

中国剩余重力异常与金属矿分布关系研究

黄宗理¹⁾, 严加永²⁾

1) 国土资源部咨询研究中心, 北京 100035;

2) 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

摘 要: 剩余重力异常反映地壳浅部岩石密度和厚度的变化, 为成矿背景和找矿预测提供了丰富信息。在分析中国剩余重力异常与金属矿床分布关系的基础上, 划分出兴蒙、华北、中南和新疆天山 4 个条带状剩余重力异常, 发现金属矿床沿着这些异常条带密集分布。在辽吉黑东部、华东、华南、三江地区的剩余重力异常区里, 金属矿床呈面状均匀分布, 铁铜矿产一般分布在正异常周围, 铅锌矿产主要分布在负异常区。结合大地构造资料, 认为条带状重力异常反映的是不同地块的结合部位, 这些地带地块加厚, 深部成矿物质上侵, 断裂发育, 是形成金属矿带状分布的主要原因。而面状重力异常区则反应了地质活动带, 也有利于金属矿床的形成。根据剩余重力异常和金属矿分布规律, 预测在新疆地区的阿尔泰重力异常带和昆仑山异常带, 腾格里沙漠东缘重力高条带、大兴安岭低重力异常区和川滇藏交界条带重力异常转弯处具有较大的找矿前景。

关键词: 剩余重力异常; 金属矿分布; 成矿规律; 深部背景

中图分类号: P631.14; P617 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.06.02

The Relationship between the Residual Gravity Anomaly and the Distribution of Metallic Deposits in China

HUANG Zong-li¹⁾, YAN Jia-yong²⁾

1) Consulting & Research Center, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035;

2) MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: Residual gravity anomaly reflects shallow crustal density and thickness of rocks and hence provides rich information for metallogenic research and exploration forecast. Four zoned gravity residual anomalies, i.e., Xin-Meng, North China, Central south and Tianshan Mountains in Xinjiang, were recognized on the basis of the relationship between the residual gravity anomalies and the distribution of metallic deposits in China. The authors found that metallic deposits are densely distributed along these zoned gravity anomalies. Metallic deposits were evenly distributed in planar form in such gravity anomaly areas as eastern Liaoning, Jilin, Heilongjiang, East China, North China and Sanjiang region. In these areas, iron and copper deposits are commonly distributed around positive gravity anomalies, and lead and zinc deposits are commonly distributed in negative gravity anomalies. In combination with tectonic and other information, the authors consider that zoned gravity anomalies reflect the knots of different terranes. In these zones, terranes become thickened, deep metallogenic materials migrate upward, and faults are well developed, causing the zoned distribution of metallic ore deposits. The planar gravity anomaly zone reflects the geologically active zone, where metallic ore deposits are likely to be formed. According to the residual gravity anomalies and distribution of metallic ore deposits, the authors hold that the Altay region in Xinjiang, the Kunlun Mountains, the eastern edge of Tengger Desert, the Da Hinggan Ling low gravity anomaly area, and Sichuan-Yunnan-Tibet border area have favorable exploration prospects.

本文由国家科技专项“深部矿产资源立体探测技术与试验”(编号: SinoProbe-03)和国家自然科学基金项目(编号: 41104061)联合资助。收稿日期: 2011-09-05; 改回日期: 2011-11-03。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 黄宗理, 男, 1947 年生。高级工程师。现从事地球物理与成矿研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。电话: 010-68999044。E-mail: zhuang5653@hotmail.com。

Key words: residual gravity anomaly; distribution of metallic ore deposits; metallogenic regularity; deep background

找矿勘查学有两个根本的任务: 一是在哪儿找矿? 二是如何更快更经济地找到矿? 就第一个任务而言, 一般可以通过地质理论分析来选择成矿远景区, 但人们一直希望能有更直接的信息用以指导去哪儿找矿, 如早期的通过露头、老硐、地表蚀变找矿, 到上世纪中叶通过磁异常找铁矿, 以及近些年通过化探异常找贵金属和多金属矿等。本文以研究重力异常与金属矿空间分布之间的关系为切入点, 试图能为“去哪儿”找矿多提供一个思路。

中国已经完成了全国范围的中小比例尺重力测量, 公开出版了小比例尺的布格重力异常图, 现在也可以从互联网上下载卫星重力测量资料, 计算出布格重力异常, 该异常已经做过地形改正, 消除了地形的影响。中国的布格重力异常总体表现为西部低东部高的形态, 一般认为这一形态主要反映了我国地壳厚度西部大东部小, 地幔西部深东部浅的变化情况(彭聪, 2005)。为了更多地了解重力异常的细

节, 本文使用布格重力剩余异常图, 即对布格异常进行区域异常改正(Li et al., 1998), 消除背景影响, 只保留剩余重力异常。由于在本文里我们只做定性分析, 故可以近似地认为, 区域改正已经消除了地幔深度变化的影响, 剩余重力异常主要只反映地壳一定深度范围内岩石的密度和厚度变化(曾华霖, 2005), 这可为成矿学研究和找矿预测提供了丰富的信息。

1 剩余重力异常与金属矿床分布关系

将全中国的铁矿(沉积变质型铁矿单列)、铜矿、铅锌矿、金矿, 四种金属矿产的矿床分布位置分别叠加在剩余重力异常图上, 然后再把上述四种矿产同时叠加在一起(图 1), 用以分析主要金属矿产的分布位置与剩余重力异常之间的关系, 发现了一些有意义的现象。

从图 1 可以看出中国金属矿床并不是均匀分布,

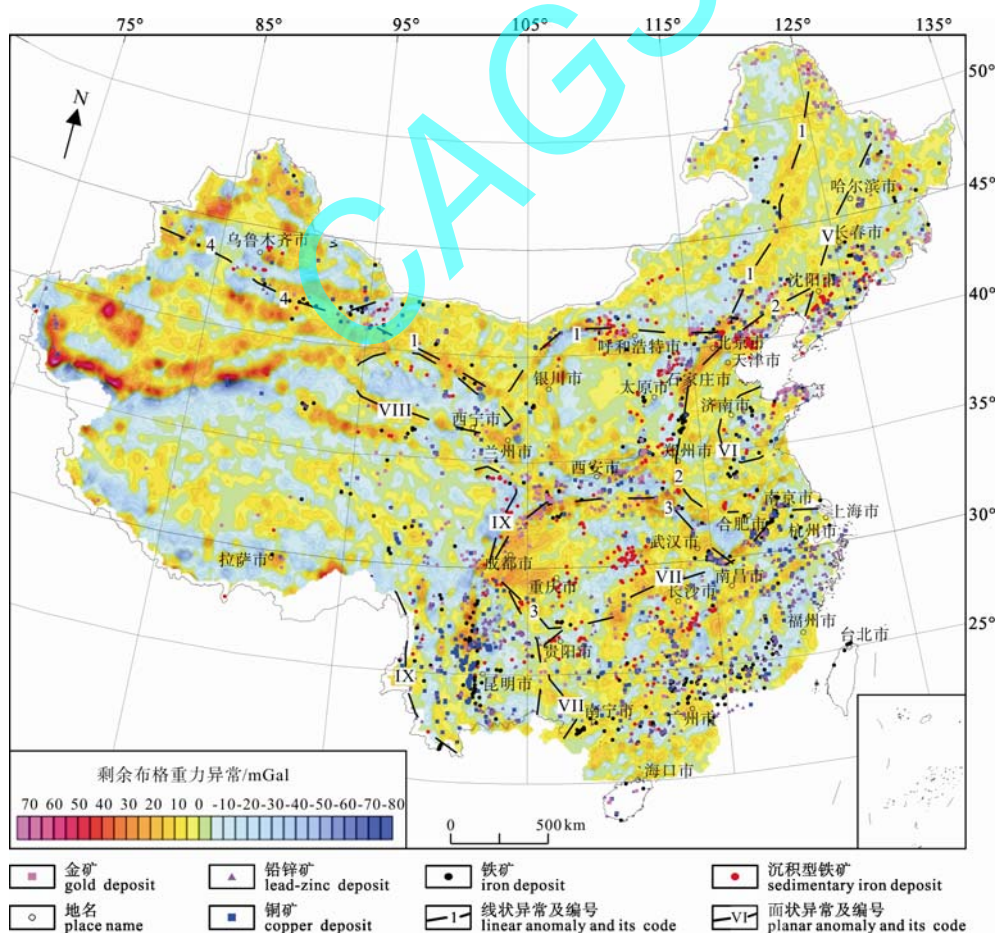


图 1 中国剩余重力异常和金属矿床分布图

Fig. 1 Relationship between residual gravity anomalies and distribution of metallic deposits

而是只在特定的地带和区域产出,金属矿床的空间分布与重力异常的关系,具有明显的规律性。在剩余重力异常平面图上,金属矿床的分布特征可以归纳为两种类型:一种是沿条带状异常分布,一种是沿面状异常分布。

条带状分布类型是指以明显的条带状重力高,以及与之相伴生的条带状重力低为标志,矿床基本沿该条带分布。面状分布类型则是以条带状重力异常为边界,所包围的一个区域。在该区域内,矿床大体均匀分布。中国的多数地区金属矿床都是沿条带状分布的,面状分布主要在辽吉黑东部,山东和华南等部分地区。图1中各异常编号对应的特征及其金属矿分布关系叙述如下:

条带状分布类型,图1中编号1至4:

编号1:兴蒙地区条带状异常。北起黑龙江的塔河,大体沿大兴安岭走向方向向南,至河北承德,沿华北地台北缘向西,至内蒙巴彦淖尔盟乌拉特后旗,折向西南,至甘肃平凉,转向北西,至嘉峪关一带止。沿该条带分布着众多的金属矿床和大型矿集区,如黑龙江的多宝山铜矿,内蒙的白音诺浩布高铅锌矿,河北的蔡家营铅锌矿,内蒙的霍各乞铜矿,甘肃金川铜镍矿等。

大兴安岭地区异常带较宽,矿床在正负异常带里都有,矿产分布具有明显的分带性,一般在正异常带内是铁铜矿,负异常带内是铅锌矿。在条带重力异常的断开处,常会有大型矿床,如黑龙江的多宝山,就位于这个条带北端的第一个断开处。在条带重力异常明显的转弯部位,常常会有大量矿床成群出现,形成大型矿集区。如内蒙突泉一带有莲花山、布敦花矿区,赤峰附近有林西矿集区,巴彦淖尔盟有东升庙、炭窑口等矿床。

从该重力异常条带起到我国北部边境,在这个条带圈定的区域内,主要在内蒙古的中部,有大片东西伸展的面状的重力正异常,异常的强度一般不大,目前在这些正异常里基本没有发现金属矿产。可能的原因是这些正异常主要反映了一些老地块的碎片。但这些正异常附近的负异常里却常常有矿,需要特别关注,如最近在中蒙边境苏尼特左旗发现的乌兰得勒铜钼矿就是位于这样的负异常区。在这个条带的东北端有大片负异常,地理位置是大兴安岭地区,也应当是成矿有利地区。

编号2:华北地区条带状异常。北起沈阳,向西南至北京,向南经石家庄至郑州,折向东南至合肥止。在异常带上密集分布着沉积型铁矿,北段和中段常有金矿和铁矿共同分布。异常西侧伴有一宽阔

负异常,铜矿和铅锌矿多分布在紧靠正异常的负异常内。该条带的北段,从沈阳到承德(还可继续西延,沿华北地块北缘),有一条带状正异常,被南北两条负异常带所包围,这种两负(异常)夹一正(异常)的现象,可能是不同地块接触带在重力异常上的反映。而这种“两负夹一正”的条带里,常常也是金属矿产的密集分布区,如在这个条带里就有蔡家营、青羊沟、营房、高板河等一系列铅锌铜矿。

编号3:中南地区条带状异常。东起九江,向北西经武汉至南阳,折向正西,至汉中、广元、平武,向西南经成都至康定折向南东,其南界不太清楚,大体可经贵阳、长沙至九江止。在该条带的东段、北段和西段,都有大量铁铜铅锌矿床分布,条带北段还分布众多的金矿。和兴蒙条带状异常类似,沿中南地区条带异常的几个转弯处,也是金属矿床密集分布的地方。自东往西,有九江-瑞昌矿集区,三门峡地区的金堆城钼矿,陕甘接壤地区的西和、成县铅锌矿矿集区,都是目前我国铜矿、钼矿和铅锌矿著名的矿区。该带环绕的地块内部,内生金属矿床不太多,现发现的基本是一些沉积型铁矿和少量铅锌矿。

编号4:新疆地区天山异常带。东起北山地区,向西沿天山,经托克逊至西部边界止。沿该带近年发现了土屋、延东等一系列铁铜矿床。该条带在重力异常上表现为中间一条重力正异常,两侧分别是重力低的负异常。在前述编号2的华北条带里,我们描述了两块地体结合部的“两负(异常)夹一正(异常)”现象,这种现象在新疆表现更明显。在新疆准格尔地块以北的阿尔泰地区,在塔里木地块和准格尔地块之间沿天山地区,以及塔里木地块和西藏之间,沿着昆仑山地区,都存在这种“两负夹一正”的条带状异常(与华北北缘不同的是这里的负异常要宽得多),自北向南分别命名为阿尔泰异常带,天山异常带和昆仑山异常带。在该条带正异常和两侧的负异常里,都是成矿的有利地段。近来在阿尔泰异常带中已有阿舍勒铜矿等不少新发现,预测昆仑山异常带也有较大的找矿前景,只是地形条件不好。

面状分布类型,图1中编号V至IX:

编号V:辽吉黑东部异常区。北起鹤岗市,向南西45°方向,至锦州一带止,笔直地分布有一条宽度不大但重力异常明显的条带重力高,(东侧伴有重力低)与编号2的华北条带状异常相连。该条带东西两侧矿床的空间分布特点完全不同,自该条带向东至中朝边境的东部地区,铁铜铅锌金矿在整个区域密集分布。而由条带向西至大兴安岭的西部地区,

则基本没有金属矿产。在东区里, 沉积型铁矿和金矿多产在正异常里, 与岩浆热液有关的铜铅锌矿多分布在正负异常交汇部位和负异常的周边。

编号 VI: 山东异常区, 与山东省的行政区划大体相当。从图 1 可看出山东异常区的金属矿产分布与其周围完全不同, 山东异常区周围基本没有什么金属矿产, 而山东异常区内部却是金属矿密布。在重力异常图上, 山东异常区表现为一连串的重力高围成为一个三角形, 三角形的顶点在济宁和濮阳之间, 顶点内有两个圆形的负异常区, 分布有铁铜铅锌矿, 三角形北面的一条边通过济南到威海, 边内的负异常带里, 即是著名的莱州、招远金矿带, 分布着巨量的金矿以及铜铅锌矿, 另一条边通过徐州、淮北到淮阴, 也有一些铁铜矿分布。

编号 VII: 华东和华南异常区。北部以长江下游的条带重力高为界, 条带重力高北起扬州, 沿长江经九江折向南西方向, 过南昌、韶关、梧州至南宁, 南界至边境。从北部的条带重力高至南部边界所圈定的范围里, 金属矿床呈面状密集分布。

如果仔细区分, 还可进一步以南昌、南平、福州断续分布的重力高为界, 将上述区域划分为东部的华东区和西部的华南区。华东区重力异常表现为两高和两低(吴其反等, 2004), 北面的沿长江重力高, 中间的沿上海、杭州、鹰潭重力高, 两条带状重力高之间是两个大范围分布的重力低。矿产在华东区的分布有明显规律, 即沿北重力高带, 分布铁铜矿, 中间的负异常区主要是铜矿和铅锌矿, 南面的负异常区主要是铅锌矿, 在景德镇附近重力高的转弯部位, 产有一系列铜矿、金矿和铅锌矿, 包括德兴的铜厂、富家坞两个超大型铜矿床。华南区矿产的分布不具有华东这样明显的分带性规律, 另一个区别是, 华南区在面上有大量铁矿, 包括沉积型铁矿, 华东区面上则基本没有。和其他地区类似, 铁矿主要分布在正异常区, 铜矿和铅锌矿主要分布在负异常区。

编号 VIII: 柴达木异常区。以柴达木的大型负异常为中心, 周围的重力高大体围成一个三角形, 顶点在兰州附近, 北面的一条边沿河西走廊, 南面的边沿东昆仑。在三角形的两条正异常的边上分布着不少铁矿, 顶点附近的负异常区里则分布着铜矿。

编号 IX: 西藏和云南异常区。相对该地区巨大的面积, 目前找到的矿还不太多, 主要集中在三江地区。沿三江南北走向分布着两条重力高和两侧的面状负异常。在两条重力高之间, 以铁铜矿为主, 沿重力高向东, 铅锌矿明显增多, 再向东有一片面状正异常, 则是滇黔贵三角区, 那里分布着大量金矿。

三江地区的矿产基本是沿着重力异常的走向分布, 铁矿主要分布在正异常区里, 相邻的负异常区里主要是铜矿和铅锌矿。西藏玉龙超大型铜矿就产在由正异常包围的负异常里。金顶铅锌矿则产在正异常断开部位的负异常里。三江地区类似的异常还很多。

从整个青藏看, 剩余重力场表现为三个条带状负异常和两个面状重力高, 自北向南依次为昆仑山负异常带, 羌塘正异常区, 斑公湖怒江负异常带, 拉萨正异常区, 雅鲁藏布江负异常带。三条负异常带在西藏地区走向为北西, 在川、滇、藏三省交界附近(东构造节)折向正南, 在三江地区合并在一起并继续向南延伸出国境(管烨等, 2004)。目前在三江地区已找到很多矿产, 从重力异常分析, 这三条负异常带在西藏的部分同样也应是找矿的有利地区, 按照兴蒙、中南几个条带异常的找矿规律, 在青藏三条重力条带异常的转弯部位, 有可能形成大型矿集区, 目前在这里已经发现了玉龙超大型铜矿。因此川、滇、藏三省交界地区有可能找到更多的大型矿床。

2 剩余重力异常反映的金属矿床形成背景及找矿预测

为了研究剩余重力异常和地质构造之间的关系, 我们给出任纪舜等(1999)编制的中国大地构造略图(图 2)。对比图 1 和图 2 可以发现, 上述的条带状重力异常带与大地构造图中相应地区的的板块缝合带、地壳拼接带、断裂带、地质单元界线一一对应, 而面状异常区则分别和相应的地质活动带完全对应。这种对应说明了: 第一, 布格重力剩余异常清晰地反映了岩石圈内的大地构造情况。第二, 金属矿产的分布相当严格地受大地构造的控制。应当指出以上划分只是对矿床空间位置与重力异常分布关系的客观描述, 没有涉及矿床以及地质单元的时代、名称、分类等问题, 同一个编号的异常条带可能跨越好几个地质单元界限。条带的划分和编号主要是为了叙述和使用的方便, 以及同一编号内部重力异常和金属矿空间分布的类似性。

对于编号 1、2、3、4 的条带状重力异常, 金属矿床基本都分布在一不宽的条带里(除大兴安岭以外, 大多都分布在 100~200 km 范围内)。从更大比例尺的重力异常图, 以及其他地质和物探图件上可以看出, 这些异常带被一系列的沿异常走向和与异常斜交的断裂所分割, 这些断裂在剩余重力异常图上常常表现为等值线的弯曲或断开, 这些位置常常就是矿床赋存的具体位置。

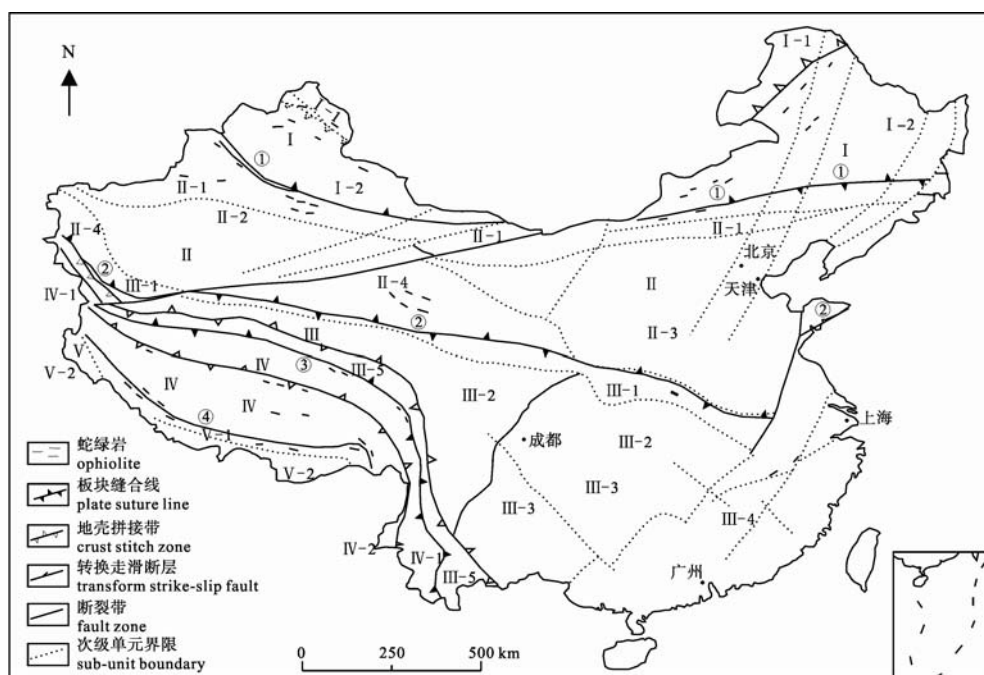


图2 中国大地构造简图(据任纪舜等, 1999)

Fig. 2 Sketch tectonic map of China (after REN Ji-shun et al., 1999)

由于带状异常的转折部位常常是不同构造的交汇点(姜文亮等, 2011), 因此常常也是大型矿集区的赋存位置, 如前述的乌拉特后旗、赤峰地区等。

条带状重力异常都分布在地块的边缘, 为进一步了解异常的性质, 我们构建一个厚板状模型模拟地块的重力响应。厚板模型的理论重力场强解析和原理如式 1 和图 3 所示。

$$\Delta g = k\rho \left\{ x \ln \frac{x^2 + \zeta_2^2}{x^2 + \zeta_1^2} + 2 \left[\zeta_2 \left(\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{x}{\zeta_2} \right) - \zeta_1 \left(\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{x}{\zeta_1} \right) \right] \right\} \quad (\text{式 } 1)$$

在板的中心部位重力场强达到极大值, 等于 $2\pi k(\zeta_2 - \zeta_1)\rho$, 在板的边缘部位, 重力场强是中心部位的一半 $\pi k(\zeta_2 - \zeta_1)\rho$ 。但实际地块边缘的重力异常值高于地块内部的重力值, 理论模型结果和实测地块上的重力场相反。可能的解释是, 不同地块在拼合过程中, 地块边缘部位加厚和深部高密度物质上侵, 这两种因素变化形成了地块边缘的条带状重力高。

深部物质的上侵提供了成矿的物质来源, 地块边缘密集分布的断裂网络则为成矿提供了通道和赋矿空间, 这可能是地块边缘密集产生金属矿的原因之一。在张旗等(2008)的新著“挑战与机遇”一书中, 作者研究了中国东部埃达克岩的分布(图 4), 他给出

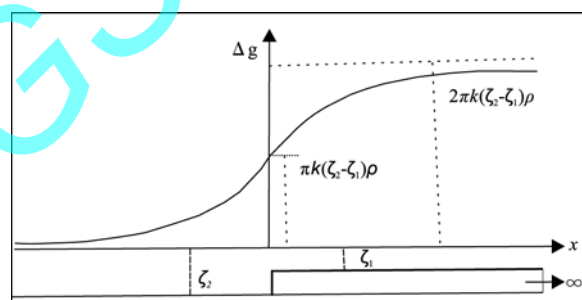


图3 厚板状模型体及其重力异常

Fig. 3 Thickness tablet model and its gravity anomaly

的埃达克岩的分布范围与本文划出的华北异常条带区完全一致。鉴于埃达克岩形成的温度和压力条件, 张旗认为中国东部出现埃达克岩的地方地块加厚, 这和我们认为重力条带异常可能是因为深部物质上侵, 地块边缘厚度和密度加大的解释相一致。

新疆的条带状异常表现为“两负夹一正”, 与上述厚板模型不一致, 反映的是另外一种地质类型(可能是岛弧)。但条带重力高仍表示该条带上岩石厚度和密度的增加, 预示着这些地区存在地幔物质的活动。这些条带重力高仍可以作为指示找矿的重要信息。

在有些条带异常包围的区域里面, 有较大范围的面状负异常存在。如在中南条带异常区的秦岭以南以及华东面状异常区内都有。沿着这些负异常的

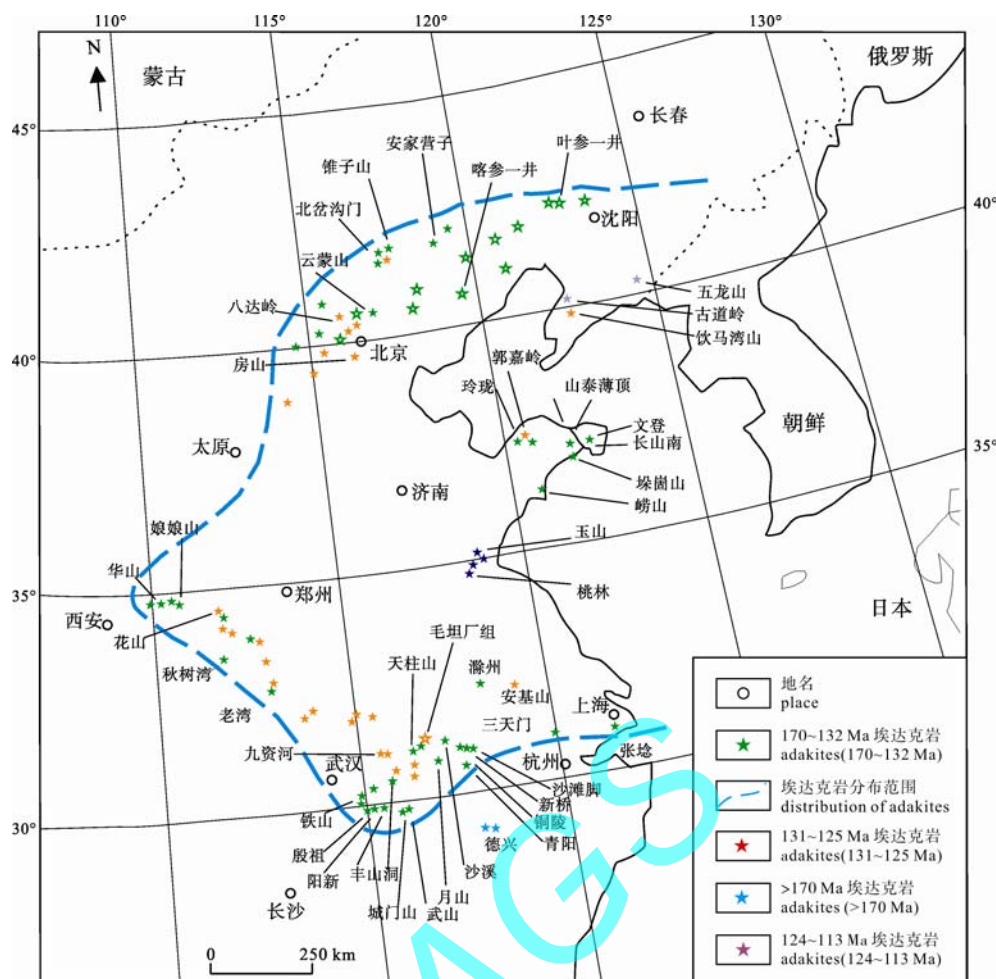


图4 中国东部埃达克岩分布图(据张旗等, 2008)(实心五角星表示侵入岩, 空心五角星表示火山岩)

Fig. 4 Temporal and spatial distribution of adakites in East China (after ZHANG Qi et al., 2008)

(solid pentagon means intrusive, hollow pentagon means lava)

周边, 正负异常交界处, 尤其是异常的不规则转弯处, 常常有铜和铅锌矿床分布, 如江西德兴超大型铜矿就在这样的转弯处。这些负异常都位于地块边缘重力高的内部, 可能是由碰撞后的拉张形成的盆地、断裂等, 相应地区的地壳密度降低, 在剩余异常图上表现为负异常。

另一个值得重视的异常形状是三角形或弧形区。在编号1兴蒙条带异常西段的腾格里沙漠地区, 沙漠外面被两条重力高包围。沙漠西南面一条边上已经发现一系列矿床, 包括著名的金昌铜镍矿。另一条边沿贺兰山分布, 发现的矿还不多, 按照条带重力高与金属矿分布关系规律, 在这条边上的重力高的断开处, 或重力异常的转弯处应是成矿有利地区。

3 剩余重力场与金属矿床分布规律反映出的大地构造现象

上述的条带状和面状两类重力异常区带, 分别对应着不同地质块体的结合部和不同的地质活动

带。我们可以从地质块体的结合部或活动带出发去找寻矿藏, 反之, 也可以从重力异常与已发现矿床的分布规律, 尝试探讨大地构造的一些问题。

华北地区条带状异常和辽吉黑东部, 山东两个面状异常区的矿床分布形态, 在重力异常图上, 似乎隐含着一种弧形构造现象, 外弧为前述编号2的华北异常条带, 北起沈阳, 南经郑州至合肥。内弧为编号6的山东异常区带。内弧与外弧之间则是盛产煤炭和石油的沉积盆地。外弧的西部, 由四条重力高包围的鄂尔多斯, 应当是另一个拼接过来的块体。这样华北陆块似乎可以分为三部分, 东部的山东活动带, 中部的弧形沉积区, 西部的具有明显增厚岩石圈的鄂尔多斯。深部地球物理探测宽频地震所提供的地壳厚度资料(朱介寿等, 2006), 也支持华北地块多分的观点。在图4中, 现已发现的埃达克岩都分布在我们提出的华北异常条带和山东面状异常地区两个地方, 而且埃达克岩的年代自西向东逐渐变新, 也值得进一步研究。

4 结论

1)划出了兴蒙、华北、中南和新疆天山四个重力异常条带,金属矿床沿着这些不宽的重力异常条带密集分布;这些重力异常带的断开或弯曲反映了带内的次一级断裂和断裂交汇,常常是矿床的产出部位;异常带明显的转折部位及附近的区域,常有大量矿床集中分布,形成大型矿集区;在这些正异常带圈定的区域内部,金属矿床大多产在负异常中以及负异常周边的转弯部位。

2)在辽吉黑东部、华东、华南、三江地区重力异常区里,金属矿床呈面状分布。多数情况是铁铜矿产分布在正异常周围,铅锌矿产主要在负异常区。在正负异常的过渡区或负异常的转弯部位常是成矿有利部位。正负异常和地面的岩性并无严格的对应关系,可能是反映了深部的物质和结构。

3)重力剩余异常反映岩石圈的结构变化。本文所述的条带状重力异常,反映的是不同地块的结合部位。重力异常显示,这些地带的地块加厚,深部物质上侵,断裂发育。面状重力异常区,则反应的是地质活动带。这两种不同的重力异常上,矿床的空间分布也是不同的。重力剩余异常可以作为指导找矿的重要信息。当然,只根据小比例尺重力异常找矿是不够的,还必须开展相应的地质、化探和必要的中大比例尺物探工作。但分析剩余重力异常确定远景区,可以帮助大大减小工作的范围,重力和化探的结合可以更有利于快速找到矿(我们已经发现在重力异常不利的地区,虽然化探异常很好,仍然找不到矿的例子)。

4)按照本文所述的重力异常规律,新疆地区的阿尔泰重力异常带和昆仑山异常带,腾格里沙漠东缘重力高条带,大兴安岭地区的重力低地区,川、滇、藏三省交会地区重力异常转弯处(东构造节周围)应是成矿有利地带,宜加强地质找矿工作。

致谢:感谢董树文、吕庆田、熊盛清、高锐、姚长利对本文写作的支持和帮助。

参考文献:

- 管桦,王安建,曹殿华,秦德厚. 2004. 云南三江造山带近东西向构造特征及其研究意义[J]. 地质学报, 78(4): 494-499.
- 姜文亮,张景发,陈丁,路晓翠,张鹏,李丽梅. 2011. 利用遥感、重力多源信息研究郯-庐断裂带苏-鲁段构造特征[J]. 地球学报, 32(2): 143-153.
- 彭聪. 2005. 中国西部布格重力异常特征和地壳密度结构[J]. 地球学报, 26(5): 417-422.

- 任纪舜,王作勋,陈炳蔚,姜春发,牛宝贵,李锦轶,谢广连,和政军,刘志刚. 1999. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明[M]. 北京:地质出版社.
- 吴其反,路凤香,王懋基,程建平,刘桂林. 2004. 中国东部新编重磁异常图及构造解释研究[J]. 地球学报, 25(1): 83-88.
- 曾华霖. 2005. 重力场与重力勘探[M]. 北京:中国地质出版社: 100-107.
- 张旗,王焰,熊小林,李承东. 2008. 埃达克岩:挑战和机遇[M]. 北京:中国大地出版社.
- 朱介寿,蔡学林,曹家敏,严忠琼. 2006. 中国及相邻区域岩石圈结构及动力学意义[J]. 中国地质, 33(4): 793-803.

References:

- GUAN Ye, WANG An-jian, CAO Dian-hua, QIN De-hou. 2004. East-West Structures in the Sanjiang Region, Western Yunnan and Their Implications[J]. Acta Geologica Sinica, 78(4): 494-499(in Chinese with English abstract).
- JIANG Wen-liang, ZHANG Jing-fa, CHEN Ding, LU Xiao-cui, ZHANG Peng, LI Li-mei. 2011. Tectonic Characteristics of Su-Lu Segment of the Tan-Lu Fault Zone Derived from RS and Gravity Multi-source Information[J]. Acta Geoscientica Sinica, 32(2): 143-153(in Chinese with English abstract).
- PENG Cong. 2005. Bouguer Anomalies and Crustal Density Structure in Western China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 26(5): 417-422(in Chinese with English abstract).
- REN Ji-shun, WANG Zuo-xun, CHEN Bing-wei, JIANG Chun-fa, NIU Bao-gui, LI Jin-yi, XIE Guang-lian, HE Zheng-jun, LIU Zhi-gang. 1999. The Tectonics of China From a Global View-A Guide to the Tectonic Map of China and Adjacent Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WU Qi-fan, LU Feng-xiang, WANG Mao-ji, CHENG Jian-ping, LIU Gui-lin. 2004. The New Magnetic and Gravity Maps of Eastern China and Their Interpretation[J]. Acta Geoscientica Sinica, 25(1): 83-88(in Chinese with English abstract).
- LI Yao-guo, OLDENBURG D W. 1998. Separation of regional and residual magnetic field data[J]. Geophysics, 63(2): 431-439.
- ZENG Hua-ling. 2005. Gravity field and gravity exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House: 100-107(in Chinese).
- ZHANG Qi, WANG Yan, XIONG Xiao-ling, LI Cheng-dong. 2008. Adakites: Challenges and Opportunities[M]. Beijing: China Land Press(in Chinese).
- ZHU Jie-shou, CAI Xue-lin, CAO Jia-min, YAN Zhong-qiong. 2006. Lithospheric structure and geodynamics in China and its adjacent areas[J]. Geology in China, 33(4): 793-803(in Chinese with English abstract).