基于重磁多尺度边缘检测的长江中下游成矿带构造格架研究

严加永,吕庆田,孟贵祥,赵金花,邓震,刘彦

中国地质科学院矿床资源研究所,国土资源部成矿作用和资源评价重点实验室,北京,100037

内容提要:采用重磁多尺度边缘检测方法,对长江中下游成矿带区域重力和航磁数据进行了边缘检测,结合大地电磁剖面和地质资料,建立了长江中下游地区构造格架。根据重磁多尺度边缘检测结果,重新厘定了断裂系统的展布位置,确定了宁芜、庐枞等火山岩盆地的准确边界,划分了板块、火山岩盆地等横向结构的边界。认为长江深断裂沿安庆—铜陵北—芜湖—马鞍山—南京一线连续分布,在南京附近走向转换为近东西向,到镇江后一直往东延续至南通,进一步向东延续进入东海;长江南侧未见与郯庐断裂带连接的密度或磁性线状边界,认为郯庐断裂带穿过长江的可能性较小。在此基础上,分析了长江中下游成矿带主要矿集区与构造格架的关系,认为长江深断裂是地幔上涌引起的裂谷型断裂,来自下地壳或地幔的深部矿源物质通过深断裂向上运移,在合适的位置形成目前所见的金属矿集区。大别-舟山断裂将长江深断裂在铜陵一带错断,形成深大断裂的交汇,对铜陵、庐枞、宁芜矿集区的形成有重要贡献。

关键词:重磁;多尺度边缘检测;长江中下游成矿带;构造格架

构造格架泛指板块边界、地质体边界、断裂系统等构造现象,本文所研究的构造格架主要指区分地质体横向分块的各类断裂系统和地质体边界。深大断裂往往是岩浆上侵的通道,并控制了火山活动与岩浆侵位,与深大断裂相伴的浅部断裂、破碎带则是内生矿床的导矿通道,同时也为金属矿的富集提供容矿空间(裴荣富,1999)。建立成矿区带的构造格架,对成矿学研究和指导找矿都具有重要意义。基于此,本研究以长江中下游成矿带为例,采用重磁多尺度边缘检测方法,尝试从位场角度建立长江中下游构造格架,并探讨其与矿集区形成深部背景的关系。

1 构造格架研究方法

地球物理学是研究构造格架的主要手段,根据断裂构造、地质体边界的物理属性,可以转换为对应的地球物理场边界区分提取问题进行分析研究。用于构造格架研究的地球物理方法有:重磁、天然地震、大地电磁等,20世纪90年代以来,刘光鼎等(1997,1998)在详细分析和研究了中国大陆的重力、航磁、地震层析成像等地球物理场特征的基础上,对中国大陆大地构造基本格局进行了系统的论述,提出了中国大陆的多块体、多梯级带的现象可以用"东西成带,南北分块"来描述,并据此分析了中国大地构造宏观格架与油气资源及固体矿产资源的关系。

由于区域重力、航磁资料数据采集成本较其他方法低,且覆盖面积广,使其成为区域构造格架研究的主要方法。最初主要根据重磁场的基本形态进行解译,如借助一些主要标志判断断裂构造(孙文珂,1999;涂广红,2006)。随着理论方法和计算机性能发展,逐渐发展出若干半定量或定量的解释方法,这些方法的主要目的就是从重磁异常图像中提取场源边界(张季生,2006)。通常的做法是对重磁异常中的场源边界信息进行增强,然后利用某种边缘检测的手段确定边界位置。国内外已经提出了很多位场数据边界增强、检测的方法,应用较为广泛的是总水平梯度法,Cordell等人早在1979年就证明用重力异常总水平梯度幅值的峰值能够刻画近似垂直的边界或密度接触带。在此基础上,又衍生出许多新的

注:本文为国家自然科学基金重点基金项目(编号 40930418)和国家科技专项"深部矿产资源立体探测技术与试验"(编号 SinoProbe-03)资助的成果。

收稿日期:2010-11-12;改回日期:2011-03-15;责任编辑:郝梓国。

作者简介:严加永,男,1977年生。博士,助理研究员。地球探测与信息技术专业。Email:yanjy@163.com。

DOI:CNKI:11 1951/P.20110512.0910.011 网络出版时间:2011-5-12 9:10

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1951.P.20110512.0910.011.html

万方数据

算法，Miller 等(1994)提出了对垂向一阶导数归一化后的 Tilt Angle 方法，国内称之为斜导数，2004 年 Verduzco 等人(Verduzco et al.，2004)对斜导数再计算一次水平导数，用 Total Horizontal Derivative 来表示，2005 年 Wijns 等人(2005)提出的边界探测算子是把水平梯度用解析信号的振幅来做归一化，用它做出等值线图来判断场源边界，这种方法简称 Theta 法(刘金兰，2007)。

重磁多尺度边缘检测是从图像分形学和澳大利亚联邦科学与工业研究组织有关部门研究的基础上发展起来的，在澳大利亚“玻璃地球”项目中发挥了重大作用。Hornby 等(1999)等首先提出了多尺度边缘检测的观念，由于检测结果形状类似蠕虫，该方法又被称为 WORMS 法，随后，Archibald (1999)，Horowitz (2000)，Holden (2000)和 Austin(2008)等人相继对其理论和应用进行了研究。WORMS 法的基本原理是：由一系列上延到不同高度重磁数据的水平导数极大值点组成的，处理过程约束了位场梯度的位置和强度，其结果可以解释为地质构造的三维分布格局。按不同的延拓高度，可以将检测点按一定逻辑规则连接形成线，称之为 WORMS 线或者线束，随着延拓高度的上升，WORMS 线反映的边界位置从精细向粗糙渐变(Archibald 1999)。WORMS 线束反映了具有密度差和磁性差异地质体的边界，如断裂构造和各类接触面。WORMS 点数据包含位场数据梯度极大值的位置(x、y、z)和梯度的振幅(或强度)，低上延高度对应了梯度的高频(短波)部分，是浅源信息的反应，相反，大上延高度则对应位场梯度的低频(长波长)部分，是地壳深部信息的反应(Murphy，2005)。

重磁多尺度边缘检测的流程如图 1 所示，该方法一般以布格重力异常和化极磁异常为初始输入数据，如有其它特定需要，还可以对剩余重力异常或化极磁异常的垂向导数进行处理。延拓高度视研究区大小进行设置，最高的延拓高度采用对初始数据进行不同高度的上延，当增加上延高度，异常形态不变或变化程度很小时的高度设置为最大延拓高度，最小延拓高度根据研究目的设置，延拓高度采用对数间隔使其均匀分布。水平梯度在频率域中进行，极大值的检测可以选用 Blackly 规则或者 Canny 规则，基本原理是对每个点周围的点进行对比，如果其比周围每个点都大，则保留该点，通过滑动窗口的方法依次检测每个点，通过检测标准保留下来，然后利用逻辑拓扑关系(如相邻点最小距离，组成一条线所需最少点数等)，将这些点连接形成线，从而完成重磁数据的多尺度边缘检测。

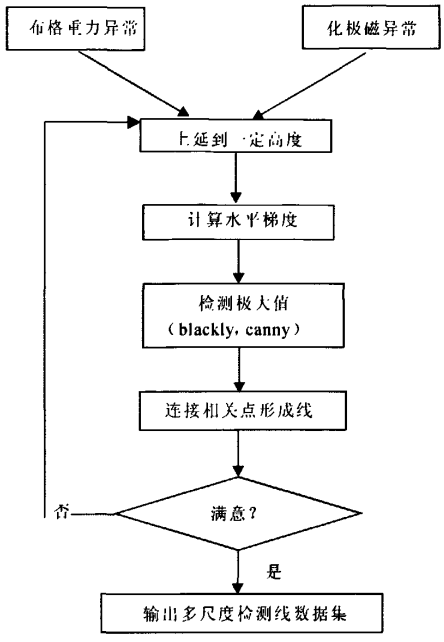


图 1　多尺度边缘检测流程

Fig. 1　Flow map of WORMS

严加永(2010)通过建立正演模型，对比了斜导数法、斜导数水平梯度法、Theta 图法、多尺度边缘检测法的检测效果，边缘检测效果优劣排序为：WORMS 法、斜导数水平梯度法、Theta 法、斜导数法。WORMS 法对模型边界识别最为准确，虚假边界少，因此，本文决定采用 WORMS 法研究长江中下游成矿带构造格架。

2　长江中下游多尺度边缘检测

对长江中下游成矿带研究区内的区域重力、航磁数据进行了多尺度边缘检测。区域重力数据为 1∶20 万布格重力数据；航磁数据的比例尺为 1∶20 万●，由于研究区域范围较大，用同一地磁三参数化极将会产生偏差，因此，本文采用滑动窗口化极法(VaryRTP)，获得了精度较高的航磁化极异常，将其作为磁异常多尺度边缘检测的基本数据。

上延高度的确定：重力异常上延 40km 后，异常形态变化已经不大，故最高的上延高度设置为 55km。最小上延高度取 1km，从 1km 到 55km 共设置 15 个不同的上延高度，上延后水平导数结果如图 2 所示，每张图的上面标注出了相应的延拓高度，如

万方数据

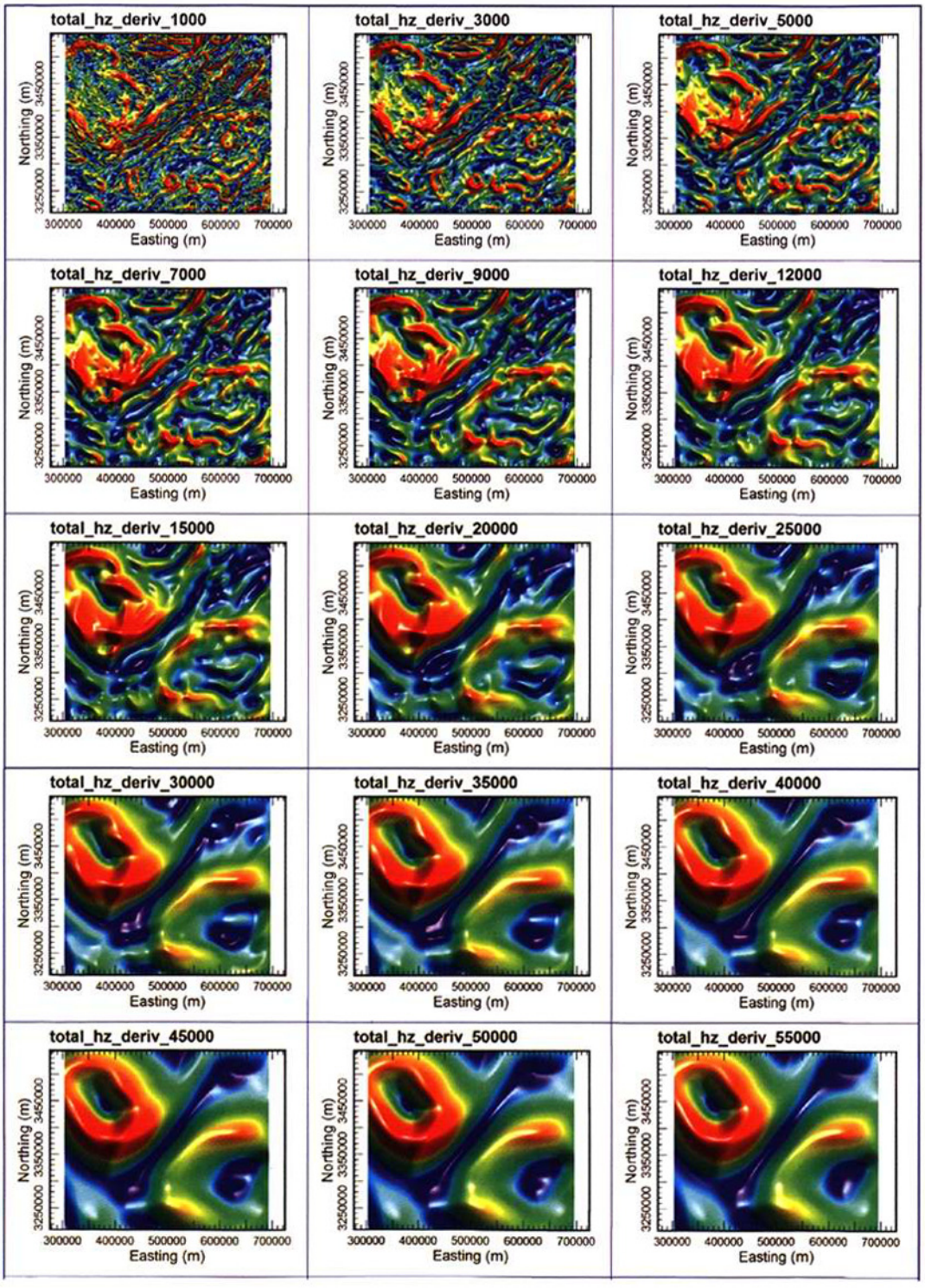


图 2 布格重力异常上延不同高度水平导数

Fig. 2 Horizongtal derivative of Bouguer gravity anomaly at different upward height

万方数据

total_hz_deriv_1000 所指为重力异常上延 1km 的水平导数，total_hz_deriv_55000 所指为重力异常上延 55km 的水平导数。不同上延高度反映地下不同深度的密度信息，上延高度 5km 以内数据反映了浅表密度体不均匀分布的边界，上延高度 5～20km 反映了下地壳以上信息，上延高度大于 20km 的数据反映莫霍面尺度和板块尺度的密度边界。

按图 1 中的步骤，经过上延、求水平导数、边缘检测点、连接点成线等一系列处理，获得了长江中下游成矿带布格重力异常的多尺度边缘检测结果（图 3）。检测结果显示随着延拓高度的变化，一些发育规模小，切割不深的浅表构造边界逐渐消失，而保留下来的长波长信号反映了研究区内发育规模巨大、切割较深或深部隐伏的地质构造边界（如郯庐断裂、板块边界）。这些线性展布的边界形迹，显示出各构造的走向、连续性以及各线性构造不同深度层次的变化。深部保留的边界之间所分割的块体就代表地下深部物性有差异的地质体分布。

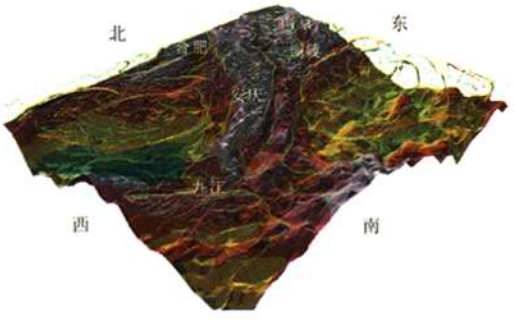


图 3　长江中下游成矿带布格重力多尺度边缘检测立体图（线颜色从绿色-红色变化表示延拓高度从 1km 到 55km 检测结果）

Fig. 3　Gravity WORMS result perspective map of the Lower and Middle reach of the Yangtze River metallogenic belt (line colour from blue to red means upward height from 1km to 55km)

航磁化极异常上延到 35km 后，形态变化已经不大，为突出深部信息，取最大延拓高度为 45km，同时，为兼顾浅部信息，最小延拓高度取 1km。从 1km 到 45km 共设置 15 个不同的上延高度，上延后水平导数结果如图 4 所示，图名及含义与图 2 重力异常上延求导图相同。

按图 1 中的步骤，经过化极、上延、求水平导、边缘检测点、连接点形成线等一系列处理，获得了长江中下游成矿带航磁异常的多尺度边缘检测结果（图 5）。不同高度延拓的检测结果含义与前述的磁异常边缘检测结果所代表的含义类似，化极磁异常多尺度边缘检测结果反映了不同深度磁性差异地质体的边界，深部断裂如郯庐断裂、板块分界线、火山岩盆地及岩体接触线都得到很好的刻画。

3　长江中下游成矿带构造格架的重、磁数据多尺度分析

3.1　多尺度检测结果解释的原则

在同一图幅内，将不同延拓高度检测结果叠加到一起，采用不同颜色、大小的线型表示不同深度尺度的信号边界形迹，不同深度边界信号形迹在分布位置上所体现的相似性即可获知该构造形迹的发育深度及倾向特征：线束越密集表示边界构造切割深度越大，线束稀疏则表示其切割发育的深度较浅；线束组合越宽表示该构造倾向越缓，反之则表示该边界构造发育产状较陡、倾角较大。每组线束组合均能反映边界构造的走向及摆动、倾向、切割深度等特征（管烨，2005；J. R. Austin，2008）。

3.2　构造格架分析

根据前述解释原则，结合其它地球物理、地质资料，长江中下游地区重磁多尺度边缘检测结果反映了以下信息：

3.2.1　板块、地体边界

上延高度为 7～60km 的重力多尺度边缘检测（图 6）和航磁上延高度 12～50km 多尺度检测结果（图 7）反映了研究区深度较大的宏观地质构造格架。

图 6 中西北部有一形如鸽状的密度边界，其线束密集所围成的区域主体部分为大别隆起区，向北东向逐渐收缩，是大别-苏鲁超高压变质带边界的反映。与西北部隔江相望的东南部，检测出一环形边界，其西部和南部的边界产状较缓，北部产状较陡，此边界基本反映了江南地体的边界。沿合肥—肥西县—六安南一线分布的密集线束反映了华北板块与扬子板块的边界，其北为华北板块，其南为下扬子板块。将重力多尺度边缘检测结果、地形地质及 HQ5 线解释断面等在三维环境下集成（图 8），通过交互式分析发现多尺度检测的线束与大别隆起、下扬子坳陷和江南隆起之间的界线一一对应。多尺度检测所得线束的密集程度还提供了地体接触边界产状信息：大别与下扬子之间的接触界线较陡，其对应的密度线束密集，下扬子与江南隆起之间的接触界线较缓，其对应的线束稀疏。大地电磁测深结果（图 9）

万方数据

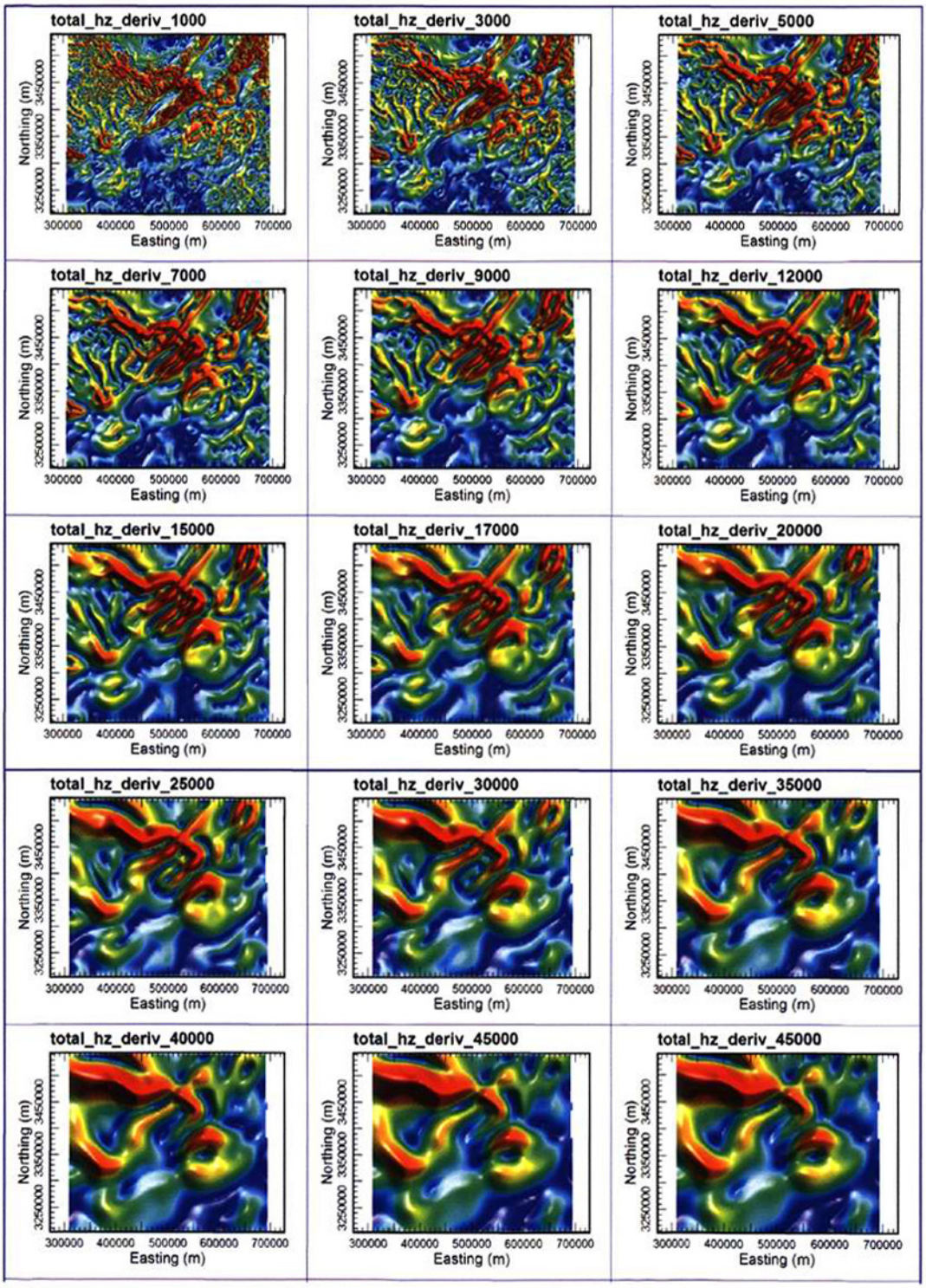


图 4 化极磁异常上延不同高度水平导数

Fig. 4 Horizongtal derivative of reduction to pole magnetic anomaly at different upward height

万方数据

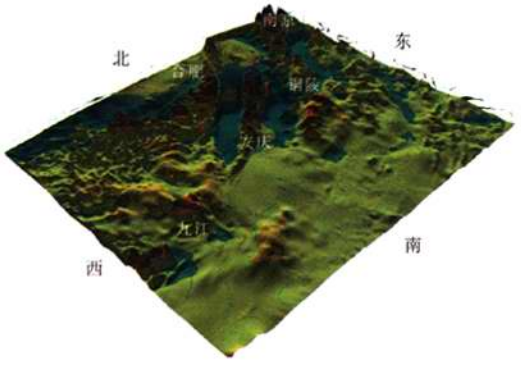


图 5　长江中下游成矿带化极磁异常多尺度边缘检测立体图(线颜色从绿色-红色变化表示延拓高度从 1km 到 45km 检测结果)

Fig. 5　Magnetic WORMS result perspective map of the Lower and Middle reach of the Yangtze River metallogenic belt (line colour from blue to red means upward height from 1km to 45km)

很好地支持了上述观点，江南隆起整体表现为高阻，下扬子坳陷为低阻，江南隆起与下扬子坳陷接触界面电阻率变化角度较缓，而大别隆起与下扬子坳陷接触界面电阻率变化较陡。

在航磁多尺度检测结果(图 7)与重力检测结果既有相似也有区别：区内西北部对应鸽状密度边界也存在形如鸽状的磁性边界，但此边界与密度边界稍有偏移，其范围较密度边界稍小，结合大别-苏鲁超高压变质带的磁性较高的物性特征，可以认为该磁性边界是大别隆起区和大别-苏鲁超高压变质带边界的反映，同时，也说明该密度和磁性边界范围内地质块体具有重磁同源的性质。航磁检测结果对江南隆起的边界没有明显的显示(图 8)，说明江南隆起与下扬子坳陷磁性差异较小。

3.2.2　断裂构造

重力、航磁检测结果的线性特征提供了断裂构造的丰富信息，总体来看，区内线性特征可分为三种类型：西北的大别隆起区线束走向以 NW 向为主，西南部阳新—九江以南线束 NW 向为主，其余区域线束 NE 向为主。这些现象反映了不同地质历史其间形成的断裂、构造反向的变化，对线束形迹的分析，初步确定以下断裂构造分布特征：

郯庐断裂：郯庐断裂带是东亚大陆上的一系列北东向巨型断裂系中的一条主干断裂带，切穿中国东部不同大地构造单元，规模宏伟，结构复杂，前人研究及争论较多(吴根耀，2007；侯明金，2007)。板块构造学说观点对其大致有三种看法：其一、认为郯庐断裂带是一条大陆古缝合线；其二，认为它是一条转换断层；再一种看法，认为它是一条大陆裂谷带。对其向南延伸至何处也存在较大争议，前人(王京彬，1991)认为它是延湖北广济，经江西修水，湖南连云山、衡山、江永直抵广西大容山—六万大山的一条深断裂带。

在重力、航磁边缘检测图上，沿黄梅—宿松—太湖—庐江一线的断续出现一线束，在图 8 中，该线束与由 MT、重磁等方法解释所得的 HQ5 断面中的郯庐断裂带中心位置相重合，因此，可以认为该线束是郯庐断裂带在安徽境内的反映，郯庐断裂带同时也是下扬子板块与大别造山带及华北板块的边界。该线束南部密集，在肥东—巢湖之间稀疏，说明南部产状较陡，北部产状相对较缓。在更为宏观的尺度上，对中国东部航磁的多尺度边缘检测结果(图 10)发现，沿郯庐断裂带上断续出现北东向的线束，基本反映了郯庐断裂的走向和分布形态，其断续出现、线束的密集或稀疏相间的特征表明郯庐断裂带结构的复杂性。

无论重力、还是航磁，在长江南侧均未见与郯庐断裂带连接的密度或磁性线状边界，本论文认为，郯庐断裂带穿过长江的可能性较小。

长江深断裂：原地质部航测大队 902 队在 1958 年根据武汉至镇江段的长江中下游航磁异常分析，认为沿长江河床方向，存在一条区域性断裂(常印佛，1991)。原地质部江苏省地质局基于上述等资料，也认为由安庆经芜湖、南京至镇江，沿长江存在断裂，并称之为长江破碎带(或下扬子破碎带)。关于长江断裂带的定义、性质一直存在着争议。前人将其称为长江深断裂、长江破碎带、长江断裂坳陷带和裂谷等，秦大正(1983)和刘湘培等(1988)认为长江断裂带，由九江、安庆经芜湖、南京东延至镇江后，并未终止，而是继续向东延伸。其全长近千公里(包括海域部分)，宽约 10～15km，组成一条巨大的地堑式张性裂谷带，这一裂谷带直至现代仍然在继续活动。而李起彤(1984)等则认为长江断裂带到镇江即终止，不再往东延伸。唐永成等(1998)等利用怀宁-全椒断裂、东流-马鞍山断裂、桐城-庐江断裂的部分追踪确定了长江断裂的大概位置，认为前两条断裂形成较早，是造山期产物。

在重力上延 7～50km 多尺度边缘检测结果图(图 6)上，在阳新—瑞昌—九江—望江—安庆—贵池—无为—马鞍山一带出现的线束，线束密集、形态连续，其主体部位与唐永成等(1998)推测的长江深

万方数据

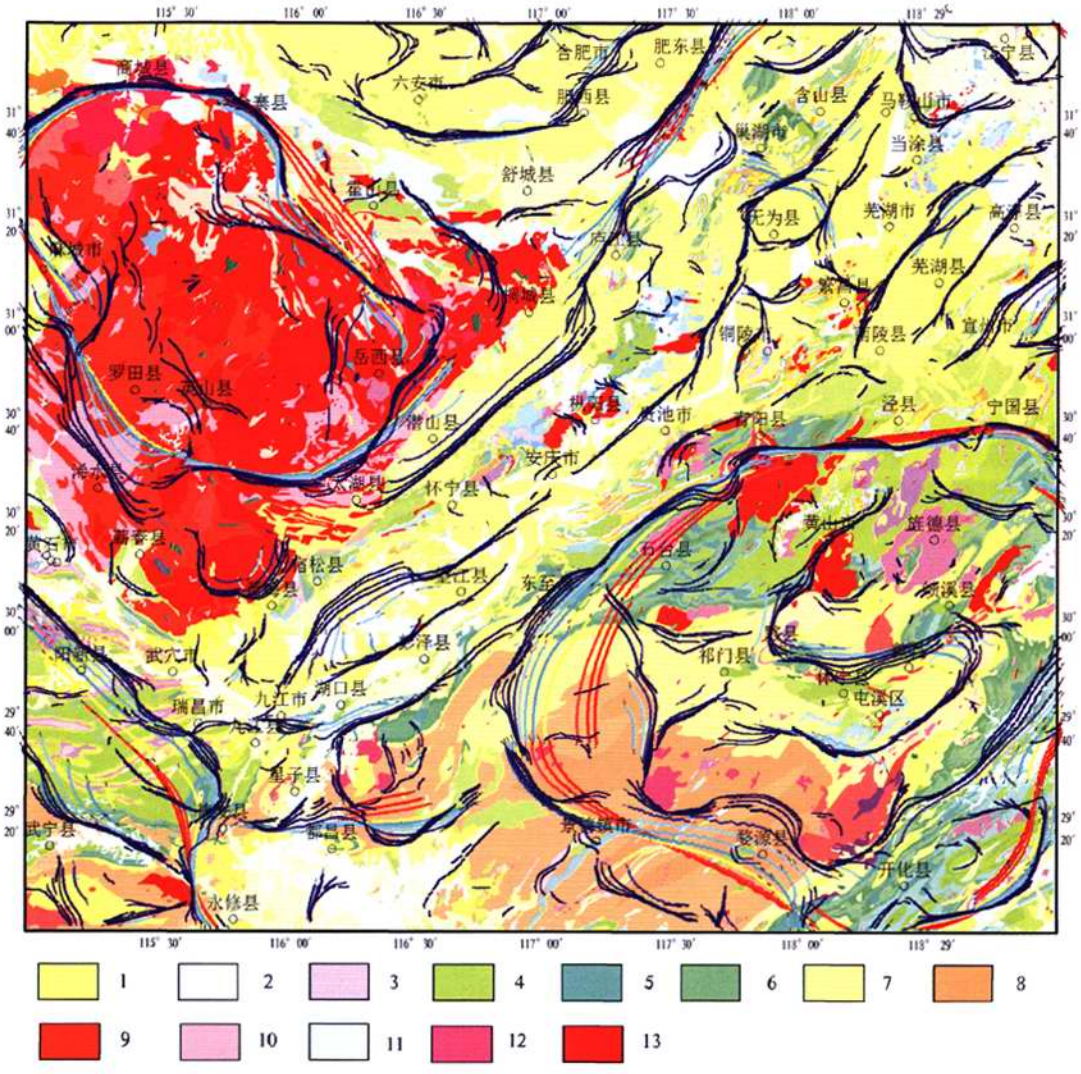


图 6 重力上延高度 7～60km 多尺度检测结果

(底图为地质图,线颜色从蓝色到红色表示延拓高度从 7km 到 60km 的检测结果)

Fig. 6 WORMS result of gravity anomaly which upward height from 7km to 60km (base map is geomap, WORMS line color from bule to red mean detection result from 7km to 60km)

1—第四系;2—水系;3—三叠系灰岩;4—志留系粉砂岩;5—奥陶纪灰岩、白云岩;6—寒武纪页岩、灰岩;7—中元古浅变质岩;8—中元古变质岩;9—早元古变质岩;10—太古代片麻岩;11—晚侏罗火山岩;12—中侏罗纪闪长岩、花岗岩;13 晚侏罗 早白垩花岗岩、闪长岩

1—Quternary;2—water system; 3 Triassic limestone ;4—Silurian siltite ; 5—Ordovician limestone and dolomite ;6 —Cambrian shiver and limestone ;7—middle Proterozoic epirock; 8—middle Proterozoic metamorphic ;9—early Proterozoic metamorphic ;10 —Archaean gneiss ; 11— late Jurassic lava; 12—middle Jurassic diorite and granite ; 13—late Jurassic to early Cretaceous diorite and granite

断裂基本吻合。大地电磁测深也反映了长江深断裂的存在,HQ5(图 9)、HQ10(图 10)线 MT 反演电阻率断面图上,长江附近重磁多尺度检测线束下方均存在明显的低电阻率体,反映了低阻断裂带的存在。重力检测结果所反映的长江深断裂形态清楚,完整地刻画了长江深断裂的展布。从更宏观的尺度分析,东部航磁检测结果(图 11),完整地反映了长江深断裂,其沿安庆—铜陵北—芜湖—马鞍山—南京一线连续性较好,从南京拐到镇江后一直往东延续,至南通后东延进入东海。

万方数据

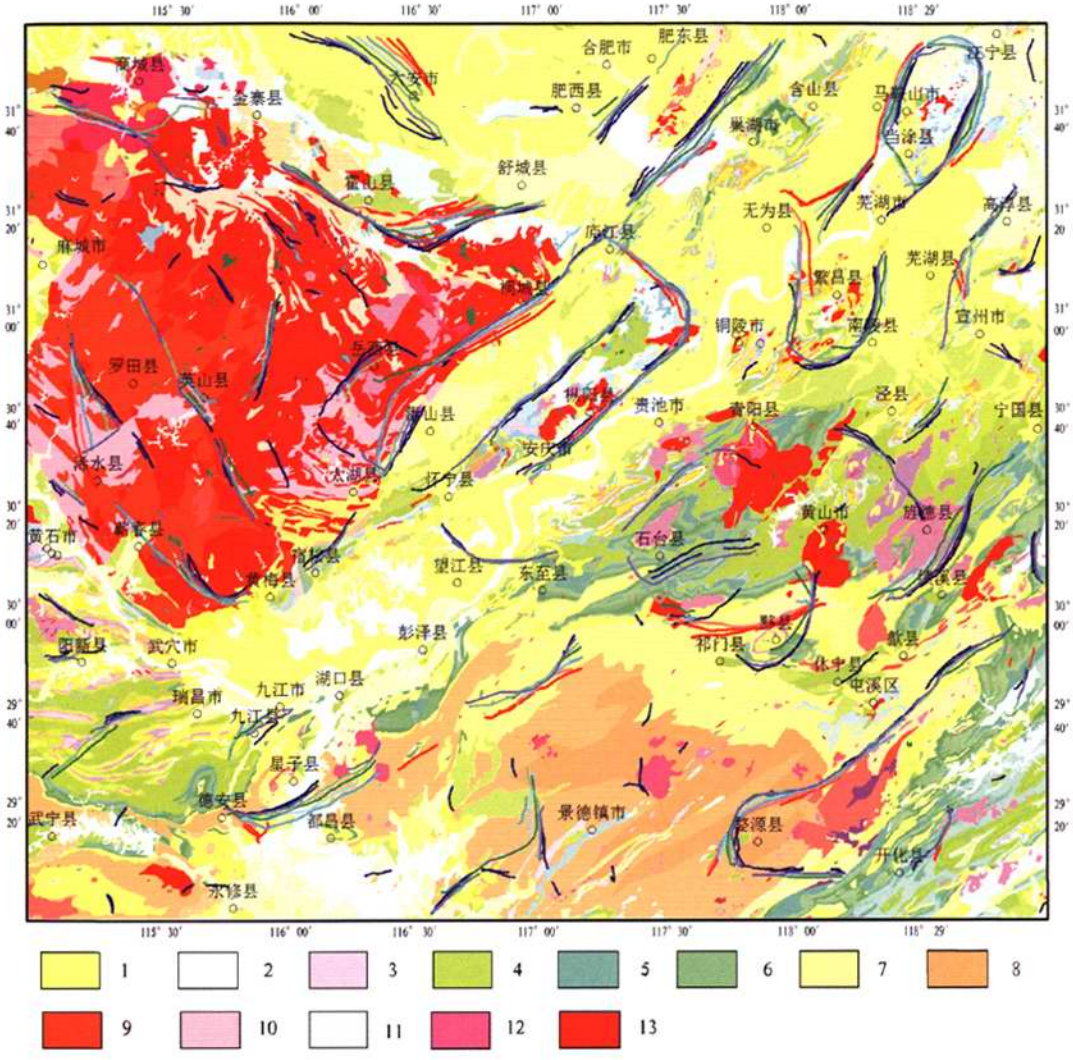


图 7　航磁上延高度 12～50km 多尺度检测结果

(底图为地质图,线颜色从蓝色到红色表示延拓高度从 7km 到 60km 的检测结果)

Fig. 7　WORMS result of aero magnetic anomaly which upward height from 12km to 50km

(base map is geomap, WORMS line color from bule to red mean detection result from 7km to 60km)

1—第四系;2—水系;3—三叠系灰岩;4—志留系粉砂岩;5　奥陶纪灰岩、白云岩;6—寒武纪页岩、灰岩;7—中元古浅变质岩;8—中元古变质岩;9—早元古变质岩;10—太古代片麻岩;11—晚侏罗火山岩;12—中侏罗纪闪长岩、花岗岩;13—晚侏罗-早白垩花岗岩、闪长岩

1—Quternary;2—water system;3—Triassic limestone;4—Silurian siltite;5—Ordovician limestone and dolomite;6—Cambrian shiver and limestone;7—middle Proterozoic epirock;8—middle Proterozoic metamorphic;9—early Proterozoic metamorphic;10—Archaean gneiss;11—late Jurassic volcanic rock;12—middle Jurassic diorite and granite;13—late Jurassic to early Cretaceous diorite and granite

综合以上信息,本文支持秦大正(1983)和刘湘培等(1988)等观点,即长江断裂带由九江、安庆经芜湖、南京东延至镇江后,并未终止,而是继续向东延伸。长江深断裂带与长江中下游莫霍面隆起(图12)相呼应,推测其形成与地幔隆起有关,是一个裂谷型的张性断裂,该带控制了沿江的火山岩盆地,可见其对长江中下游多金属成矿带有着重要影响。

其它断裂构造:根据重磁多尺度边缘检测结果,还可厘定一系列的断裂构造,按走向主要可分为NW向和NE向两个系列的断裂构造。主要断裂构

万方数据

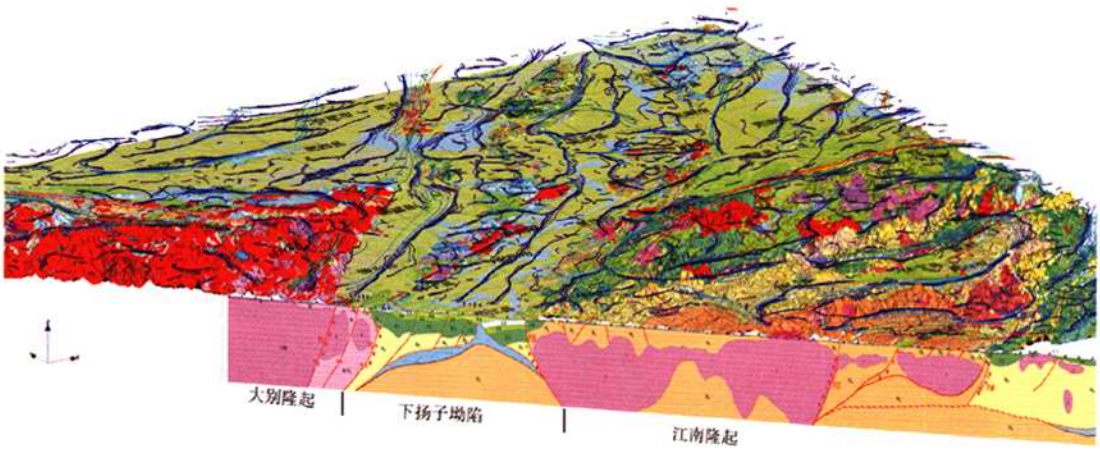


图 8 重力多尺度检测与 HQ5 线地质解释剖面立体图

Fig. 8 Perspective map of gravity WORMS and line HQ5 geological interpretation section

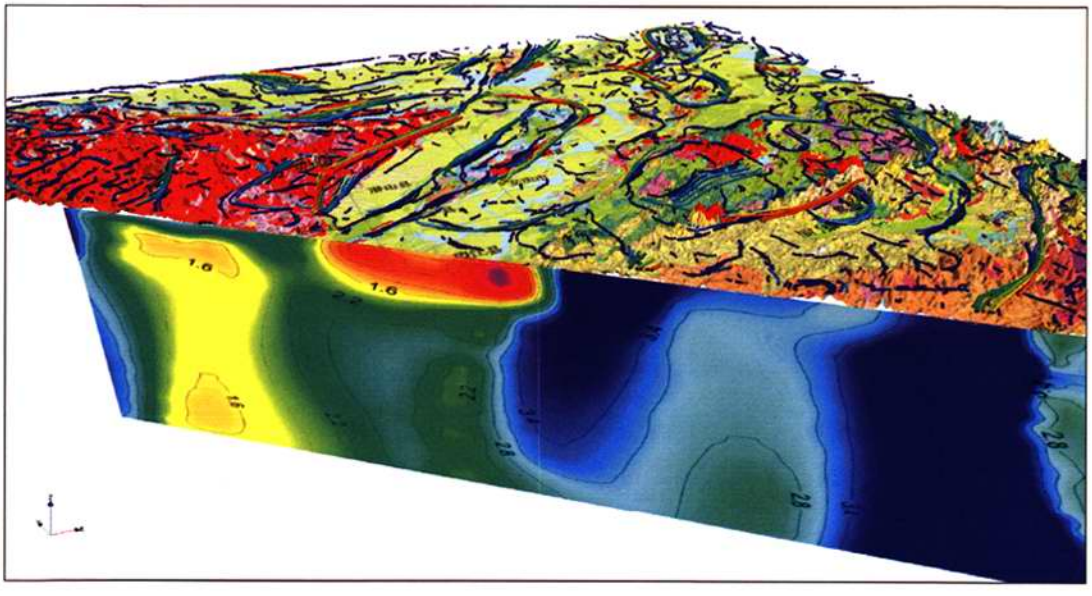


图 9 航磁多尺度检测与 HQ5 线 MT 断面(线束为多尺度检测结果,地质图叠加于 DEM 上,MT 断面:深 163km,电阻率等值线为对数间距,单位:Ω·m)

Fig. 9 Perspective map of aero magnetic WORMS and line HQ5 MT section (lines are WORMS result, geomap overlay DEM, MT section: 163km depth, resistivity contour are logarithmic interval, unite: Ω·m)

造如图 13 所示,NE 走向的断裂主要有 F1、F2、F3、F4、F5、F6 和 F7。F1、F2 分别对应前述的郯庐断裂带和长江深断裂。F3 与前人(唐永成,1998)研究推测的高坦断裂基本一致,其东至一青阳一段为江南隆起与下扬子坳陷的分界线。F4、F5 为江南隆起内部发育的较浅断裂,这两条断裂在 MT 断面上也有对应显示(图 9),F4 与 F5 分别对应两个低阻带,向北西倾伏,倾角较陡,深度约 7~8km,应为壳内断裂。F6 和 F7 断裂为下扬子坳陷内的两条断裂构造带,在图 11 上,对应为低阻带,从重力检测线束特征分析,F6 产状较陡,F7 向 NW 倾,产转较缓,此两条断裂深度较浅,为下扬子坳陷内的局部断裂系统。NW 向断裂构造有 F7、F8、F9、F10、F11 和 F12。F12 为一条横跨板块的深大断裂,线性形迹与陈沪

万方数据

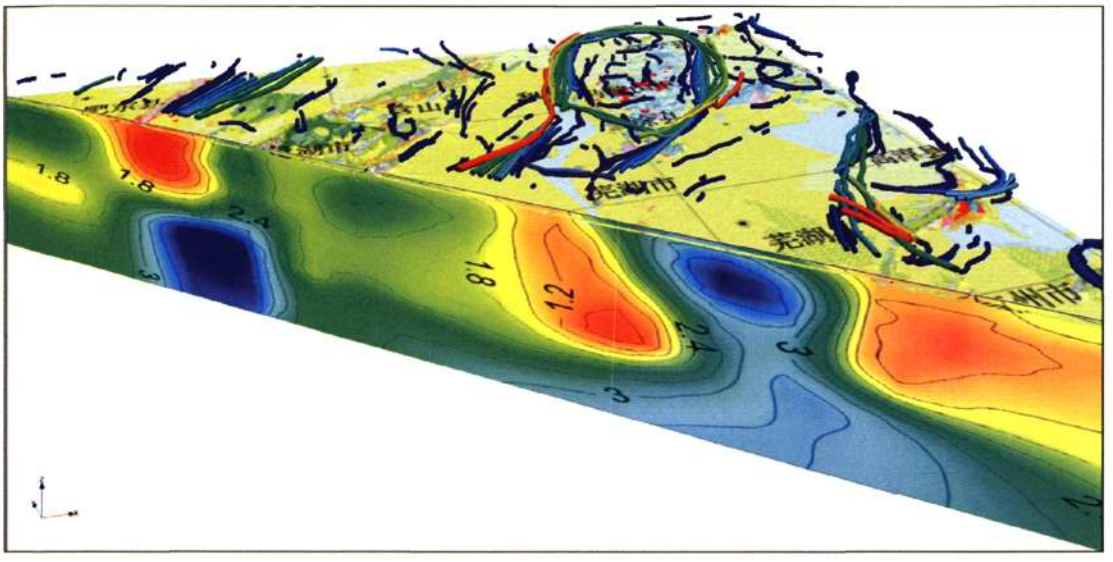


图 10　航磁多尺度检测与 HQ10 线 MT 断面（线束为多尺度检测结果，地质图叠加于 DEM 上，MT 断面：深 70km，电阻率等值线对数间距，单位：Ω·m）

Fig. 10　Aero magnetic WORMS and HQ10 MT section (lines are WORMS result, geomap overlay DEM, MT section: 30km depth, resistivity contour are logarithmic interval, unite: Ω·m)

生等(1999)提出的大别-舟山断裂基本一致，但在个别地段有一定位移，其在郯庐断裂西侧一段对应前人(汤加富，2003)推测的英山-水吼岭断裂。F9 为襄樊-广济断裂的一部分，F10 和 F11 是大别造山带内部发育的次级断裂。

火山岩盆地边界：长江中下游地区中生代以来，该地区岩浆活动强烈，各种火山岩-次火山岩覆盖面积在 5000 km^2 以上。前人研究认为，该成矿带的金属成矿与火山岩盆地中燕山期岩浆活动有密切的成因联系(常印佛等，1991；禹尧，2009)。中生代火山岩分布于多个陆相火山岩断陷盆地中，主要包括庐枞盆地、繁昌盆地、宁芜盆地、溧水盆地、怀宁-安庆盆地等。盆地边界一直是地质工作重点，对其中一些盆地的边界曾一度存在争论，如庐枞盆地有无另一半等。

航磁上延高度 1～7km 多尺度检测结果(图 14)，是深度相对较浅磁性体边界的反映。沿长江深断裂一线，从北到南，航磁多尺度边缘检测依次出现多个环状线束，结合火山岩磁性较高的特征，认为这些线束代表了长江中下游火山岩盆地的边界。江宁县—马鞍山—芜湖一带的环形线束为宁芜盆地边界，繁昌县—南陵县所处的环形线束为繁昌盆地的边界，庐江南—枞阳一带的环形线束为庐枞盆地的边界，其南侧安庆—怀宁的线束为怀宁盆地的边界。其中宁芜、繁昌、庐枞盆地的边界清晰完整，怀宁盆地受其规模的影响，反映的边界不甚完整。根据重、磁多尺度确定的火山岩盆地边界如图 13 所示，B1、B2、B3、B4 分别为宁芜盆地、繁昌盆地、庐枞盆地和怀宁盆地。

3.3　构造格架与矿集区关系

将重力、航磁多尺度解译结果与矿床(点)综合到同一张图上(图 13)，可见长江中下游金属矿床(点)分布具有明显的成群分带的特点。四个火山岩盆地对应的宁芜、庐枞、繁昌、怀宁等四个矿集区集中了长江中下游成矿带近 50%的矿床(点)，矿种类型以 Fe 矿为主，Cu 矿次之。其余分布于隆凹过渡带铜陵、九瑞、青阳-贵池和鄂东南矿集区，矿床类型以 Cu、多金属矿为主。北东向线性构造(断裂)和环形构造(断陷火山岩盆地)与矿集区分布有直接关系，尤其是长江深断裂控制了火山岩盆地的分布(宁芜、怀宁在其北，庐枞、繁昌在其南侧)，可以认为这与长江深断裂形成的背景有密切关系：这个张性断裂是地幔上涌引起的裂谷型断裂，使其成为导矿通道，来自下地壳或地幔的深部矿源物质通过深断裂向上运移，在合适的位置形成目前所见的金属矿集区。大别-舟山断裂形成时代可能晚于长江深断裂，它将

万方数据

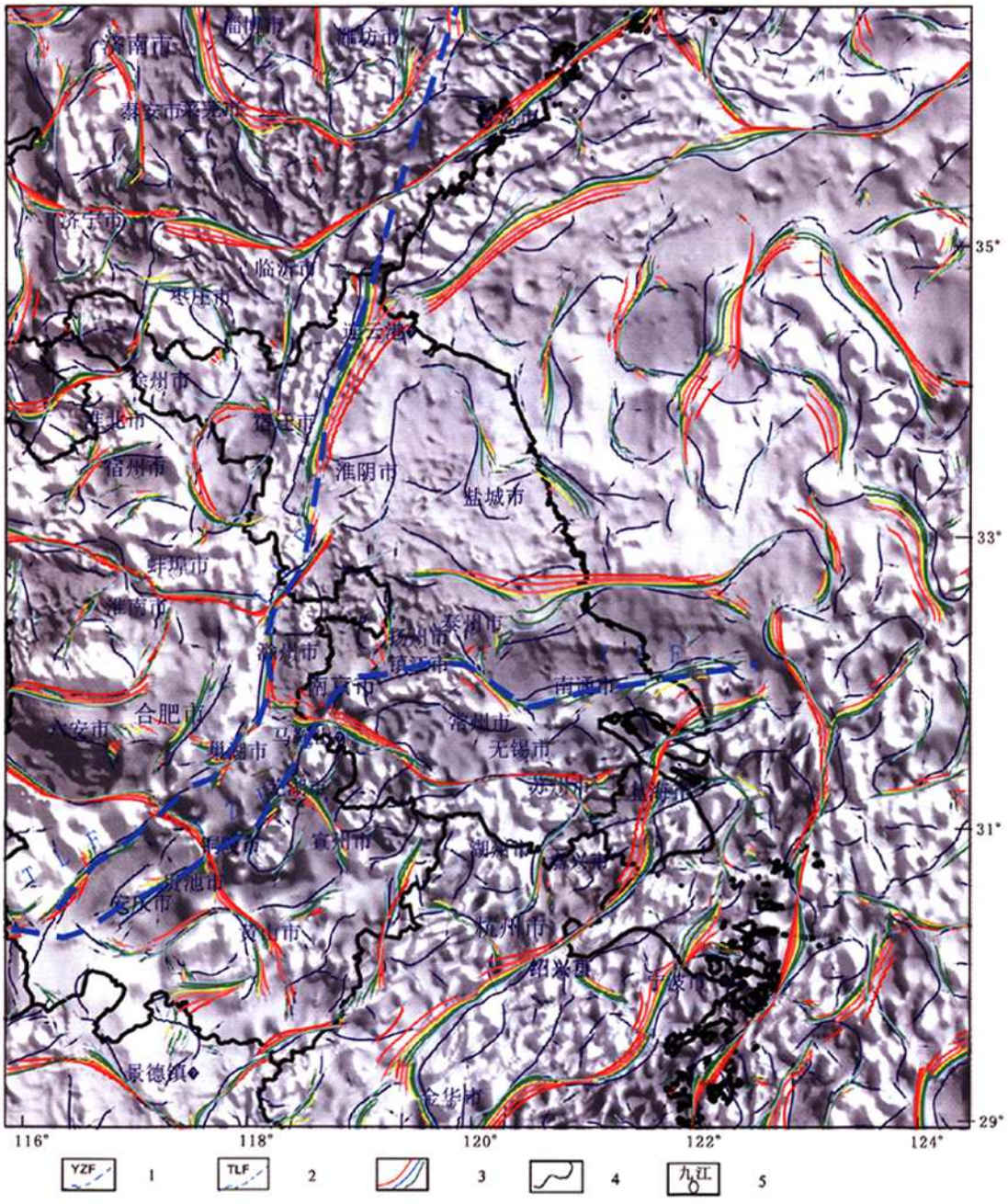


图 11 中国东部航磁上延高度 40～80km 多尺度检测结果（底图为航磁化极异常，线颜色从绿色到红色表示延拓高度从 40km 到 80km 的检测结果）

Fig. 11 China east aeromagnetic WORMS from 40 to 80km upward height (base map is aero reduction to pole magnetic anomaly, WORMS line color from bule to red mean detection result from 40km to 80km)

1—长江深断裂；2—郯庐断裂；3—航磁多尺度边缘检测结果；4—省界；5—地名

1—Yangtze River deep fault; 2—Tan-Lu deep fault; 3—WORMS results; 4—provincial boundaries; 5—place name

后者在铜陵一带错断，形成深大断裂的交汇，对铜陵、 庐枞、宁芜和繁昌矿集区的形成也具重要贡献。

万方数据

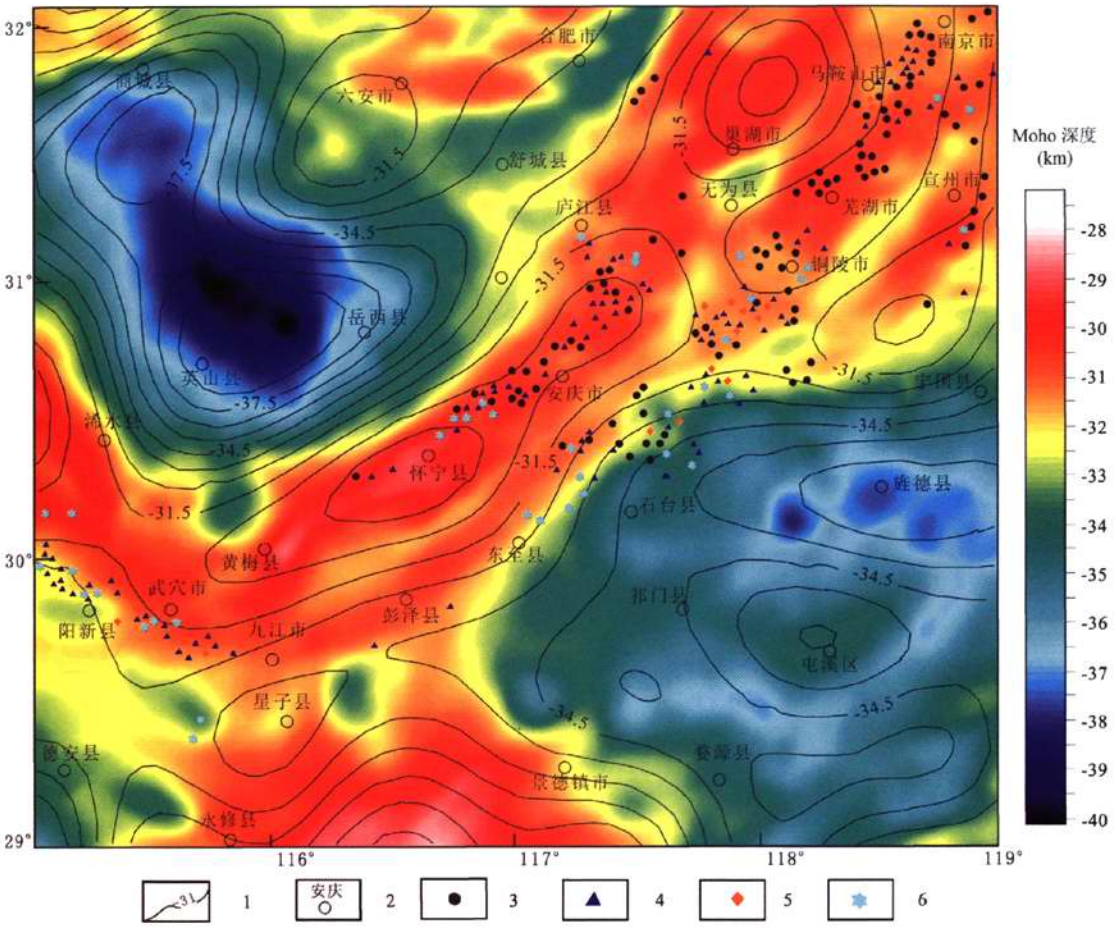


图 12　长江中下游地区 Moho 界面深度图

Fig. 12　Moho depth contour of the Lower and Middle reach of the Yangtze River metallogenic belt

1—莫霍面深度；2—地名；3—铁矿；4—铜矿；5—(硫)金矿；6—多金属矿

1—Moho depth；2—place name；3—iron deposits；4—copper deposits；5—(sulpher) golden deposits；6—polymetallic deposit

4　结论

本文采用多尺度边缘检测法对长江中下游地区区域重力、航磁数据进行了处理，求取了不同延拓高度的检测结果。在三维可视化环境下，集成了多尺度检测结果、大地电磁、地质、地形等多源信息，建立了长江中下游成矿带构造格架，得出以下认识：

(1)长江深断裂沿安庆—铜陵北—芜湖—马鞍山—南京一线连续分布，在南京附近走向转换为近东西向，到镇江后一直往东延续，至南通继续向东延续进入东海；长江南侧均未见与郯庐断裂带连接的密度或磁性线状边界，本论文认为郯庐断裂带穿过长江的可能性较小；

(2) 通过重磁多尺度边缘检测结果解译显示的构造格架与矿床(点)分布之间的对应关系分析，认为长江深断裂是地幔上涌引起的裂谷型断裂，来自下地壳或地幔的深部矿源物质通过深断裂向上运移，在合适的位置形成目前所见的金属矿集区。大别-舟山断裂将长江深断裂在铜陵一带错断，形成深大断裂的交汇，对铜陵、庐枞、宁芜和繁昌矿集区的形成有重要贡献。

(3) 江南隆起与下扬子坳陷接触界面角度较缓，大别隆起与下扬子坳陷接触界面较陡。

注　释

❶ 数据源自国土资源部航空物探遥感中心.

参　考　文　献

常印佛，刘湘培，吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京：地

万方数据

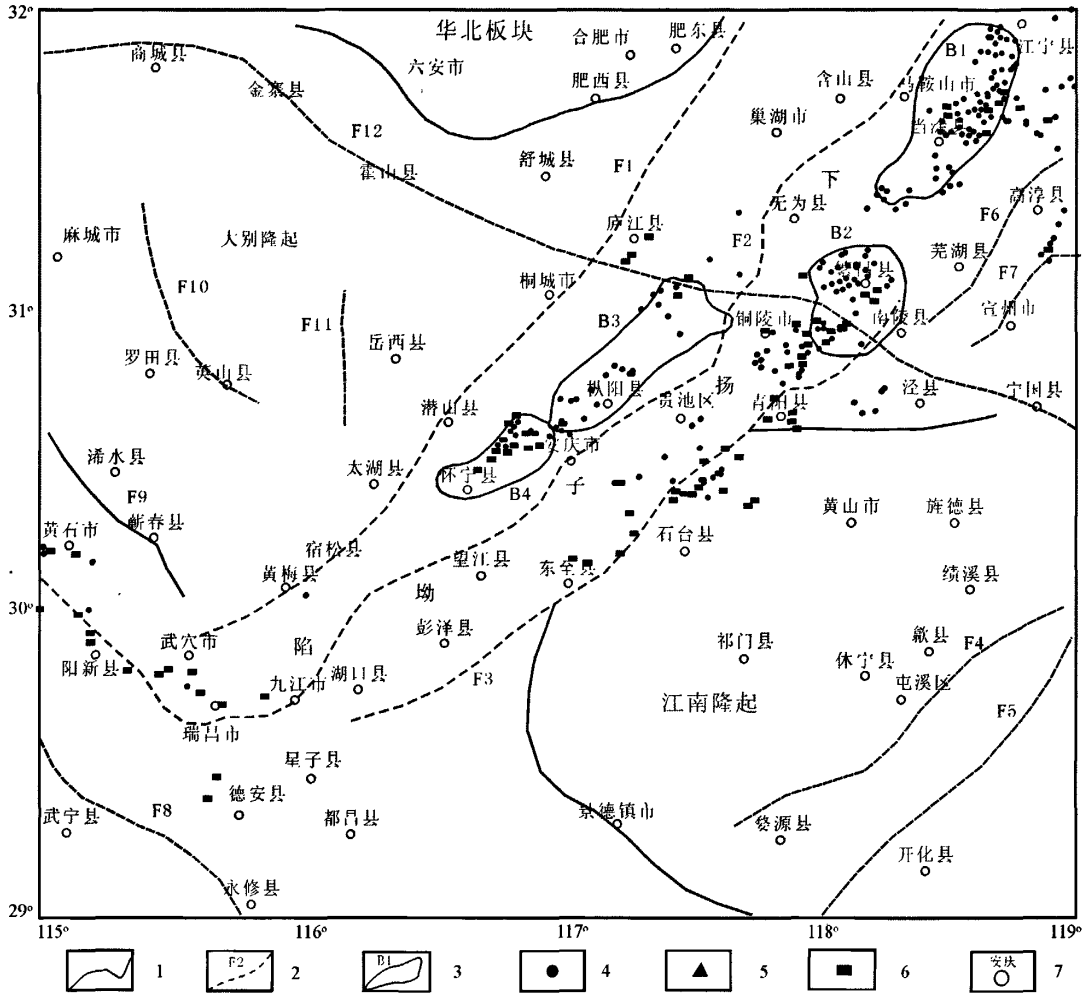


图 13 长江中下游成矿带构造格架与矿床对应关系图

Fig. 13 The relation between deposits and tectonic framework of the Lower and Middle reach of the Yangtze River metallogenic belt

1—板块、地体边界;2—断裂;3—火山岩盆地;4—铁矿床;5—铜矿床;6—多金属矿床;7—地名

1—Boundary of plate and terrain;2—faults;3—lava basin;4—iron deposits;5—copper deposits;6—pollymetallic deposits;7—place name

质出版社, 1～325.

管烨. 2005. 云南三江地区地壳三维构造与矿集区关系研究. 中国地质科学院博士论文.

侯明金, 朱光, Jacques Mercier. 2007. 郯庐断裂带(安徽段)及邻区的动力学分析与区域构造演化. 地质科学, 42 (2): 362～381.

刘光鼎, 郝天珧. 1998. 中国的地质环境与隐伏矿床. 地球物理学报, 41 (2): 182～188.

刘光鼎, 郝天珧, 刘伊克. 1997. 中国大地构造宏观格架及其矿产资源的关系. 科学通报, 42: 2.

刘金兰, 李庆春, 赵斌. 2007. 位场场源边界识别新技术及其在山西古构造带与断裂探测中的应用研究. 工程地质学报, 15(4): 213～217.

刘湘培, 常印佛, 吴言昌. 1988. 论长江中下游地区成矿条件和成矿规律. 地质学报, 2: 167～177.

秦大正, 刘昌森, 丁项华. 1983. 长江断裂带东延问题及裂谷特性的讨论. 地震地质, 3 (2): 69～73.

孙文珂, 黄宗轲, 丁鹏飞. 2001. 重点成矿区带的区域构造和成矿构造文集. 北京: 地质出版社, 1～20.

唐永成, 吴言昌, 储国正, 等. 1998. 安徽沿江地区铜多金属矿产地质. 北京: 地质出版社, 10～11.

汤加富. 2003. 大别山及邻区地质构造特征与形成演化:地幔差速环流与陆内多期造山. 北京: 地质出版社, 36～40.

涂广红, 江为为, 朱东英. 2006. 中国东北地区剩余重磁异常特征与地质构造及成矿带的关系. 地球物理学进展, 21(3): 746～755.

王京彬. 1991. 中国东部郯庐断裂南延新解. 大地构造与成矿学,

万方数据

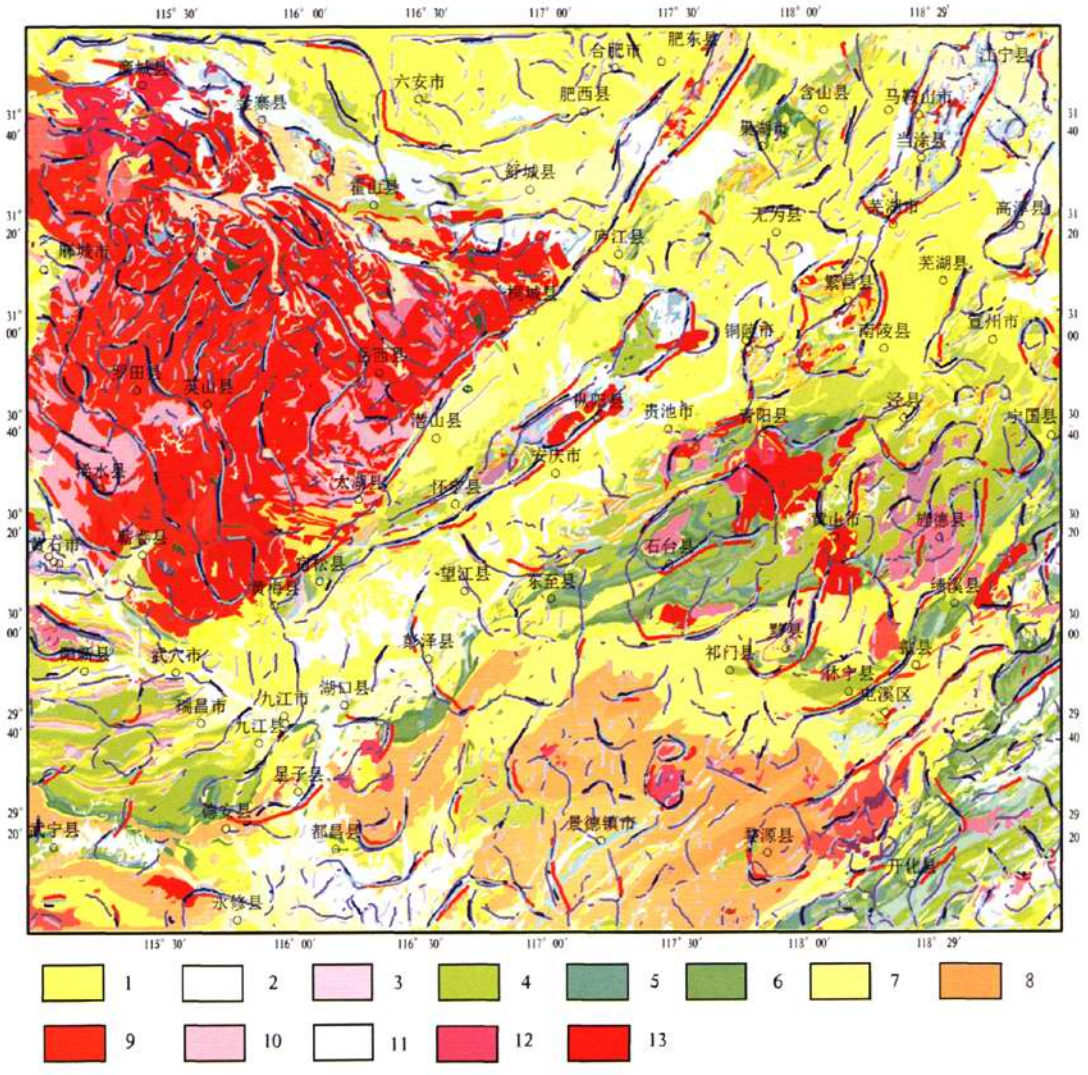


图 14　航磁上延高度 1～7km 多尺度检测结果(底图为地质图,线颜色从蓝色到红色表示延拓高度从 7km 到 60km 的检测结果)

Fig. 14　Aeromagnetic WORMS from1km to 7 km upward height (base map is aero reduction to pole magnetic, WORMS line color from bule to red mean detection result from 40km to 80km)

1—第四系;2—水系;3—三叠系灰岩;4—志留系粉砂岩;5—奥陶纪灰岩、白云岩;6—寒武纪页岩、灰岩;7—中元古浅变质岩;8—中元古变质岩;9—早元古变质岩;10—太古代片麻岩;11—晚侏罗火山岩;12—中侏罗纪闪长岩、花岗岩;13—晚侏罗-早白垩花岗岩、闪长岩

1—Quternary;2—water system; 3—Triassic limestone;4—Silurian siltite; 5—Ordovician limestone and dolomite;6—Cambrian shiver and limestone;7—middle Proterozoic epirock;8—middle Proterozoic metamorphic;9—early Proterozoic metamorphic;10—Archaean gneiss;11—late Jurassic lava volcanic rock; 12—middle Jurassic diorite and granite; 13—late Jurassic to early Cretaceous diorite and granite

170～176.

吴根耀, 梁兴, 陈焕疆. 2007. 试论郯城-庐江断裂带的形成、演化及其性质. 地质科学, 42(1): 160～175.

禹尧, 徐夕生. 2009. 长江中下游地区白垩纪富碱火山岩浆作用. 地球科学, 34 (1): 105～116.

裴荣富, 熊群尧. 1999. 中国特大型金属矿床成矿偏在性与成矿构造聚敛(场). 矿床地质, 18 (1): 37～45.

严加永. 2010. 长江中下游成矿带深部背景综合地球物理研究. 中国科学院博士论文.

张季生. 2006. 位场自动反演技术的研究现状及意义. 地球学报, 27 (6): 609～612.

Archibald N, Gow P, Boschetti F. 1999. Multiscale edge analysis of

万方数据

potential field data. Explore Geophys, 30: 38～44.

Austin J R, Blenkinsop T G. 2008. The Cloncurry Lineament: Geophysical and geological evidence for a deep crustal structure in the Eastern Succession of the Mount Isa Inlier. Precambrian Research, 163: 50～68.

Cordell, Lindrith. 1979. Gravimetric expression of graben faulting in Santa Fe County and the Espanola basin, New Mexico: New Mexico Geological Guidebook, 30th Field Conference, Santa Fe County, 59～64.

Holden D J, Archibald N J, Boschetti F, Jessell M W, 2000. Inferring geological structures using wavelet-based multiscale edge analysis and forward models. (in Exploration beyond 2000: conference handbook) Preview 84,97.

Hornby P, Boschetti F, Horowitz F G. 1999. Analysis of potential field data in the wavelet domain. Geophys, 137, 175～196.

Horowitz, Hornby, Boschetti. 2000. Developments in the analysis of potential field data via multiscale edge representation. (in Exploration beyond 2000: conference handbook) Preview, 84, 77.

Miller H G, Singh V. 1994. Potential field tilt-A new concepet for location of potential field source. Journal of Applied Geophysics, 32(3): 213～217.

Murphy F C. 2005. Composition of multi scale wavelets (WORMS) in the potential field of the Mt Isa region. I2+3 final report, pmdCRC , 243～259.

Verduzco B, Fairhead J D, Green C M, et. al. 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. The leading edge , 23: 116～119.

Wijns C, Perez C, Kowalczyk P. 2005. Theta map: Edge detection in magnetic data. Geophysics, 70 (4): 39～43.

Tectonic Framework Research of the Lower and Middle Yangtze Metallogenic Belt Based on Gravity and Magnetic Multi-scale Edge Detection

YAN Jiayong, LÜ Qingtian, MENG Guixiang, ZHAO Jinhua, DENG Zhen, LIU Yan

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

Abstract

The tectonic framework of the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River was established based on multi-scale edge detection using regional magnetic and gravimetric data and integrated with analysis of magnetotelluric profiling and geological information. According to gravity and magnetic multi-scale edge detection, the distribution and location of the fault system was redefined, the exact boundary of volcanic basin such as Nanjing-Wuhu and Lujiang-Zongyang ,etc were confirmed, and the plate border were also devised. We consider that the extending to the east of the Yangtze fault zone and its continuation pass through Anqing, north of Tongling, Wuhu, Maanshan, Nanjing, Zhenjiang, Nantong and sea waters of eastern the East China Sea. There is less possibility that Tanlu fault zone traverse of Yangtze River because the linear boundary of gravity and magnetism is not found. Considering the relationship between ore-concentrating district and tectonic framework of the Middle and Lower Reach of the Yangtze River, we consider that the deep fracture of Yangtze River is caused by the upwarping of mantle. The metallic ore-concentrating district comprises mineral resources that was migrated upwards along deep faults from lower crust or mantle. The fracture of Yangtze River has been broken at Tongling by the fault of Dabie-Zhoushan. It plays an important role in the formation of Tongling, Luzhong, Ningwu ore districts.

Key words: gravity and magnetic; multi-scale edge detection; tectonic framework

万方数据