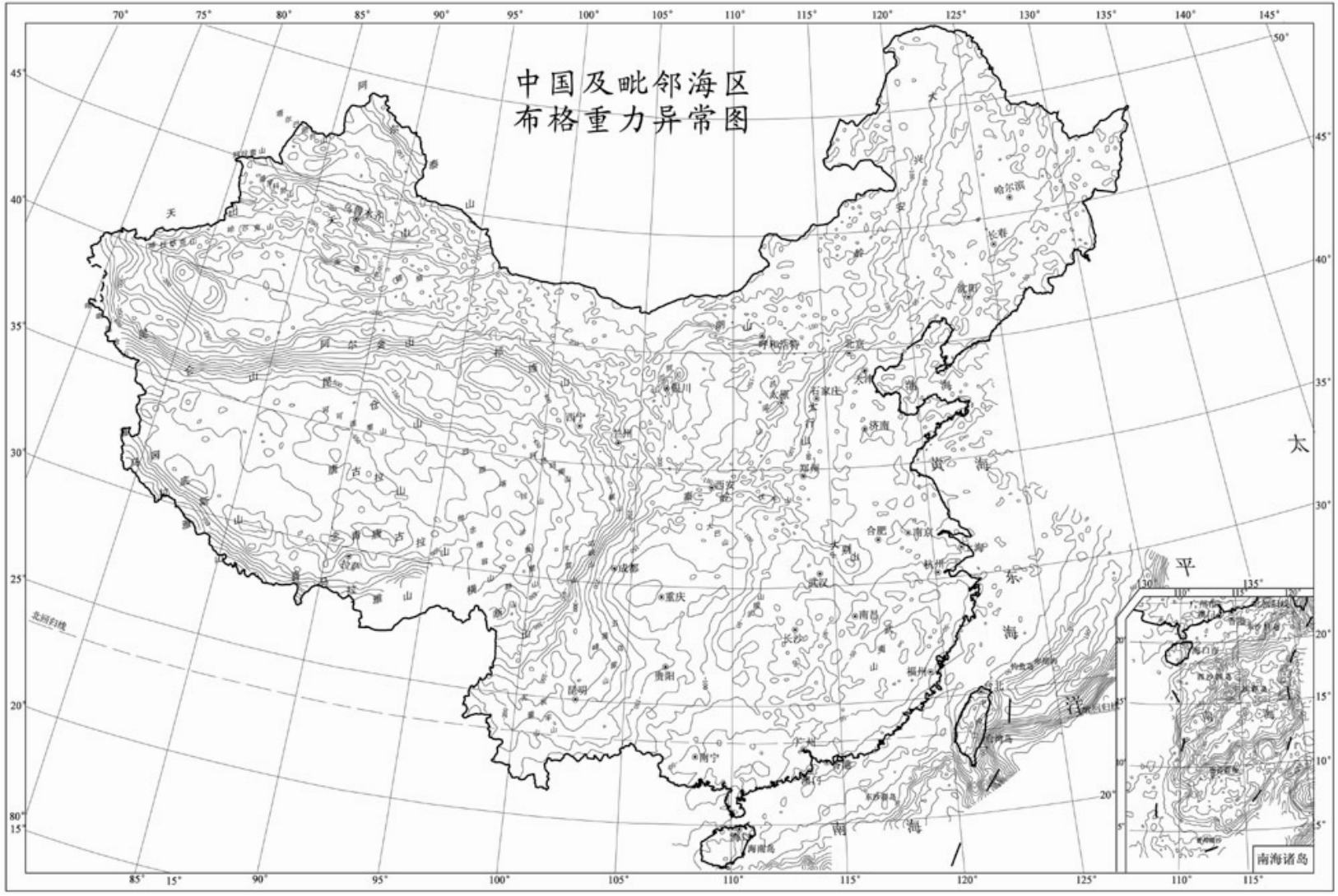
- 曾维鲁推论:
- 整个太平洋地区包括全球主要岛孤—海沟地区及深源地震带，显示出清晰的高正异常环带。异常特征与太平洋板块和纳斯卡板块边界线也吻合得较好。正异常带外面包围一圈负异常带；这一正一负的双层环状结构是GEM10B全球空间异常场的主要特征。产生重力高带的场源既有岩石圈之下地球深部的因素，也有存在于岩石圈深部范围内的因素，较浅层的异常源似乎是消减板块随著下插深度增大而导致的密度增高部分(因温度与压力增加所致)。

- 产生印度洋巨大负异常的场源存在于地球的深部，很可能是在软流圈以下存在著巨大的质量亏损所致，因在高阶场中，这一全球最大的负异常完全消失了。

- 从喜马拉雅到阿尔卑斯有一条横贯东西的高正异常带，它的走向与板块边界线亦符合的较好，但在低阶场中反映得并不明显，说明场源深度较浅。有人认为，产生该地区正异常的原因是喜玛拉雅山的地壳薄于相应的均衡地壳的厚度，故存在正的均衡异常。由于向北推移的印度板块与欧亚板块互相挤压，产生了巨大的构造运动压力，此力不仅克服了因均衡不足而产生的向下的均衡调整力，还迫使喜玛拉雅山脉继续上升。

- 大洋海岭的重力异常在高阶场中反映得很好，形成了与海岭走向相吻合的低幅正值异常(0-100g.u.)，而在低阶场中，这种特征完全消失，因而海岭的重力异常的场源应存在于浅部。结合海岭地区存在的其它地球物理特征，如高热流值，两侧对称分布的条带状磁异常，海水深度较浅，有大规模火山、地震活动等，可以认为海岭是地幔对流上涌的地区，是板块扩张的中心地带，之所以形成低幅正异常是由于地幔流上涌处的上表面为自由或近似于自由边界条件，因而地壳上升变形较大，从而形成与海岭走向一致的低幅正重力异常。

(二) 地壳深部构造的研究



- 重力场变化趋势
- 中国大陆及其毗邻海区布格重力异常变化的总趋势是由东向西逐渐减小。
- 在南海及琉球群岛布格重力异常值最高，为400×10g.u.，至海岸线为0×10g.u.左右。由海岸线向西，重力异常值缓慢递减，并进入负值区。沿大兴安岭–太行山–武陵山一带为–55×10g.u.，显示为过渡带。再往西，至青藏高原周边地区(西昆仑山–阿尔金山–祁连山–龙门山–大雪山)，重力异常值迅速减小为–300×10g.u.。青藏高原大部分地区的重力异常值小于–400×10g.u.。

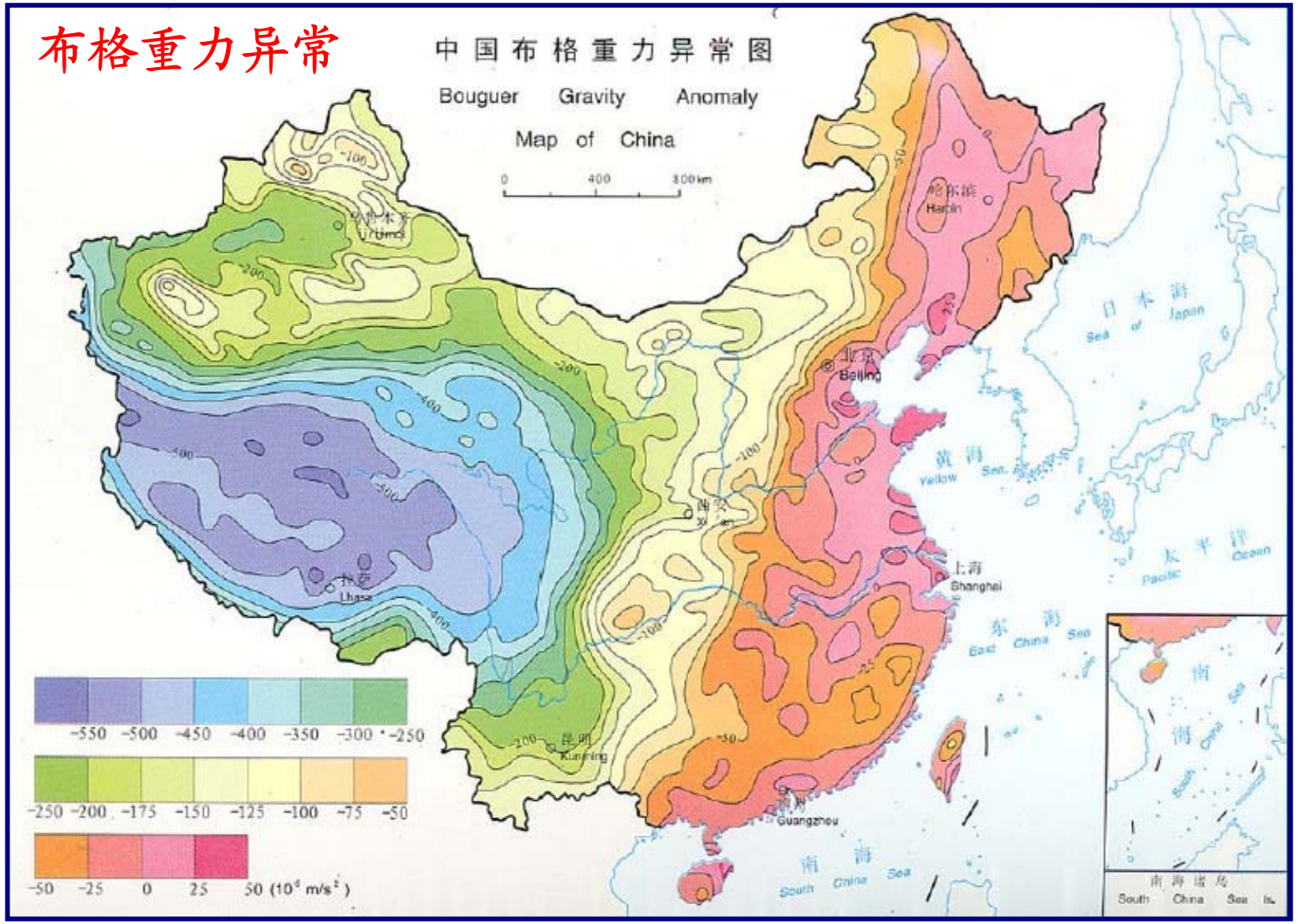
- 重力梯级带
- 主要为NE向和近EW向，其次为NW向和SN向。其中，有三条巨大的重力梯级带：大兴安岭–太行山–武陵山重力梯级带，青藏高原周边重力梯级带以及钓鱼岛重力梯级带。
- 大兴安岭–太行山–武陵山重力梯级带
- 展布方向为NE向。北端沿大兴安岭延伸至西柏利亚，南端经广西西部延伸入越南境内。在国内长达4000km，宽约50km~100km，被认为是一条重要的地球物理界线。

- 青藏高原周边重力梯级带
- 围绕青藏高原呈弧形展布。长约4100km，宽约100km~150km。

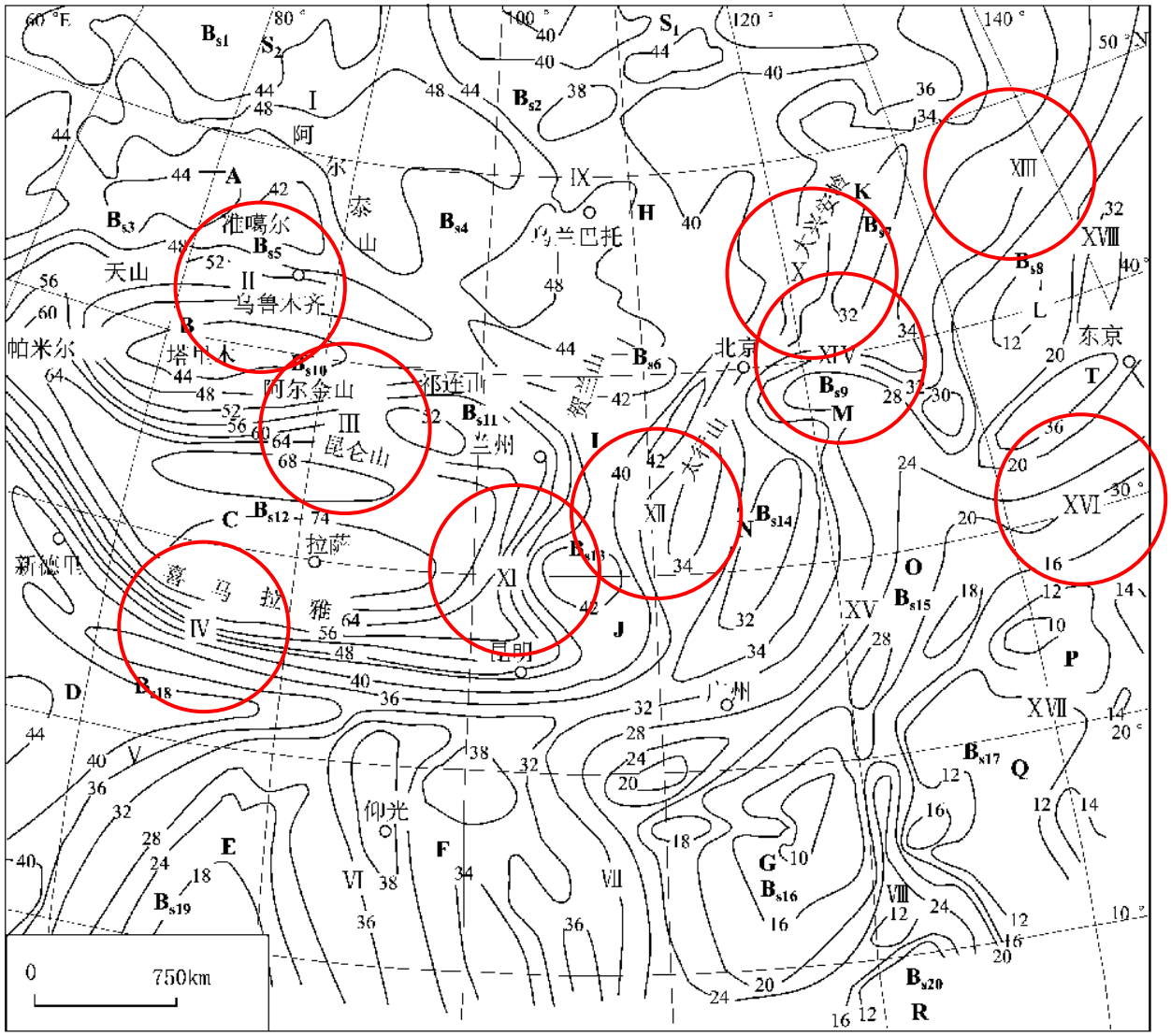
- 钓鱼岛重力梯级带
- 位于东南大陆架东侧，由南向北展布方向为NEE向转为NE向，大体与我国东海岸平行。

- 还有一些规模较小的重力梯级带，主要有：宁波–茂名重力梯级带，东昆仑山–阿尼玛卿山重力梯级带，额尔齐斯(阿尔泰山)重力梯级带，雅鲁藏布江重力梯级带等

布格重力异常

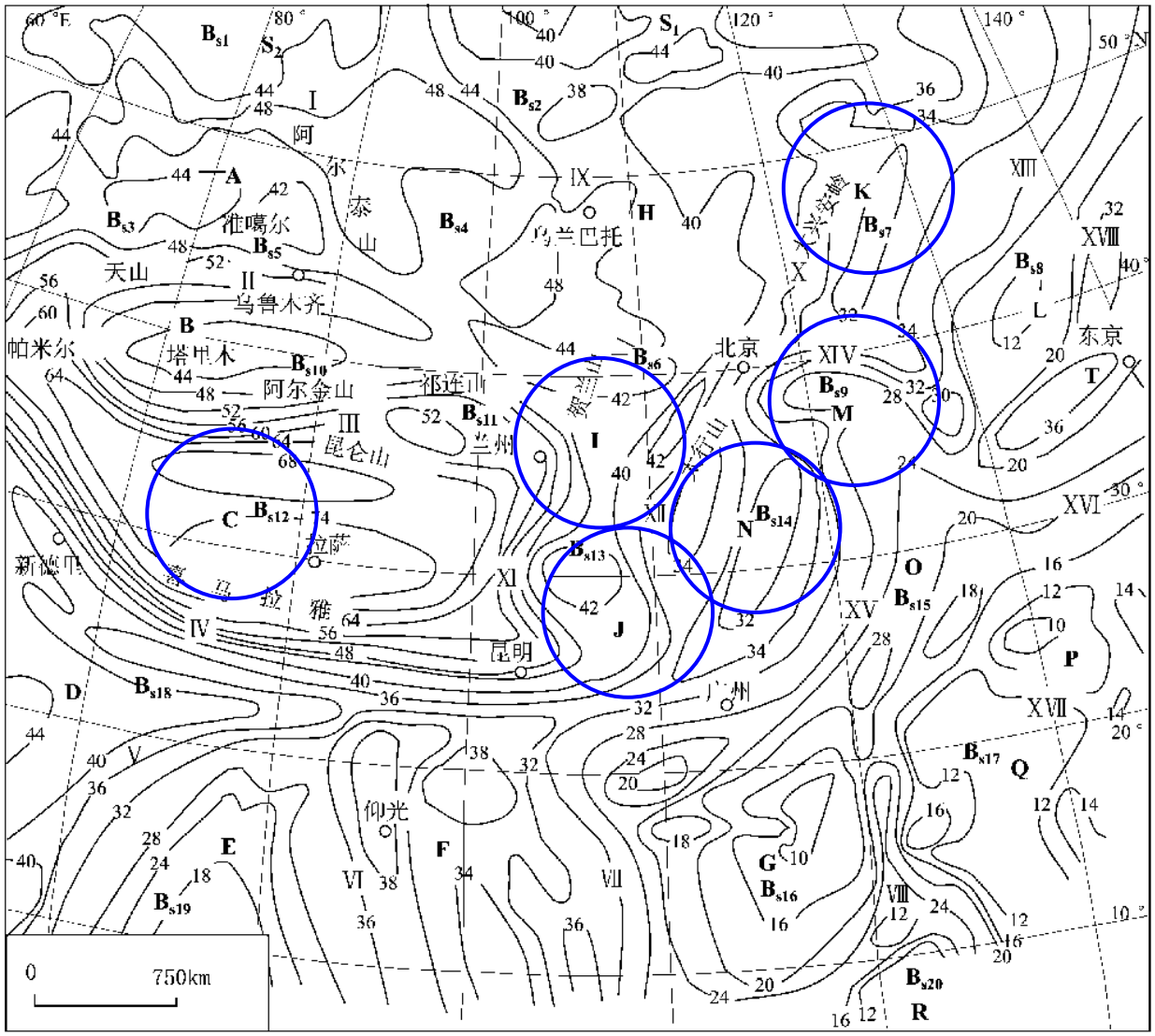

中国布格重力异常图
Bouguer Gravity Anomaly
Map of China
0 400 800km
Harbin
Beijing
Lhasa
Shanghai
Guangzhou
Kunming
Yellow Sea
East China Sea
South China Sea
Pacific Ocean
Japan Sea
-550 -500 -450 -400 -350 -300 -250
-250 -200 -175 -150 -125 -100 -75 -50
-50 -25 0 25 50 (10^{-5} m/s^2)

东亚及邻近海域地壳厚度分布图(腾吉文，2002)



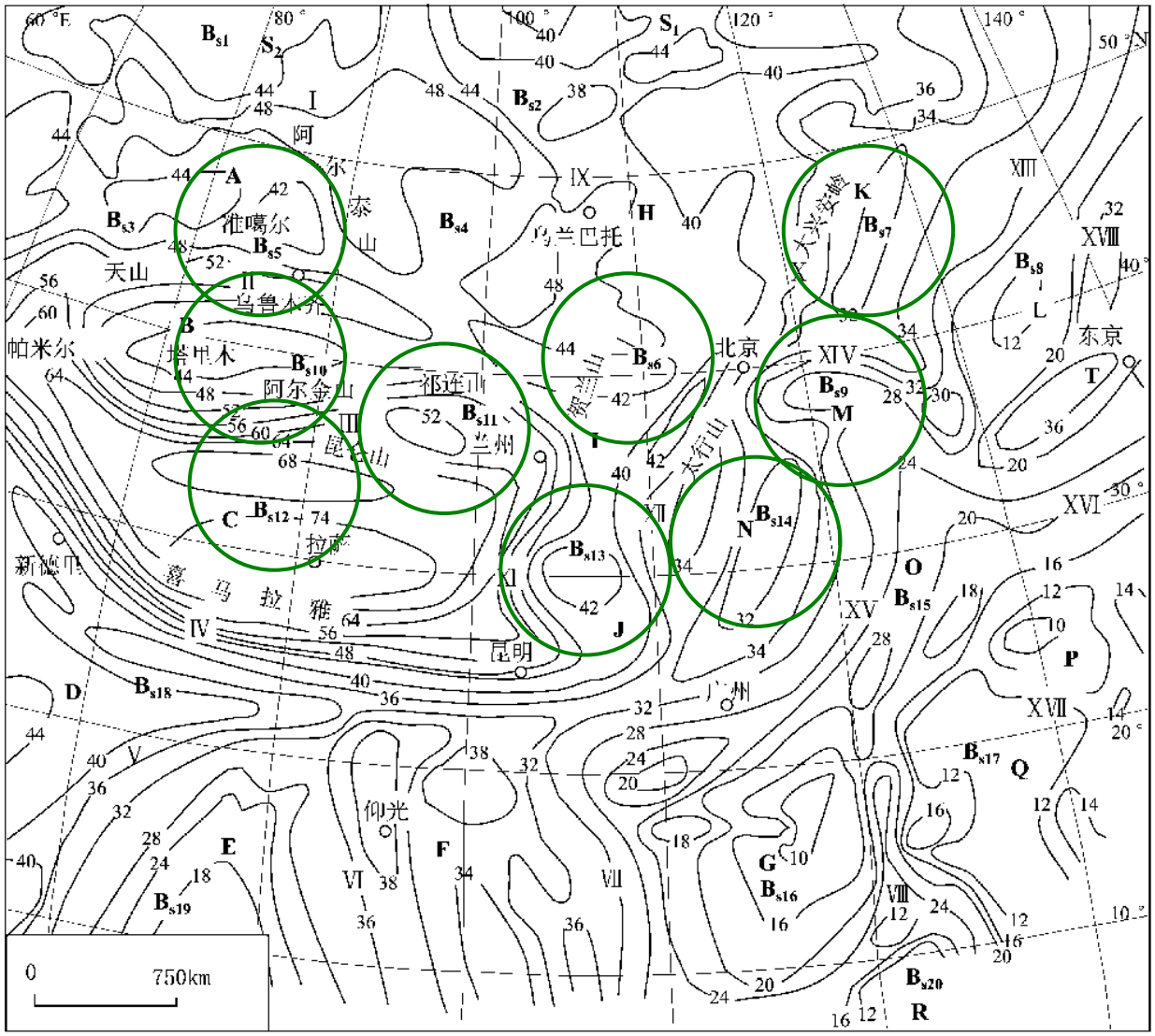
- 9个陡梯度带
- 天山山脉陡梯度带(II)，地壳厚度变化为48-52km;
- 阿尔金山陡梯度带(III)，地壳厚度变化为48-64km;
- 喜马拉雅陡梯度带(IV)，地壳厚度变化为40-60km;
- 大兴安岭陡梯度带(X)，地壳厚度变化为34-42km;
- 南北向陡梯度带(XI)，地壳厚度变化为44-60km;
- 太行山-雪峰山-云开大山陡梯度带(XII)，地壳厚度变化为36-42km;
- 锡霍特地壳厚度等值线陡梯度带(XIII)，地壳厚度变化为30-34km;
- 燕山陡梯度带(XIV)，地壳厚度变化为28-34km;
- 东海陡梯度带(XVI)，地壳厚度变化为16-24km。

东亚及邻近海域地壳厚度分布图(腾吉文，2002)



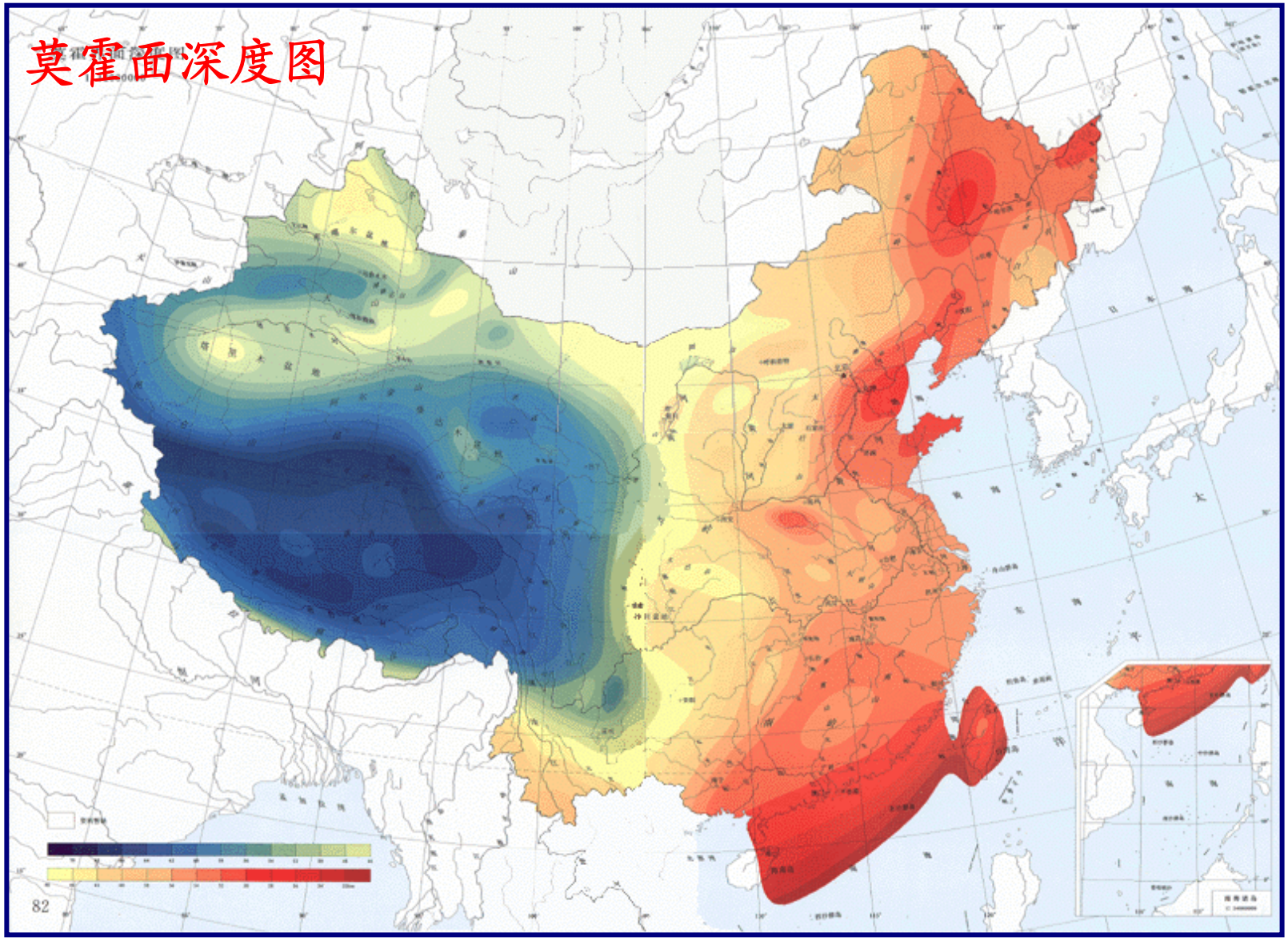
- 6个地壳块体
- C块体，即青藏高原块体;
- I块体，由鄂尔多斯和汾渭裂谷系构成;
- J块体，基本上以四川盆地与川、滇构造带和华南块体西缘一起组构，相当于扬子块体;
- K块体，即东北块体;
- M块体，即渤海湾块体;
- N块体，即东南板块。

东亚及邻近海域地壳厚度分布图(腾吉文，2002)

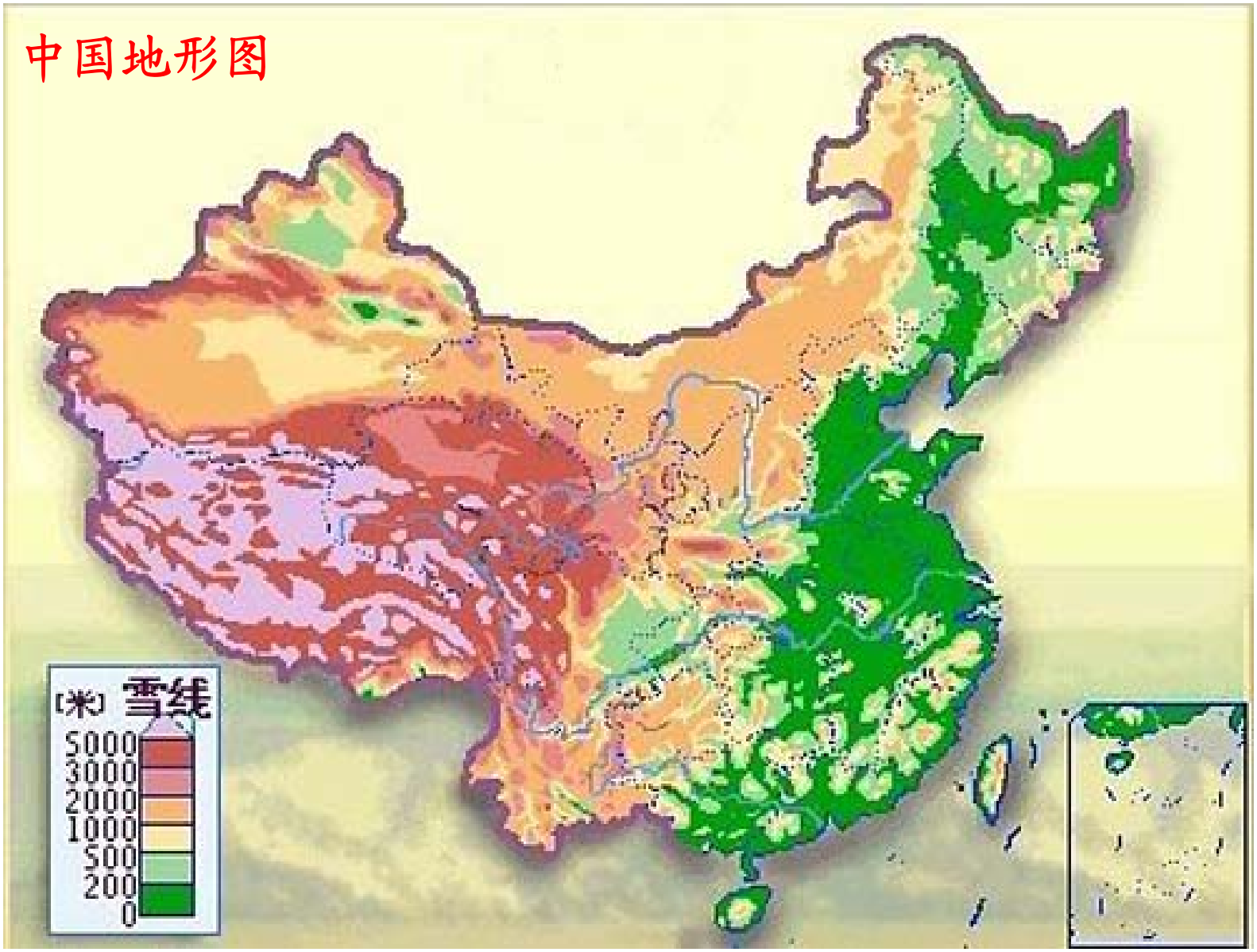


- 9个沉积盆地
- 准葛尔盆地(B_{s5})，相对周边地带Moho界面上隆4-8km;
- 黄土高原地带(B_{s6})，上隆2-4km;
- 东北平原地区(B_{s7})，上隆4-6km;
- 渤海湾盆地(B_{s9})，上隆4-6km;
- 塔里木盆地(B_{s10})，上隆5-10km;
- 柴达木盆地(B_{s11})，上隆4-8km;
- 羌塘盆地(B_{s12})，上隆4-6km;
- 四川盆地(B_{s13})，上隆2-4km;
- 华南地带(B_{s14})，主要包括合肥盆地和江汉盆地，上隆2-4km。

莫霍面深度图



中国地形图



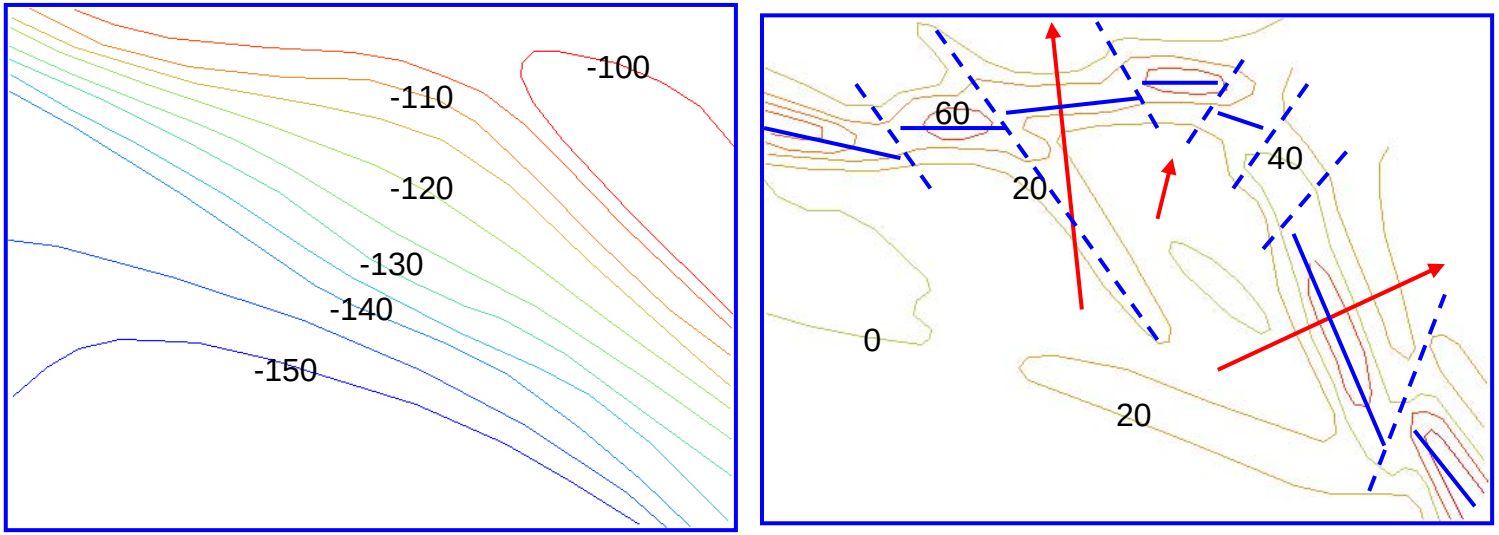
- 我国地壳厚度从东向西逐渐加大的趋势,与重力异常逐渐降低的趋势完全对应;

- 作为地壳块体分界线的所有陡梯度带,与重力异常梯级(度)带,在位置上完全重合;

- 与上述盆地,特别是西部盆地,相同位置的重力异常具有重力高的特征,显示地下构造的隆起。就是说，在总体上，Moho界面的形态及深度变化与重力异常的形态及数值变化十分吻合。

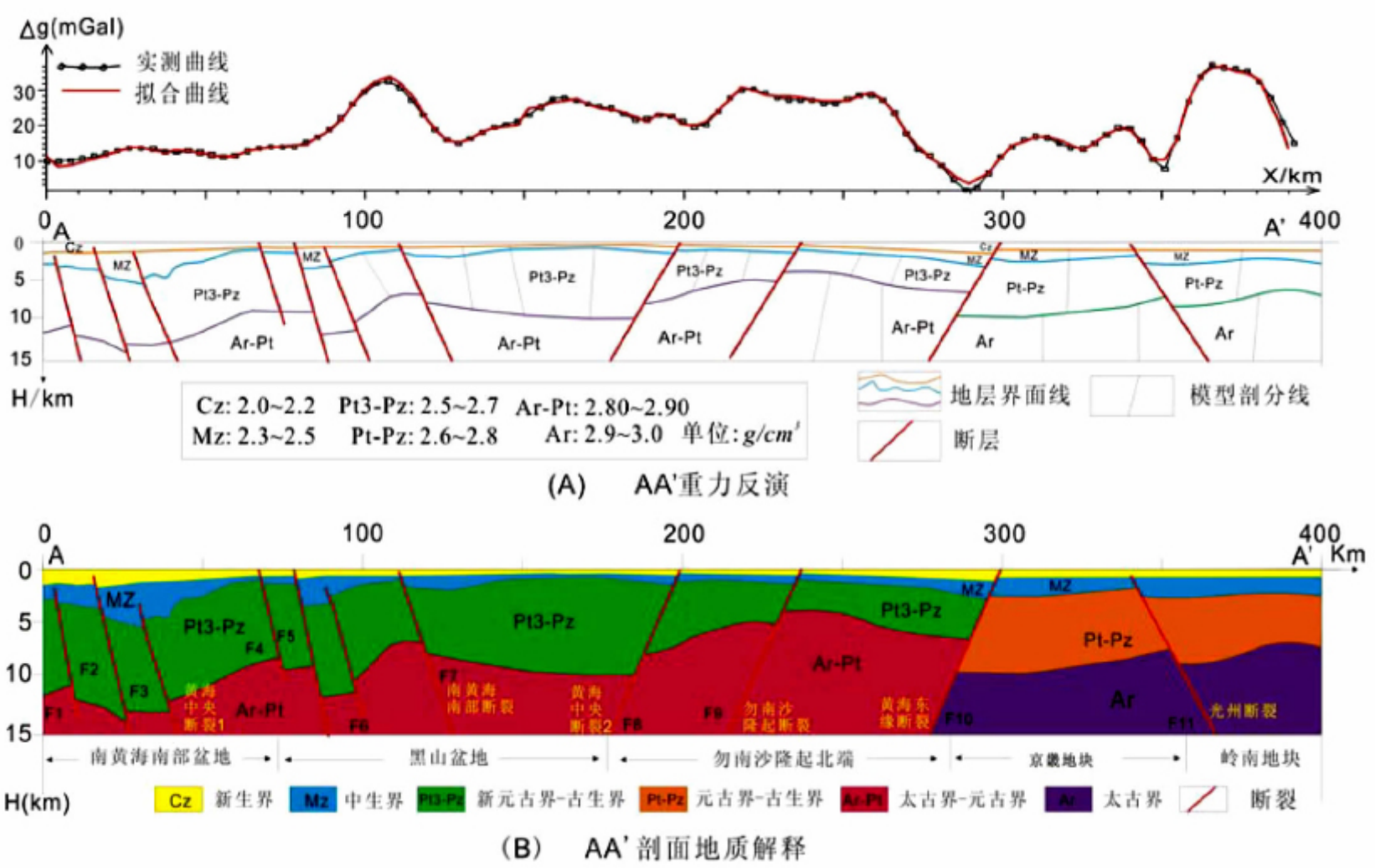
- 全国重力异常图主要反应了Moho界面的特征，或者说，全国重力异常图表示的区域重力异常，主要由Moho界面所引起。

- 重力异常类似于地壳厚度与地形起伏的反相关关系，同时,重力图中的重力梯级带与我国大的山系或造山带也非常对应。



- 左：重力异常特征为北西向的梯度带，重力值由北东向南西方向逐渐降低。
- 右：水平梯度V_{xz}，其等值线表现出往北北东方向凸出的狭长形正异常带。异常峰值与大致北西向的主要张性大断裂相对应。

- 布格重力异常图及钻孔资料表明，北部为断裂的上升盘；西南部为下降盘，在下降盘一侧沉积了巨厚的中新生界地层。
- 在主要的张性大断裂形成后，有一组来自南南西方向的应力作用，主压应力集中在向北凸出的部位，因此在主断裂的垂直方向上产生一系列雁行排列的压扭性小断裂，将大断裂切割成块断状；通过对重力资料的解释进一步查清了断裂的具体位置，延伸方向、断层性质等等。


Δg(mGal)
实测曲线
拟合曲线
X/km
A
A'
Cz
MZ
Pt3-Pz
Ar-Pt
Pt-Pz
Ar
H/km
Cz: 2.0~2.2 Pt3-Pz: 2.5~2.7 Ar-Pt: 2.80~2.90
Mz: 2.3~2.5 Pt-Pz: 2.6~2.8 Ar: 2.9~3.0 单位: g/cm³
地层界面线
模型剖分线
断层
(A) AA'重力反演
F1
F2
F3
F4
F5
F6
F7
F8
F9
F10
F11
南黄海南部盆地
黑山盆地
勿南沙隆起北端
京畿地块
岭南地块
H(km)
新生界
中生界
新元古界-古生界
元古界-古生界
太古界-元古界
太古界
断裂
(B) AA'剖面地质解释

(涂广红, 2008)

(四) 划分大地构造单元

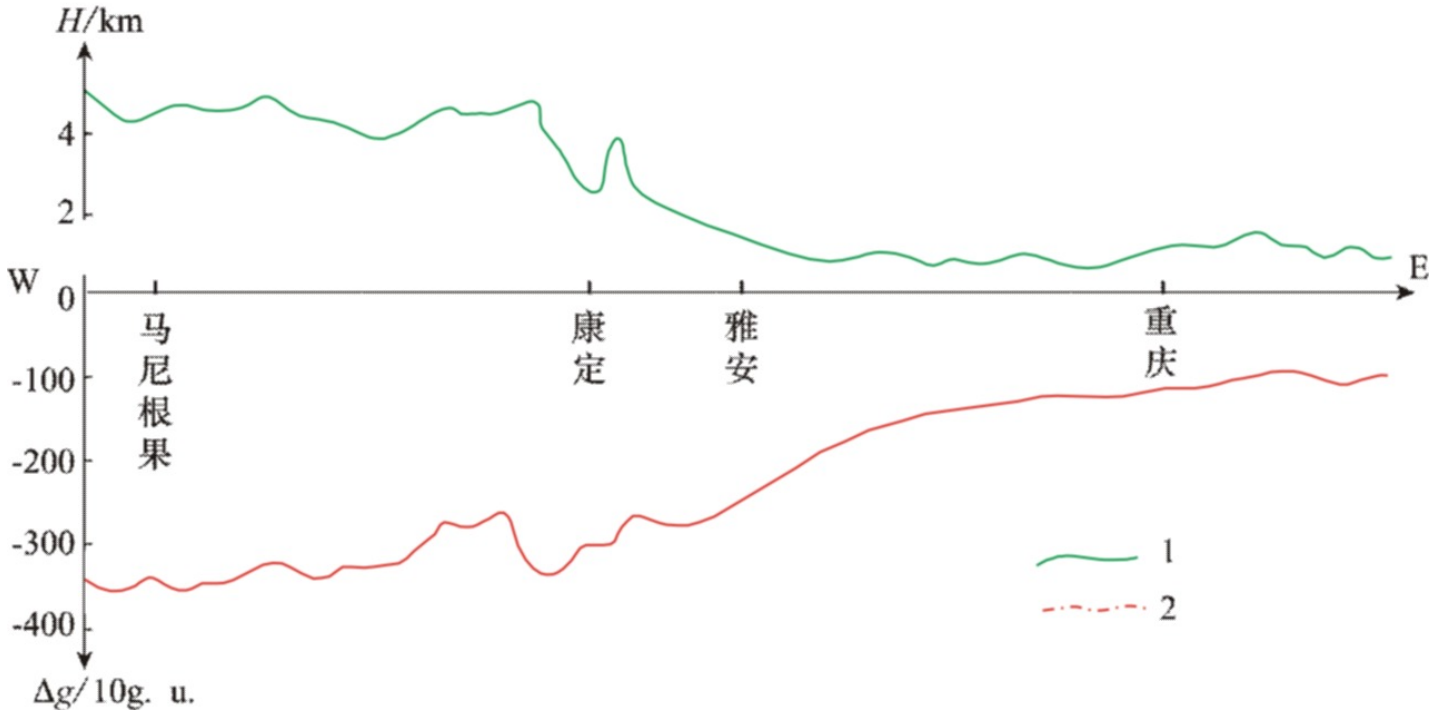
- 大地构造单元：按地壳结构的特点及构造发展史而划分的不同区域。
- 通常所称一级大地构造单元，就是指所划分的地台区和地槽区。
- 重力异常在地槽区和地台区具有不同的特征。

- 地槽区(褶皱带)：地壳上构造运动最强烈、构造最复杂的地区，区内以强烈的褶皱运动、岩浆活动、变质作用和成矿作用发育为主要特点。
- 地壳的强烈振荡和褶皱运动使地槽区形成巨厚的沉积建造，并在造山运动中回返褶皱成山系，所以地形上往往表现为巨大的褶皱山系，同时地壳厚度相应增大。

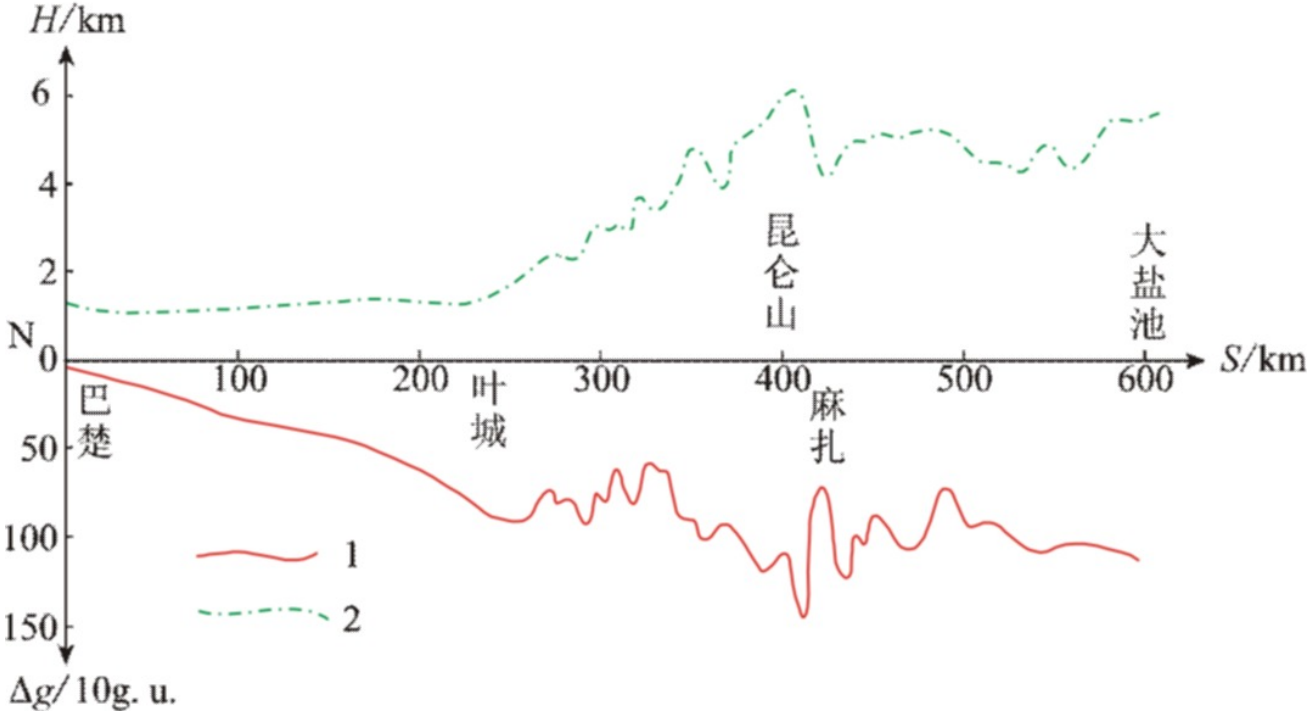
- 地槽区的区域性重力异常的等值线多呈条带状重力低平行排列，延伸可达数百乃至数千公里；
- 区域异常变化的幅度可达数百至数千g. u. 。
- 一般来讲该区布格重力异常与地形起伏有镜像关系，就是说，地形越高，重力异常越低。也反映了地壳下界面(莫霍面)相应加深的特点。

- 地台区：地壳运动相对稳定、沉积建造相对较薄、褶皱作用和火山活动相对较弱的地区。在地形上看，地台区多为平原或丘陵。

- 地台区的区域布格重力异常变化平缓、稳定、相对幅度变化较小，方向性不明显。因为地壳厚度较薄，平均异常值较地槽区高。



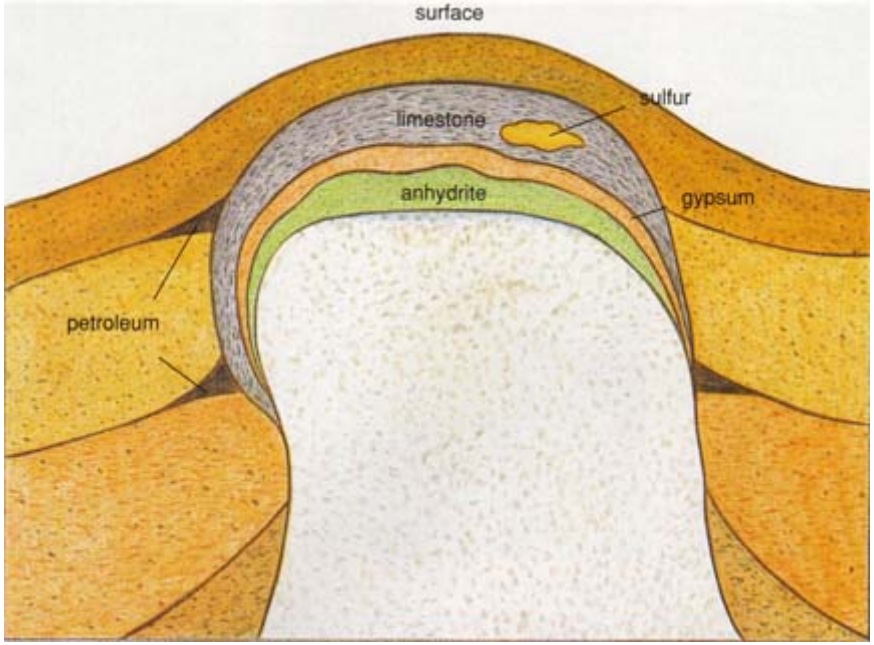
- 重庆至西藏马尼根果东段地形平坦，重力异常变化也平缓，反映了地台区的主要特征；康定至雅安一段是过渡带，地形逐渐升高，重力值逐渐降低；西段地形处于高山区，重力异常值很低并且变化也较大，显示了地槽区的异常特征。

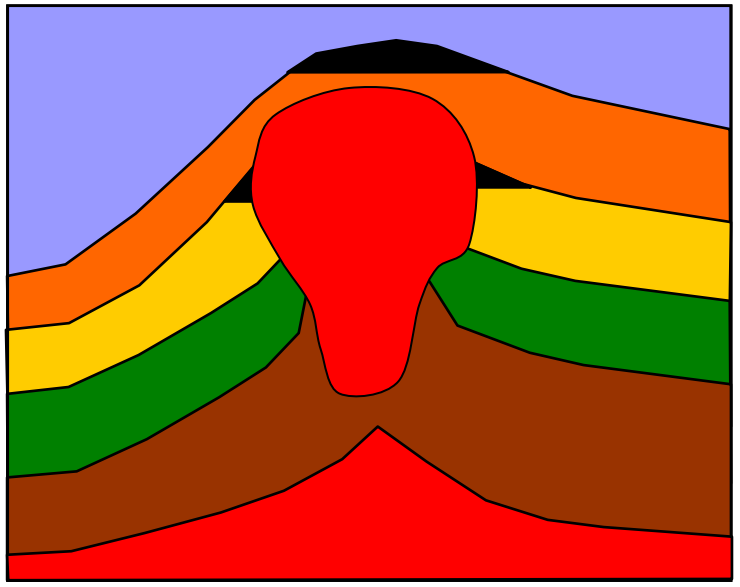


- 新疆南部由巴楚以西至大盐池的南北剖面北段巴楚至叶城处于塔里木地台区，重力异常变化较平稳；叶城至大盐池进入地槽性质的昆仑山系褶皱带后，重力异常随著地形起伏而出现了大体呈镜像关系的剧烈跳动。

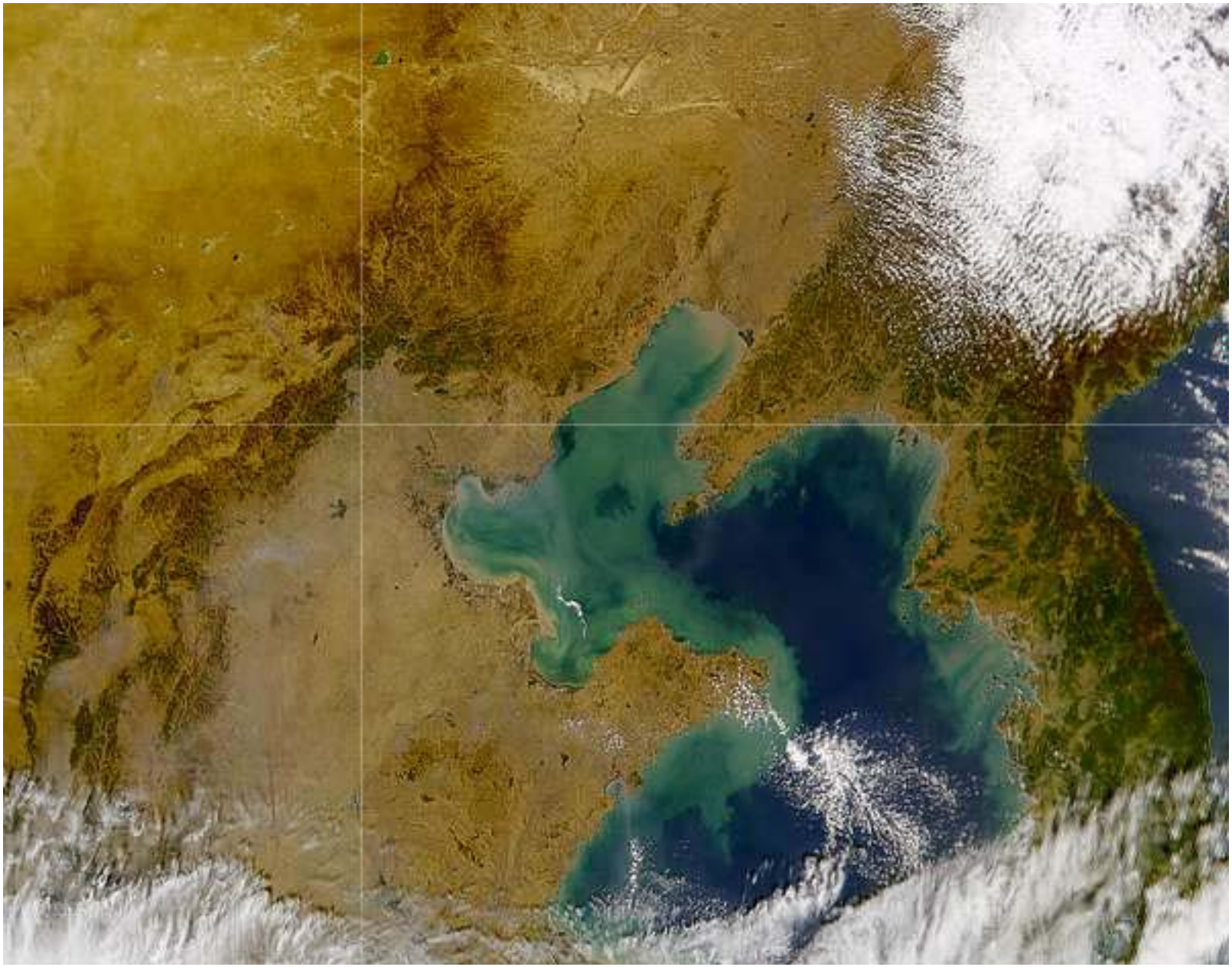
(五)石油及天然气勘探







- 利用小比例尺(1:100万-1:50万)重力异常图研究区域地质构造，划分构造单元，圈定沉积盆地的范围，预测含油、气远景区;
- 根据中等比例尺(1:20-1:10万)的重力异常图划分沉积盆地内的次一级构造，进一步圈定出有利于油、气藏形成的地段，寻找局部构造，如地层构造、古潜山、盐丘、地层尖灭、断层封闭等有利于油、气藏储存的地段;
- 利用大比例尺高精度重力测量查明与油、气藏有关的局部构造的细节，直接寻找与油、气藏有关的低密度体，为钻井布置提供依据;
- 在油气开发过程中，根据重力异常随时间的变化，可以监测油气藏的开发过程。



- 华北平原是中朝准地台的一部分，其基底是由前震旦纪的变质岩系所构成。
- 吕梁运动以后相当长一段时期为稳定的地区，震旦纪至中奥陶纪沉积了较厚的海相地层;
- 上奥陶至下石炭纪期间，全区上升，缺失了这一时期的沉积;
- 中石炭纪以后，全区再度下沉，接受了海陆交互相的沉积;
- 燕山运动时期，北部、西部边缘褶皱成山(燕山及太行山)，平原区内部为新生代沉积所覆盖，全区沉积岩系累加厚度达几万米。

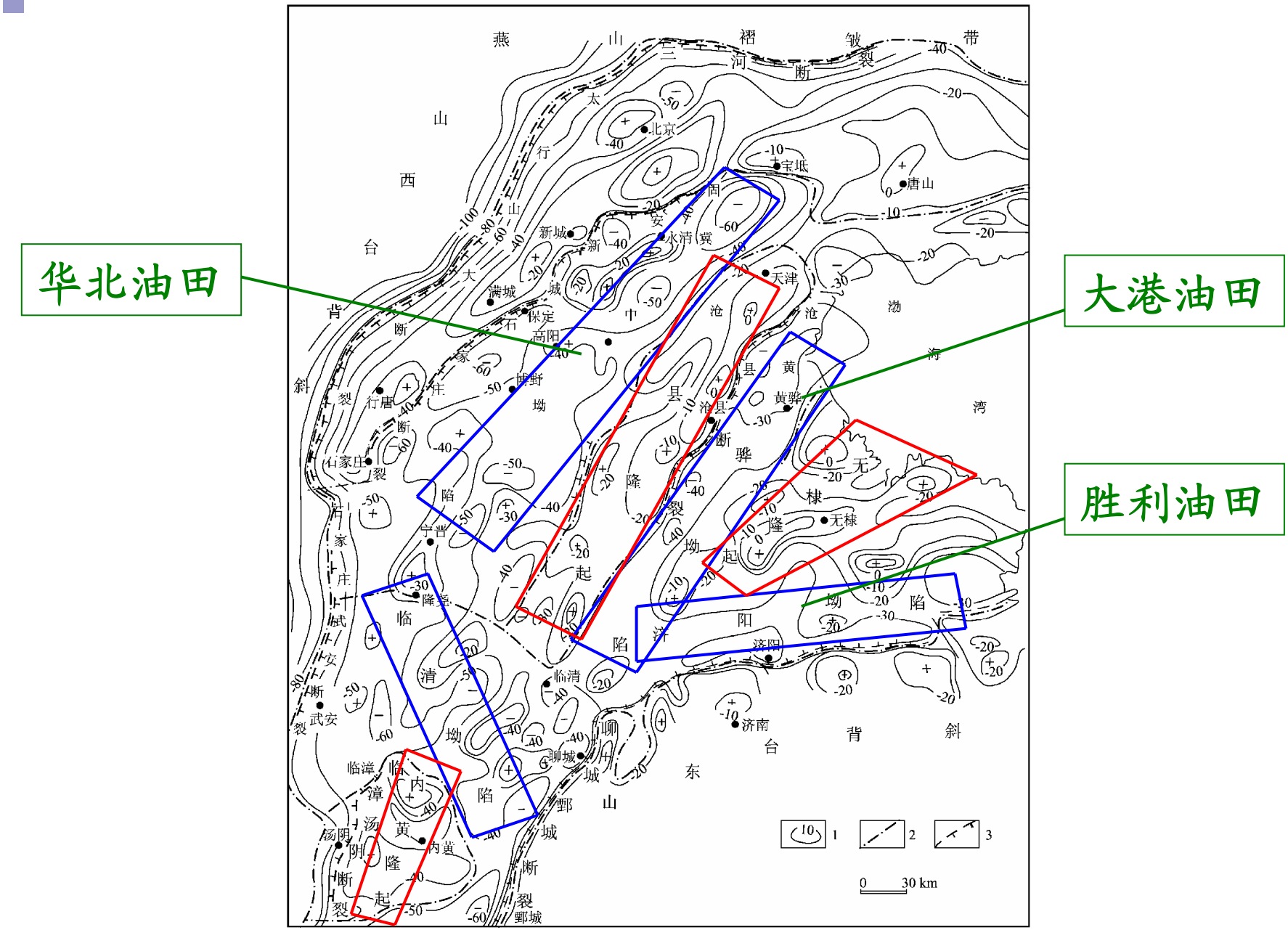
- 平原区沉积岩系内有两个主要密度分界面:

  上部界面：新生界沉积与下伏中生界岩系之间;

  下部界面：下古生界海相地层与上覆中生界岩系之间。

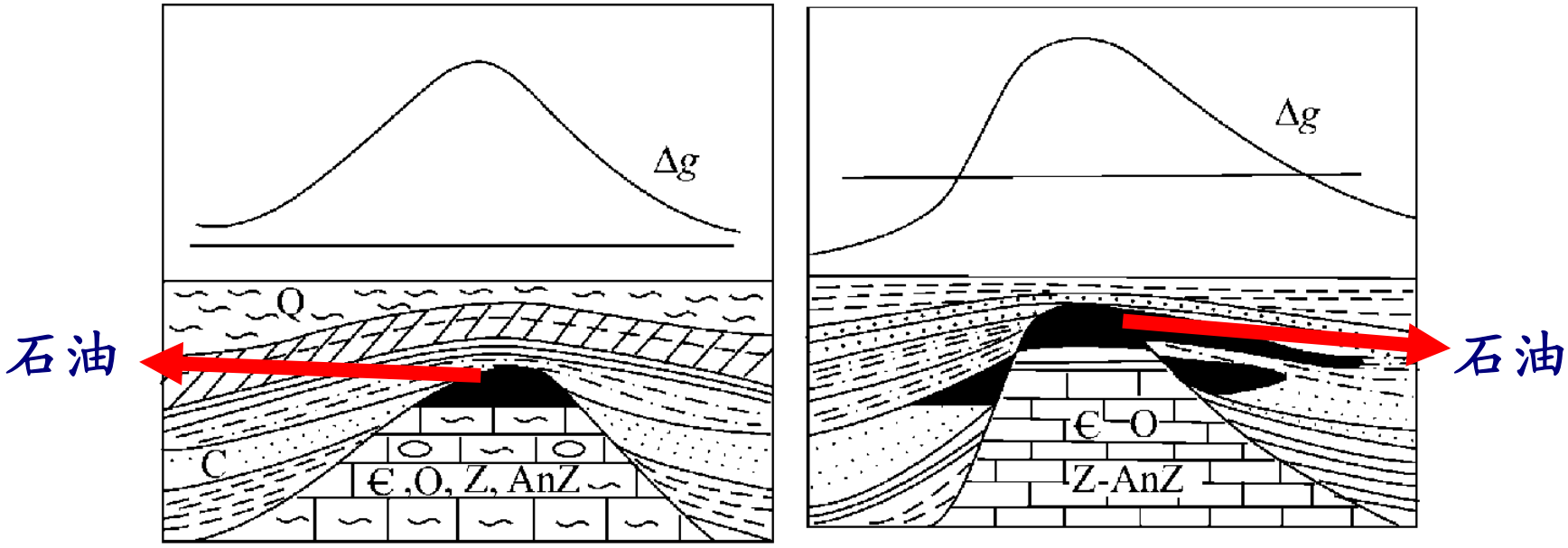
- 在上古生界及中生界缺失的地区，两个密度界面合为一个界面，它的密度差可达0.4-0.6g/cm^3。

- 由于该区上古生界及中生界地层分布零散，加之下古生界海相地层与结晶基底密度差不明显，因此在重力解释时，就可以把下古生界的顶面作为结晶基底看待。


华北油田
大港油田
胜利油田
燕山褶皱带
太行山西麓大断裂
北京
天津
保定
沧县
黄骅
无棣
济阳
济南
聊城
临清
武安
邯郸
新城
满城
高阳
唐山
宝坻
水洼
1
2
3
0 30 km

- 根据对重力异常特征的分析并结合其它物探成果，华北平原可划分出下列构造单元：冀中坳陷、沧县隆起、黄骅坳陷、无棣隆起、济阳坳陷、临清坳陷和内黄隆起等。
- 这些构造单元的划分为油气普查、勘探指明了潜在的远景区和进一步工作的地区，并且这些推断被后来的钻井资料和进一步的物探工作所证实。
- 二十世纪六十年代在黄骅坳陷中找到了大港油田，在济阳坳陷发现了胜利油田，七十年代又在冀中坳陷发现了任邱油田(即华北油田)。

- 古潜山构造主要由下奥陶统、寒武系、震旦系的灰岩为主的老地层隆起所构成。
- 当它周围沉积了巨厚的生油岩系时，石油就会古潜山地层上翘或隆起部位运移、聚集。
- 由于石灰岩的节理、层理或溶洞比较发育，因此在一定条件下，可形成古潜山油田。
- 断层封闭构造所产生的断块凸起或下陷，在具有良好的生、储油条件下，也可形成储油构造。



- 既然石油、天然气比围岩轻，为什么在上面两个图上所观测到的重力异常不是负异常，而是正异常？如何解释？欲得到负异常有什么办法？

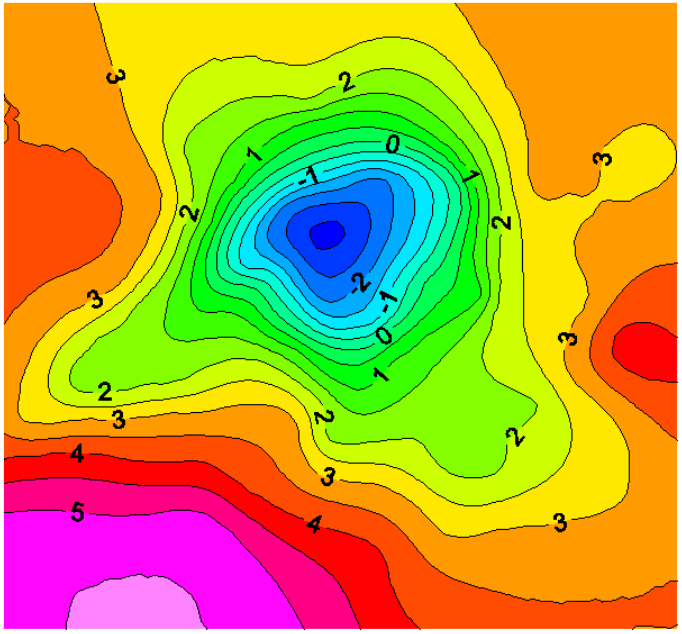
上两图重力异常主要反映的高密度古潜山隆起和断块的凸起，所以是正异常。尽管油气比围岩密度低很多，但由于规模小、埋深大、中等精度的重力测量显示不出来。可以采用特高精度的重力测量并对重力值做弱信号识别提取、高次导数处理等等。

- 除油气田预测及探测外，重力法已经用于:
  - ✓ 油气资源评价
  - ✓ 解决勘探中不同阶段的问题
  - ✓ 与地震资料进行综合解决地震解释中的一些难题
  - ✓ 解决火山岩地区的问题
  - ✓ 估计地震波速度
  - ✓ 推断油气水平运移方向等。

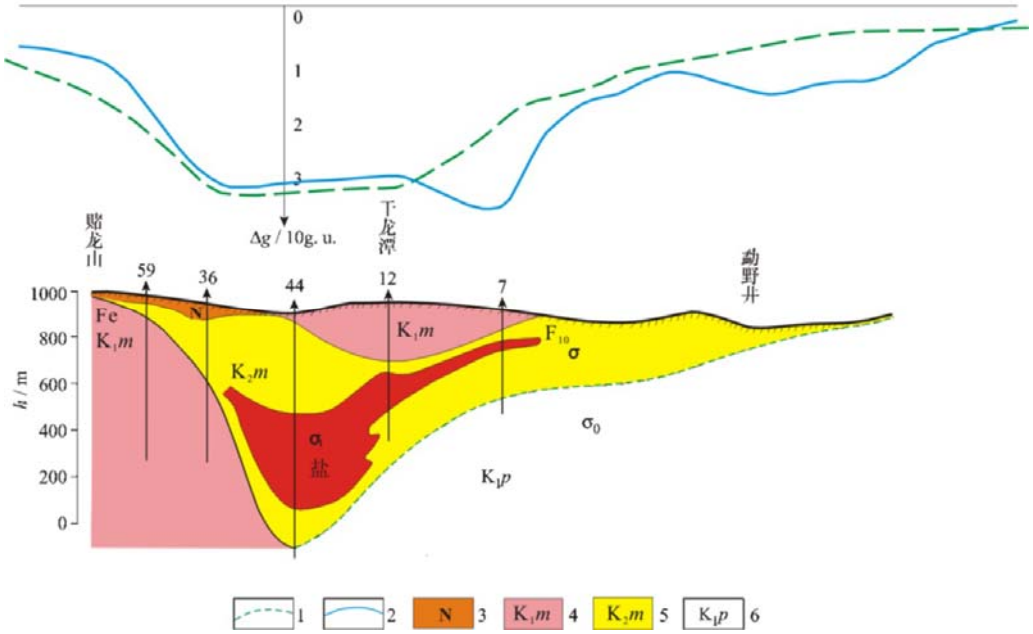
(六) 盐矿探测

- 盐岩是一种沉积矿床，主要产于古内陆盆地的不泻湖里或滨海半封闭的海湾中。
- 由于盐岩的密度比围岩低，因此当盐矿有一定规模时，应用重力勘探的效果很好。





云南勐野井盐矿区布格重力异常图



穿过勐野井盐矿区的重力剖面解释

$\sigma 0=2.64 g/cm^3$，$\sigma=2.60 g/cm^3$，

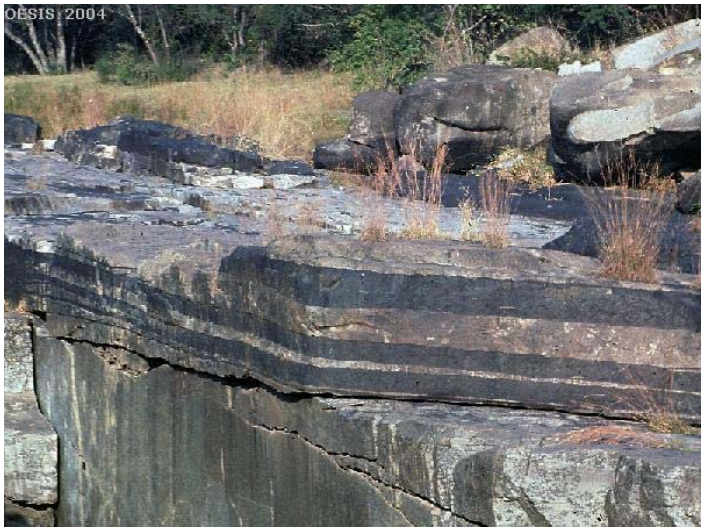
$\sigma 1=2.20 g/cm^3$，1— Δg 理论曲线，

2— Δg 实测曲线，3—上第三系，

4 —白垩系曼岗组，5—白垩系勐野井组，6—白垩系扎沙河组

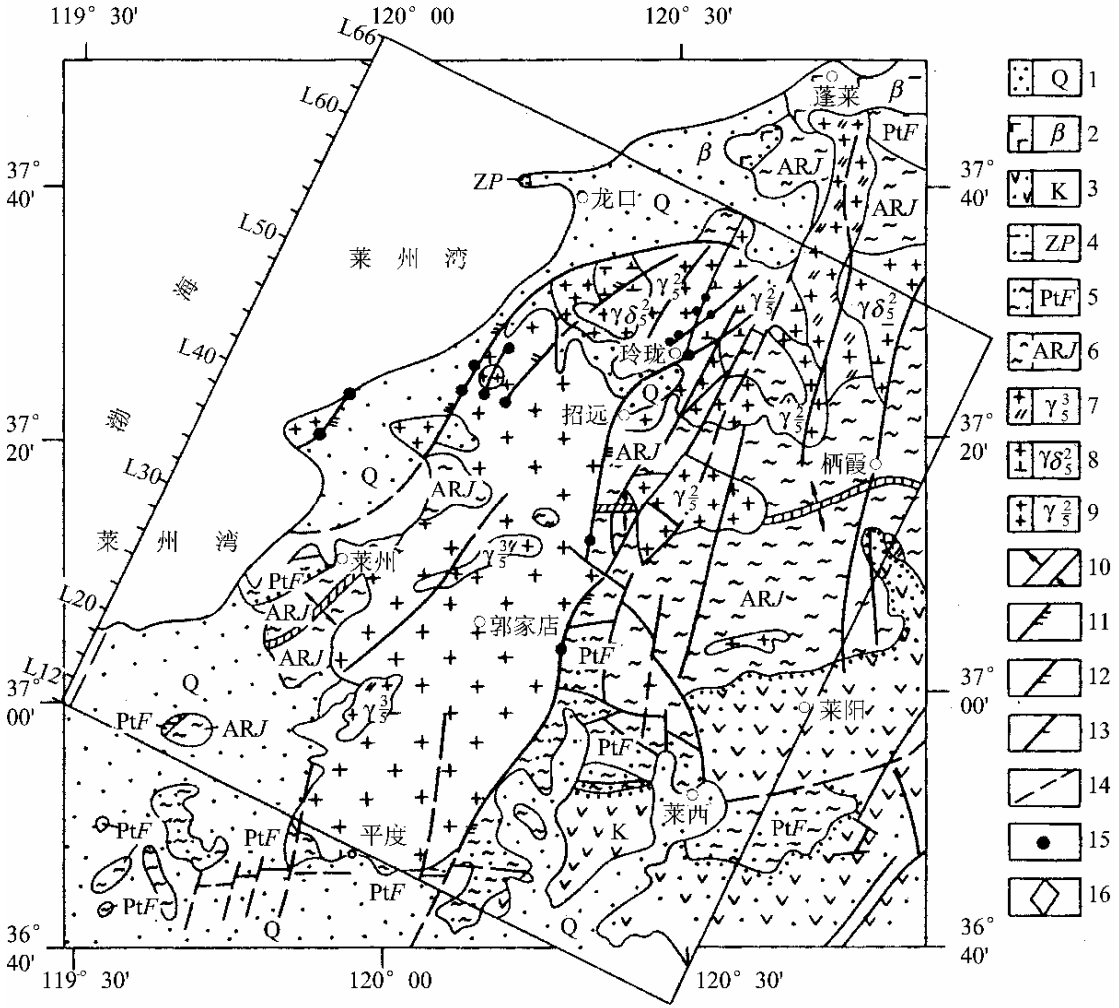
(七) 金属矿勘探

- 应用重力法勘探金属矿床有两个途径:
  - ✓ 在有利条件下直接寻找矿体;
  - ✓ 研究金属矿床赋存的岩体或构造以推断矿体的位置。

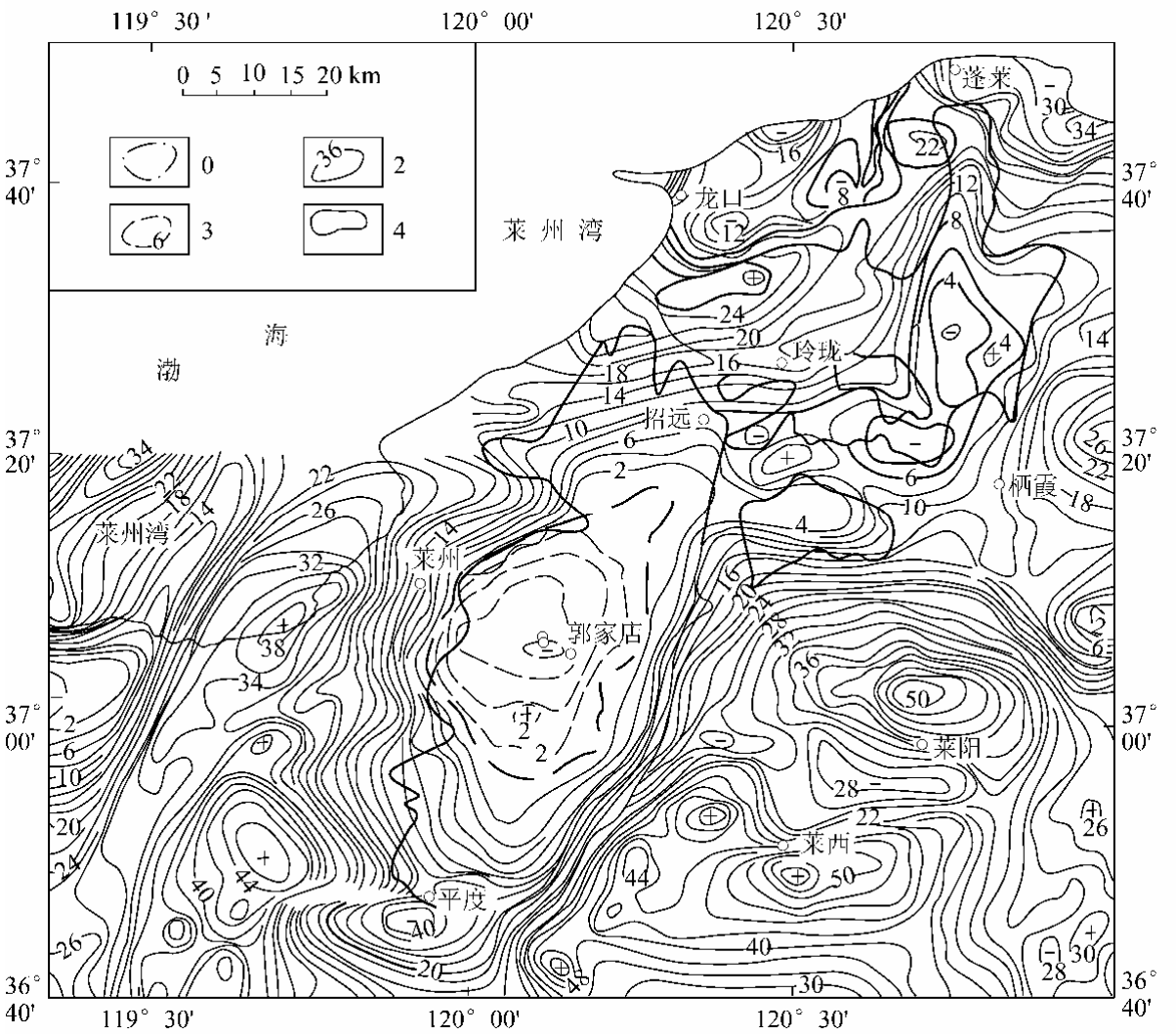




山东招远金矿

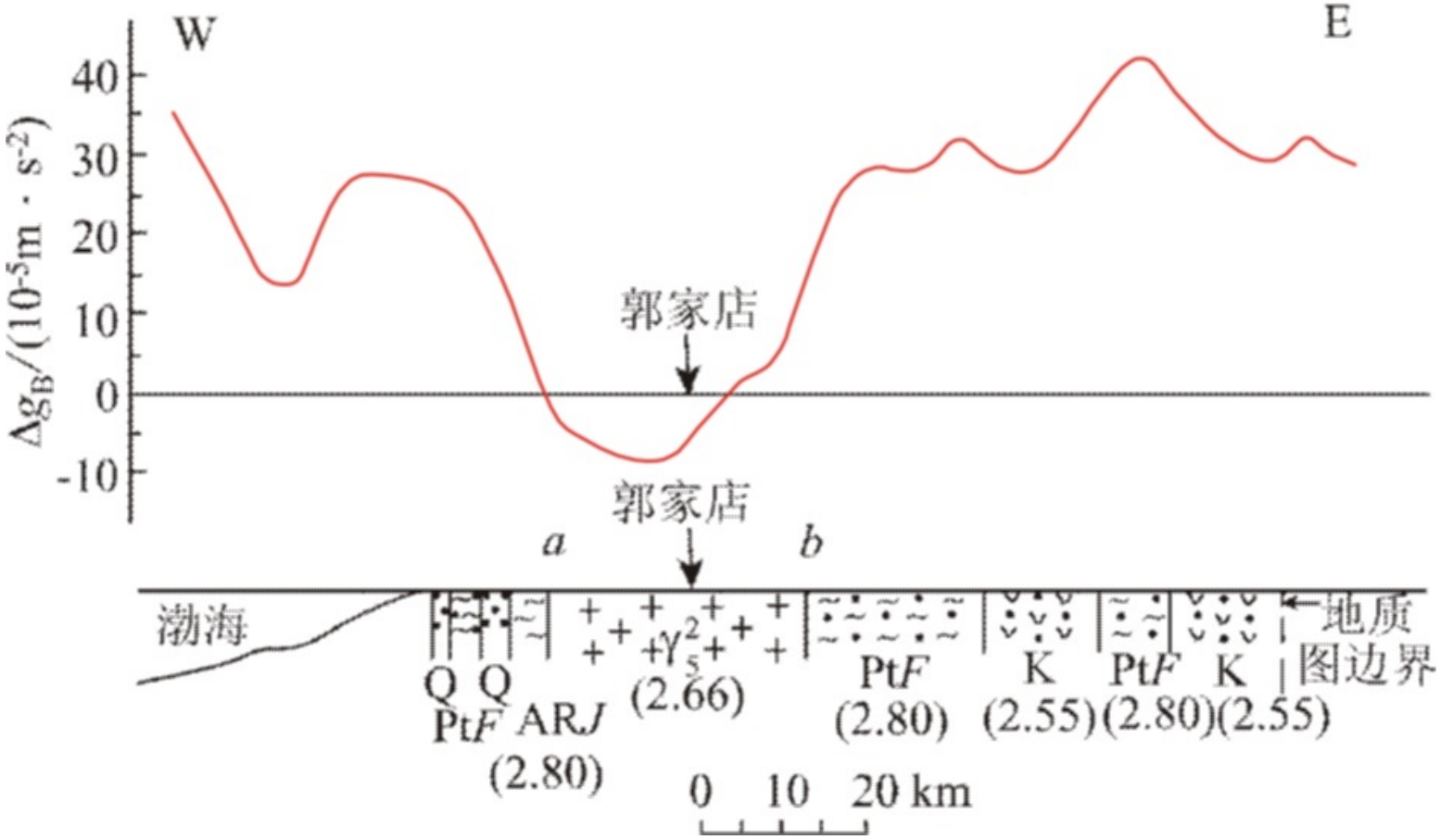


胶东西北部区域地质略图

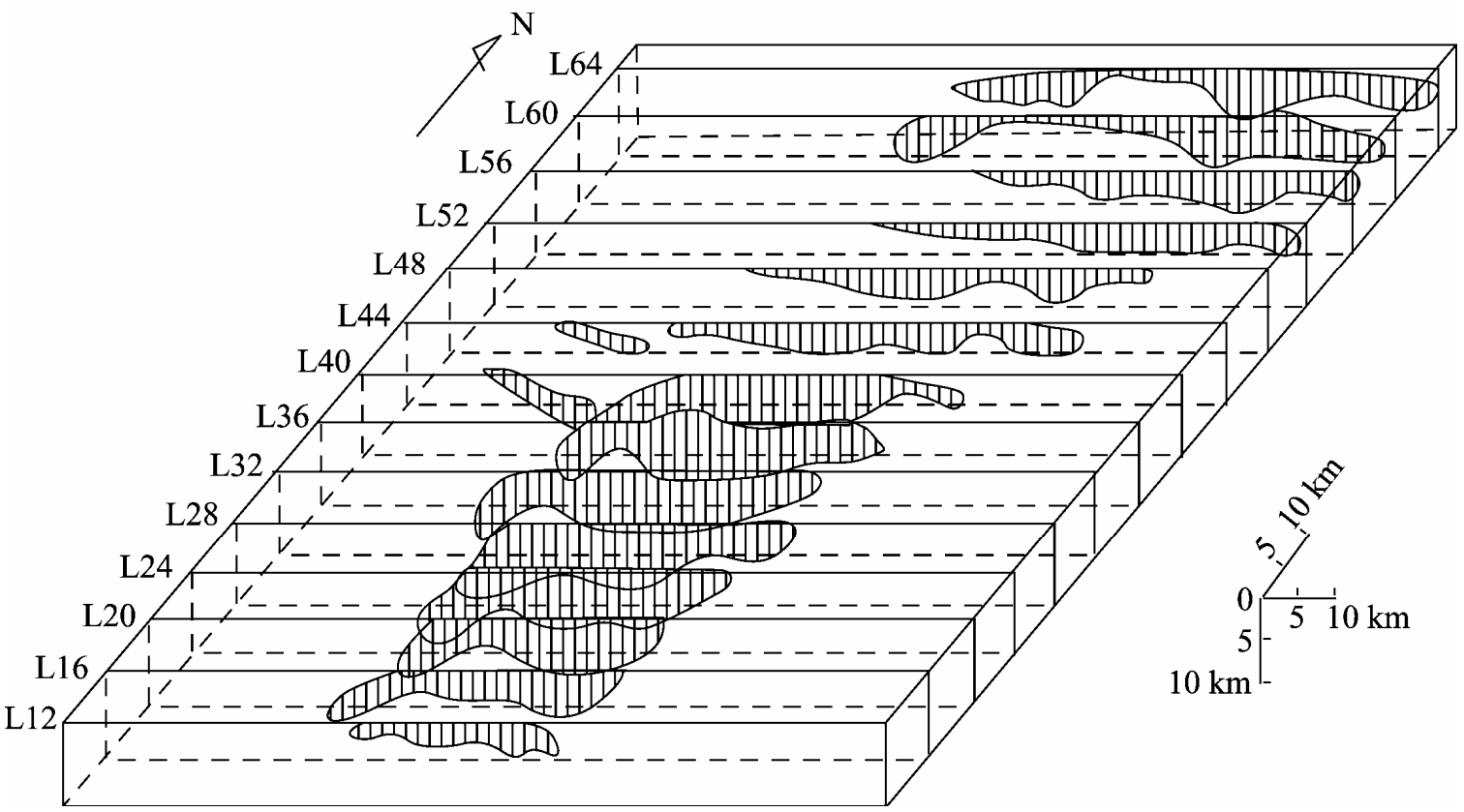


1零值等值线，2正值等值线，3负值等值线，4花岗质杂岩体露头范围

胶东西北部布格重力异常图

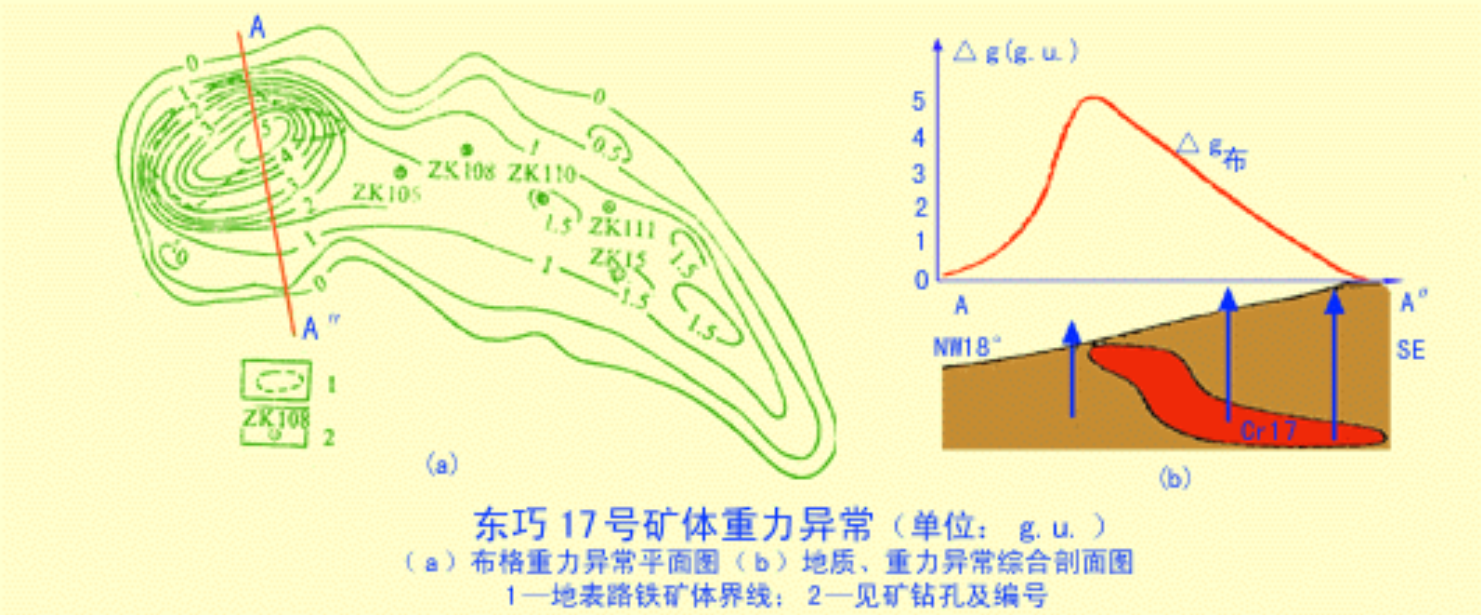


L30方向地质-重力综合剖面



玲珑花岗质杂岩体的三维分布

西藏某铬铁矿

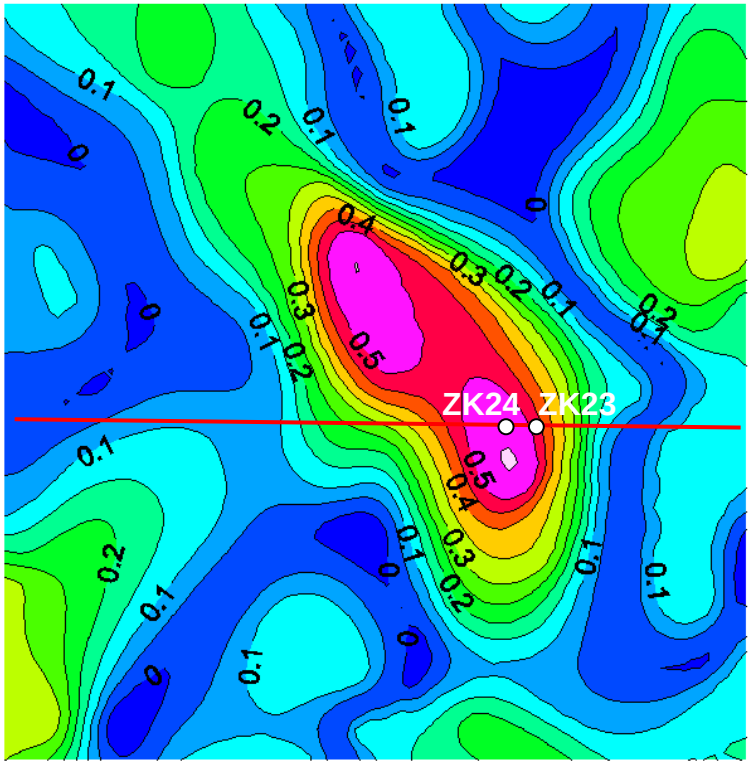


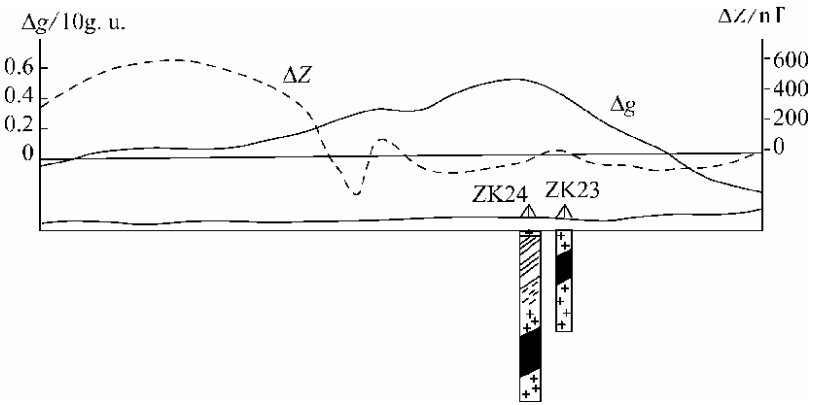
东巧17号矿体重力异常（单位：g.u.）
（a）布格重力异常平面图（b）地质、重力异常综合剖面图
1—地表路铁矿体界线；2—见矿钻孔及编号

- 西藏东23超基性岩体侵入于泥盆系结晶灰岩和板岩中，上覆侏罗系砂岩、砾岩。铬铁矿产于东23岩体内，与围岩界线清楚，密度差达1.5g/cm^3。
- 17号矿体西段已出露地表，重力异常最大值为6g.u.，向东形态变宽展，推断东段埋藏较深。钻探结果4孔连续见矿，矿体地深25-60m，视厚度28-40m。

吉林某含铜硫铁矿

- 吉林省某矿区剩余重力异常图西北部封闭的异常所圈定的范围与已知的铁矿位置一致，并与1000nT的磁异常所圈闭的面积相符。东南部明显封闭的重力异常位于磁异常的零线及100nT之间，表明磁异常对这个重力场源体没有任何反映。





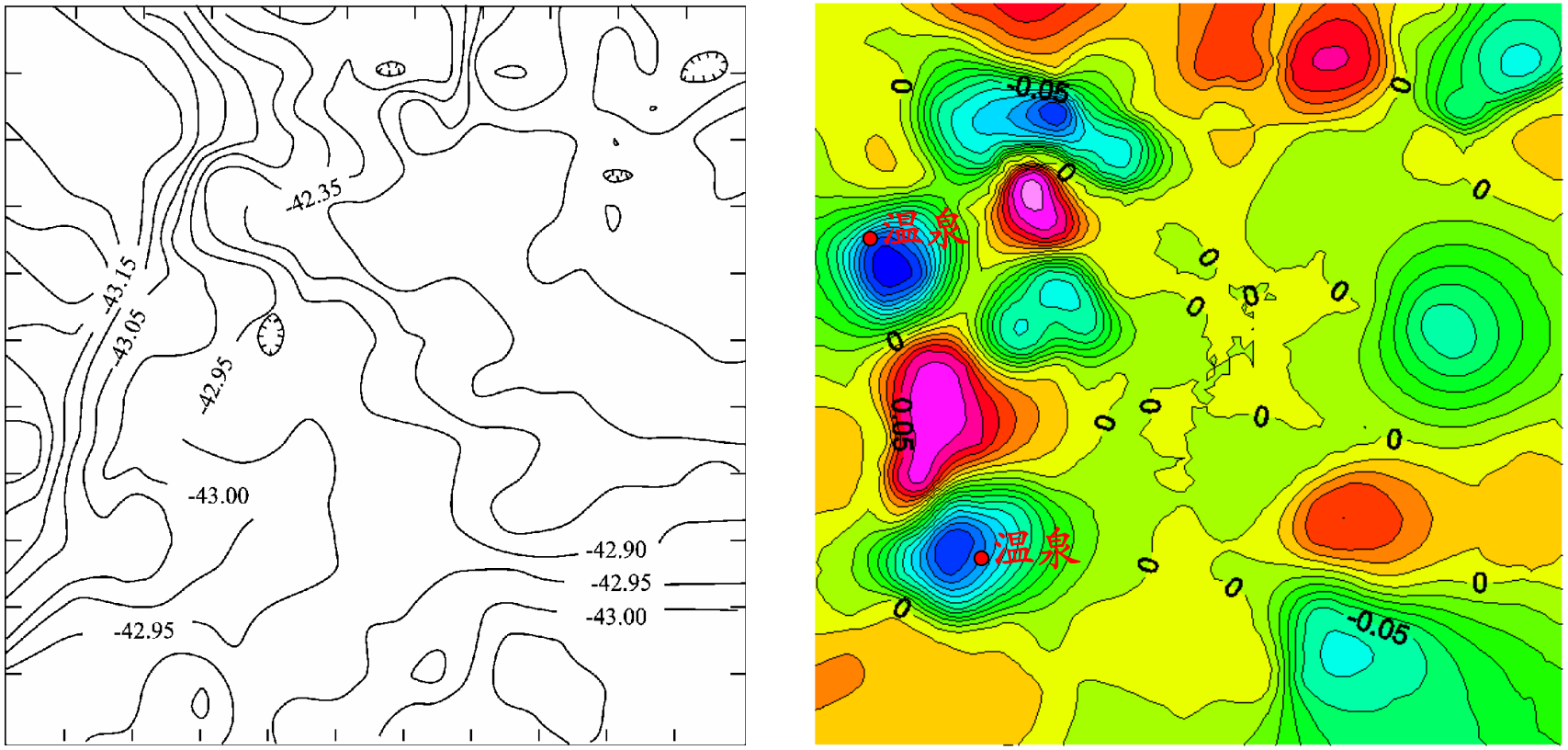
(八) 水文地质调查

- 重力法在地热田勘探中发挥的作用：
  - ✓ 研究控制地热资源的区域构造；
  - ✓ 探测热田位置和可能与热源有关的火成岩体；
  - ✓ 研究热流体动态变化，指导热田的合理开发。





- 地热田重力高：原因是基岩隆起带的地温梯度一般高于相邻的基底凹陷带，在背斜顶部的地温和地温梯度一般也比其两翼高；或由于地热田中的硅化作用，使密度加大。
- 地热田重力低：原因是岩石的热膨胀，使密度降低；或热田区地层孔隙率大，致使密度偏低；或蒸汽型热田，因属于汽相流体，故热田区密度变小。



咸宁温泉地区布格重力异常(左)及其剩余异常(右)

(刘根友，1994)

(九) 工程勘察

- 20世纪90年代以来由于重力仪观测精度的提高，在工程勘察中已经应用了重力测量，主要用于洞穴及溶洞探测。
- 由于洞穴及其低密度充填物与围岩间有相当大的密度差，能够引起可探测的重力异常。因此，高精度重力测量可以发挥作用。

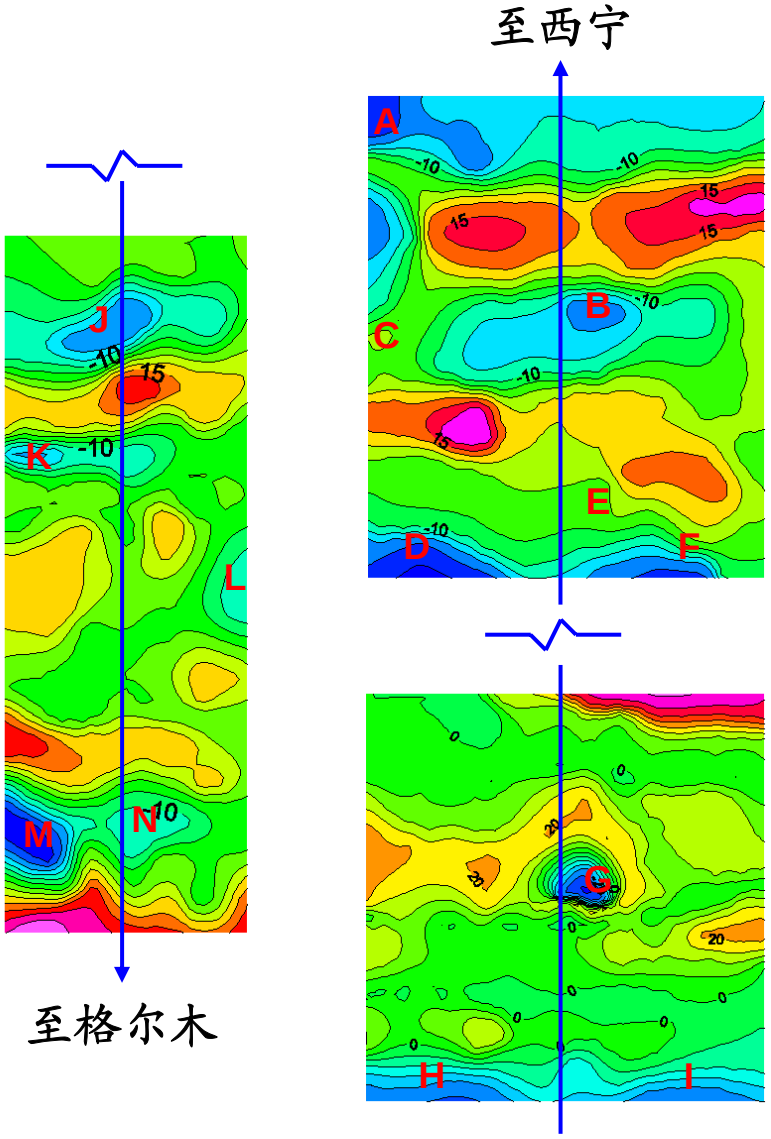








青藏铁路



察尔汗盐湖地区重力异常图

重力勘探工作过程

1. 编写重力勘探技术设计书

   根据承担的地质任务进行现场踏勘及搜集工区内的地质、物探、物性资料编写技术设计

2. 野外施工

   采集重力异常数据及工区内岩矿石的密度参数

3. 室内资料整理

   通过资料整理得到工区内异常的各种图件

4. 重力异常的推断解释和报告编写

小结



- 重力异常的识别
- 断裂构造识别的标志
- 重力资料解释应用

应用重力法的发展趋势

1、重力测量

1) 卫星重力将成为浅海区域勘探的主要手段，并将为地震勘探的布署提供依据。

2) 海洋和陆地的重力数据采集仍然是勘探不可缺少的基本手段，其分辨率将得到进一步提高。

3) 航空重力将成为常规勘探方法，而且将具有高灵敏度、高精度、高分辨率及低成本。

4) 在陆地、海洋和航空重力勘探中，将使用移动平台采集矢量重力数据。

5) 将广泛使用重力梯度测量，特别是用于解决油气藏问题，方法的穿透力将由于灵敏度的提高而增大。联合使用重力测量和重力梯度测量将对于石油工业更为有利。重力梯度测量对于金属及非金属矿藏的勘探更为重要。

6) 井中重力将在油气藏勘探和开发中得到广泛的应用。

7) 绝对重力测量和重力梯度测量将成为地面及移动平台的常规方法，将强烈影响到整个重力勘探方法的发展。

2、资料处理及解释

1) 小波变换将起到与现在的傅里叶方法相同的作用。

2) 等效源法将起到与插值、导数计算及解释相同的作用。

3) 神经网络及遗传算法将渗透到重力数据的处理及解释。

4) 如果根据重力资料对于一个地区的地质情况有了很好的了解,那么均衡校正将会与布格校正一样重要。

5) 在工作站上对地质、重力及地震数据进行综合解释；然而,将只涉及密度界面模型，而不是密度的三维分布。

6) 将会出现利用地质模型的可视的人机交互式解释方法。

7) 应用可视化的图象处理技术将成为常规方法。

8) 应当研究针对复杂地质情况，而非只适合简单模型的反演方法；应当通过地震、重磁及梯度测量的同时反演、继续加强三维解释。