维普资讯 http://www.cqvip.com

(P421-427)

第25卷 第4期 地球科学——中国地质大学学报 Vol. 25 No. 4
2000年7月 Earth Science Journal of China University of Geosciences July 2000

胶东金矿集中区岩石圈结构与深部成矿作用

P618.510.1

杨立强[1] 王光杰[1] 张中杰[1] 邓 军[2] 赵爱华[1] 王建平[2]

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100101;2. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083)

摘要:利用胶东及其邻区1∶20万重力异常和1∶10万航磁异常探测资料,结合地震各向异性研究成果,解析其三维岩石圈结构.在此基础上,综合深部结构和矿床地质特征,探讨深部作用与成矿动力学,深化矿床成因认识,为科学找矿提供决策依据.研究表明,壳幔结构的不均一性制约着成矿系统物质和能量的交换,反映在其结构、构造和演化等多个方面.矿集区为地幔隆起带的坳陷区,幔坳与幔隆接触部位成矿强度大,幔隆区的局部隆起部位成矿强度小;金矿床主要分布于花岗岩变薄部位与变质岩的接触带上;印支中晚期郯庐断裂带深切上地幔,通过壳一幔相互作用,将含矿流体系统输运到更高的层位,发生蚀变、矿化作用.艾山岩体所处构造部位的特殊性,反映了它可能是壳幔岩浆对流侵位中心.

关键词:地球物理场;岩石圈结构;深部作用;成矿动力学;胶东矿集区;山东.
中图分类号:P611.5;P618.51;P613 **文献标识码**:A
文章编号:1000-2383(2000)04-0421-07

作者简介:杨立强,男,博士生,1971年生,1999年在中国地质大学(北京)获矿床学专业理学硕士学位,现正在中国科学院地质与地球物理研究所攻读固体地球物理学专业博士学位.

金矿 深部成矿作用

胶东地区是中国最重要的金矿集中区,在1 100 km^{2}范围内聚集了中国已探明金储量的25%以上[1].长期以来,矿集区浅部成矿背景和矿床地质研究取得了大量成果,为进一步深入研究奠定了坚实基础.但深部结构与作用过程的研究程度却很低,在一定程度上制约了对区域成矿系统时空结构和动力学的深入探讨以及深部找矿实践的发展.而地球物理勘探是当前获取深部信息最有效的途径之一,应用地球物理方法技术获取的位场图像是岩石圈中不同物性界面所产生的综合效应[2],蕴涵着结构、构造和演化等多方面的信息,对揭示成矿系统时空结构和动力学特征,发现深部隐伏矿床(体)具有重要意义.为此,本文利用胶东及其邻区重力异常①、航磁异常②和地震各向异性探测成果,解析矿集区三维岩石圈结构,揭示其深部地质特征,进而探讨深部作用与成矿动力学,为科学找矿提供决策依据.

1 地球物理场与岩石圈结构

地球物理场与大地构造具有明显相关性.根据其长期地质演化形成的地质构造背景和地球物理特征的不同,矿集区可划分为胶北地块(包括胶西北隆起和胶莱坳陷)、胶南地块及其间的牟平—即墨构造混杂带3个构造单元(图1).

矿集区的岩石建造主要包括前寒武纪结晶基底变质杂岩和中生代花岗质杂岩,其中花岗岩以低密度(2.65~2.67 g/cm^3)、低磁化率($10\cdot10^{-8}$~50×10^{-8})、低泊松比(0.17~0.19)和高弹性模量($8.43\cdot10^4$~$8.45\cdot10^4$ MPa)为特征,而变质杂岩以高密度(2.75~2.78 g/cm^3)、高磁化率(100×10^{-8}~$300\cdot10^{-8}$)、高泊松比(0.20~0.23)和低弹性模量($5.25\cdot10^4$~5.35×10^4 MPa)为特征[3~5]③,这为地球物理勘探以及测量成果的解释提供了基本前提和依据.

1.1 重力场

重力场是岩石圈不同密度界面作用的综合反映.胶东地区重力异常特征非常明显,主要包括2个闭合局部负异常和4个闭合局部正异常以及其间的

收稿日期:2000-03-27
基金项目:国土资源部"百名跨世纪科技人才培养计划"基金(No. 9808);国家攀登计划项目(No. 95-预-25和No. 95-预-39);国家重点基础研究发展规划项目(No. G1999043206).

①山东省地质矿产局地球物理地球化学勘探大队.1∶20万山东省胶东地区布格重力Δg等值线平面图.1990.

②山东省地质矿产局地球物理地球化学勘探大队.1∶10万山东中部及东部航空磁测ΔT剖面平面图.1990.

③翟裕生,邓军,杨立强,等.山东省招远市夏甸金矿构造成矿模式及隐伏矿体预测研究.中国地质大学(北京)科研报告.1998.

维普资讯 http://www.cqvip.com

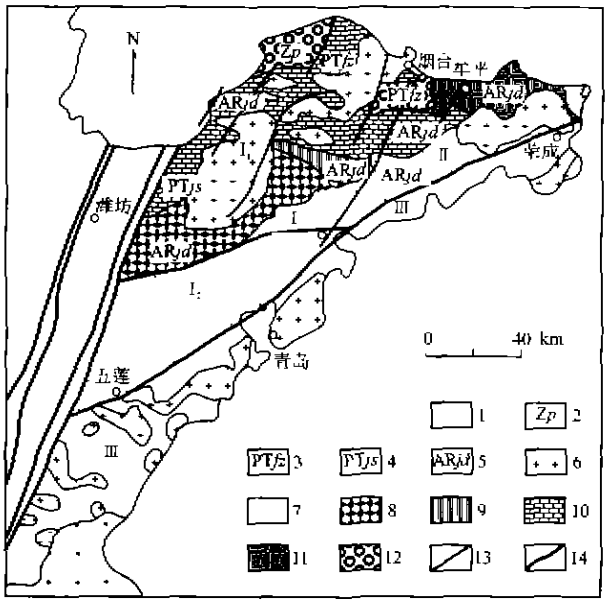


图1 胶东地区构造分区与变质岩相分布

Fig. 1 Distribution of lithofacies and structural regions in Jiaodong area, Shandong Province

据1∶20万山东省变质图和地质图及本次资料编制. Ⅰ. 胶北地块;Ⅰ₁. 胶西北隆起;Ⅰ₂. 胶莱坳陷;Ⅱ. 胶南地块;Ⅲ. 牟平—即墨构造混杂带;1. 中生界;2. 蓬莱群;3. 粉子山群;4. 荆山群;5. 胶东群;6. 花岗质杂岩;7. 榴辉岩相;8. 角闪麻粒岩相;9. 高角闪岩相;10. 低角闪岩相;11. 低角闪岩相及高绿片岩相;12. 低绿片岩相;13. 剪切带;14. 构造单元界线

梯级带(图2a). 牟平—即墨构造混杂带是一个以文登为中心的闭合局部负异常,极小值走向近SN. 在此局部负异常周围的一条约 10×10^{-5} m/s² 的等值线,圈定了一个重力异常低值区. 这个低值区的走向,在闭合部的局部负异常处为SN向,往西在文登处转为EW向. 胶北地块是一个以郭家店为中心的闭合局部负异常,极小值达到 -8×10^{-5} m/s²,走向NNE. 在此局部负异常周围低值区的走向为NNE向,往北在招远处转为EW向,在栖霞以北受艾山剪切带控制,转为近SN向向北延伸. 在此重力异常低值区的周围围绕着4条重力高值带:西部重力高值带由莱州西南以近SN向向北延伸,在莱州处转为NE向,经三山岛西部海域至蓬莱西北部海域与烟台经蓬莱的NWW向重力高值带相交;南部重力高值带由济南以近ES向东延至青岛,与青岛之东沿海滨呈NE向向NE延伸的重力高值带相接. 在上述低值区和高值带之间存在2个非常明显的重力梯级带:东侧梯级带与招远—平度剪切带吻合,西侧梯级带反映岩体与围岩的接触界线,说明花岗质杂岩体的形成和分布与剪切带的演化密切相关. 胶西北隆起中的局部负异常主要是由玲珑花岗质杂岩体引起,该岩体厚薄不一,其最大厚度发育在南部,为8 km,而岩体西北部最薄处厚度不及1 km[6].

剩余重力异常主要突出地壳浅部组成、结构和构造的横向不均一性. 胶东地区剩余重力异常呈似等轴状,总体呈NE向展布. 其中胶西北隆起主体是一个以莱州为中心的走向NE的闭合局部异常区,在此异常区南东为一个以莱阳为中心的走向EW的异常区,北东为一个以烟台为中心的走向近SN的异常区. 胶莱坳陷中局部异常区走向近EW,牟平—即墨构造混杂带中局部异常区走向为NNW. 胶南地块中异常区走向NE. 在这些异常区之间为梯级带,与地壳浅部次级剪切带吻合(图2b).

1.2 磁场

磁异常主要反映中、上地壳中磁化率界面和磁性体的作用. 胶东地区航磁场比重力场变化复杂得多,幅值变化也大. 为分别获取深部和浅部结构信息,利用胶东及其邻区1∶10万航磁异常测量成果①,在数字化基础上,运用频率域滤波方法,区分磁异常位场数据的深源场(低频)和浅源场(高频)信息.

胶东地区航磁场变化复杂,但总体上处于NE向低—负磁异常区,而正磁异常主要沿深大断裂和剪切带规律性延伸(图3).

深部磁场变化规律非常明显,主要包括一个巨大的闭合负异常块体和两侧的正异常以及其间的梯级带(图3a). 胶北地块主体表现为一个巨大的闭合负异常块体,从烟台南东—直向NW延伸至五莲—荣成断裂带北面,其两侧为正异常分布区及其间的梯级带. 这一块体包括4个闭合的局部负异常,其中胶西北隆起2个NE向闭合局部负异常,呈近EW向展布,与基底构造——栖霞复背斜走向一致. 胶莱坳陷由北部1个近等轴状和南部1个NE向的闭合局部负异常相连组成. 此外,蓬莱西面存在一个走向近SN的闭合局部负异常,蓬莱—烟台—栖霞之间为近SN向的闭合局部正异常,可能与艾山剪切带为郭家岭岩体壳幔岩浆对流侵位中心,地幔玄武岩侵入到下地壳有关[7]. 牟平—即墨构造混杂带表现为东部一个走向NE的闭合局部负异常和西部平缓的梯级带. 胶南地块为走向NE的不规则状正异常,有向SW升高增大的趋势,它与胶北地块之间为变化急剧的梯级带,与五莲—荣成断裂走向一致.

浅部磁场变化复杂,但总体上NE向展布特征

维普资讯 http://www.cqvip.com

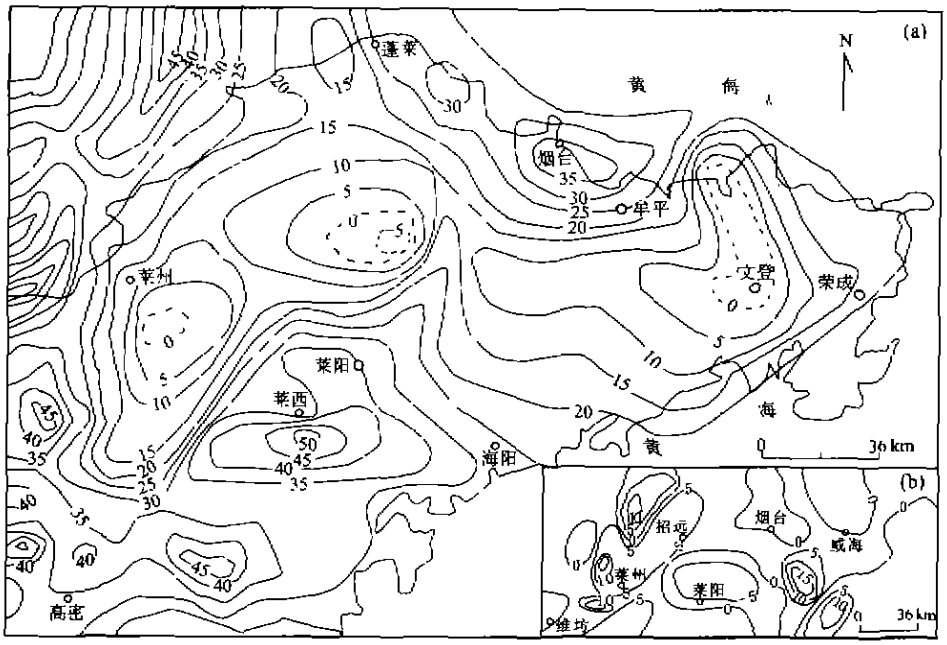


图 2　胶东及邻区布格重力异常(据 1∶20 万山东省胶东地区布格重力 Δg 等值线平面图[4]编制)

Fig. 2　Bouguer gravity anomaly in Jiaodong and neighboring region, Shandong Province

a. 布格重力异常，等值线间距 5×10^{-5} m/s²；b. 剩余重力异常，等值线间距 5×10^{-3} m/s²

明显，且与浅部构造分区和剪切带分布极为吻合. 郯庐断裂、牟平—即墨断裂、五莲—荣成断裂、三山岛剪切带、黄掖剪切带、招平剪切带和艾山剪切带均表现为明显的磁异常梯级带(3b).

比较航磁异常图、重力异常图与地质图可以发现：磁异常及重力异常低值区与花岗质杂岩体的露头范围相当吻合，而高值异常与变质杂岩体的露头范围较为一致；但磁异常低值区范围比重力异常低值区稍大，表明局部航磁和重力低值异常由花岗质杂岩体引起，高值异常由变质杂岩体引起. 在花岗岩体中存在变质岩残留体已由叠加在平缓负磁场上的局部正异常所证实[8]，而由花岗岩区大片正磁异常可推知其下存在隐伏结晶基底变质杂岩. 牟平—即墨构造混杂带以及胶莱坳陷中河头店和莱阳的重力高及宽缓的正磁异常场表明，结晶基底变质岩向南倾伏于中—新生界盖层之下. 莱西与河头店之间重力低、磁力低特征区为中生界坳陷盆地中心，向南为望城重力高、磁力高特征区，推知中生界盖层逐渐变薄. 胶莱坳陷内两个重力高特征区等值线北密南疏的趋势，以及北陡南缓的磁场特征，反映胶莱坳陷内基底形态呈南北向波浪起伏，反演结果表明河头店基底深 0.5 km，向南逐渐加深到 2 km，莱西基底 1.4 km，向南逐渐加深到 2.3 km[8].

应该指出的是，深大断裂和剪切带以及胶西北隆起与胶莱坳陷之间的分界构造带，不仅在浅部磁场中有明显显示，而且在深部磁场和重力场中也表现为明显的梯级带，反映了其贯通性，尤其是受艾山剪切带控制的艾山岩体所处部位在磁场和重力场中均表现为与周围环境明显不同的高值异常闭合区，说明了其构造部位的特殊性.

1.3　地震各向异性

地震波速各向异性研究结果表明[9]：胶东及其邻区天然地震近震首波 P_n 残差由西向东逐渐减小，反映了地壳厚度和平均波速的差异性，说明地壳厚度从西向东逐渐减小，而平均波速逐渐增大. 视速度 v_{P_n} 在 310°左右为最大，70°方向最小，表明其上地幔存在约 8%的波速各向异性，对称轴方位近 NW，揭示了大陆地壳和岩石圈地幔结构的不均一性.

2　深部成矿作用

区域地球物理场的空间分布是结晶基底的岩石建造和后期不同时期构造演化的综合反映，矿集区地球物理异常形态、走向的复杂变化表征了其强烈的构造活动特征，说明它经历了多期构造—热活动的改造叠加. 成矿带所具有的定向性或定位性，以及

维普资讯 http://www.cqvip.com

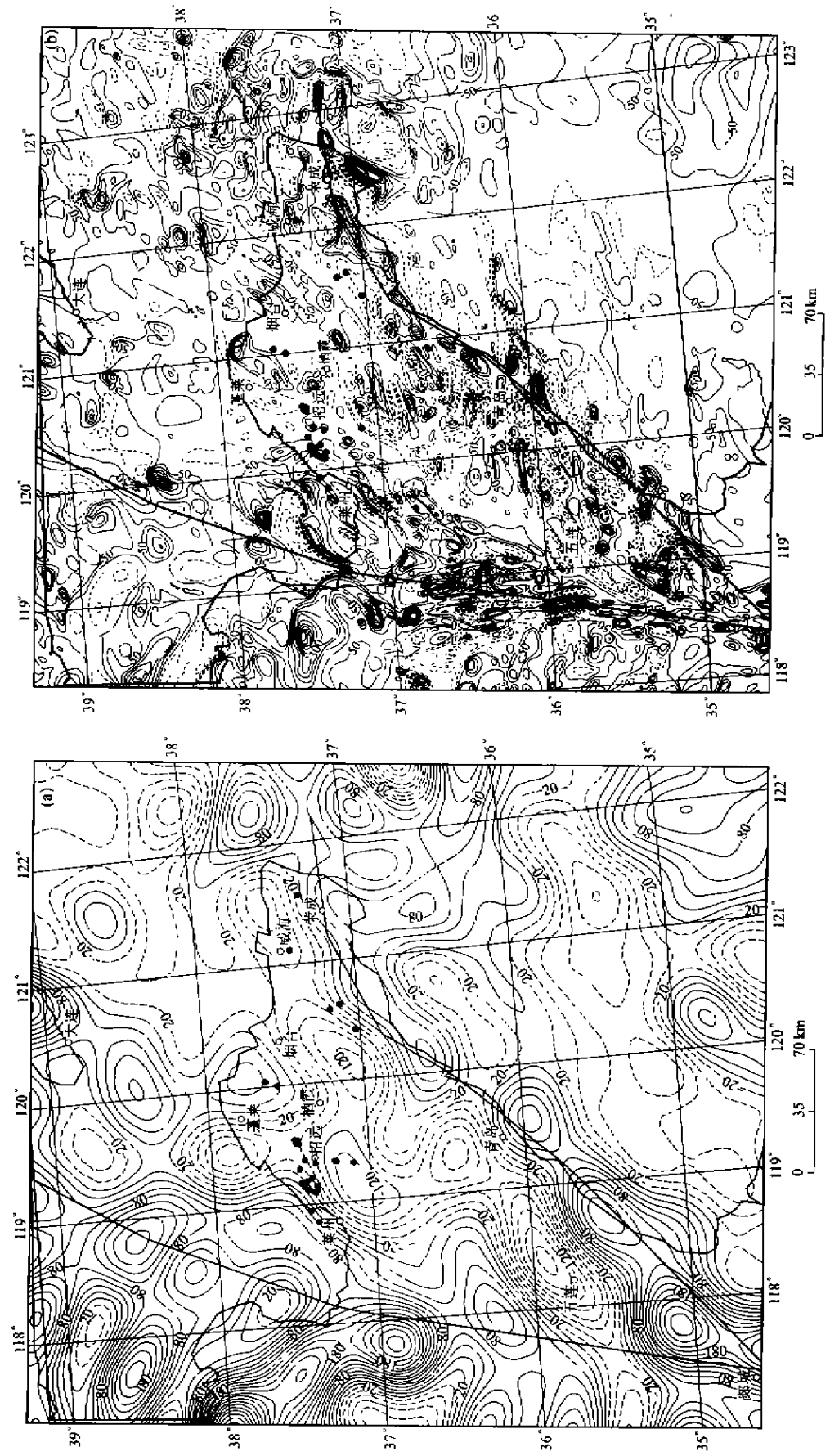


图3 胶东及邻区航磁异常(据1∶10万山东中部及东部航空磁测ΔT平面剖面图T编制)

Fig. 3 Aeromagnetic anomaly in Jiaodong and neighboring region, Shandong Province

a. 深部磁异常,等值线间距20 nT; b. 浅部磁异常,等值线间距50 nT; • 金矿床(点)

维普资讯 http://www.cqvip.com

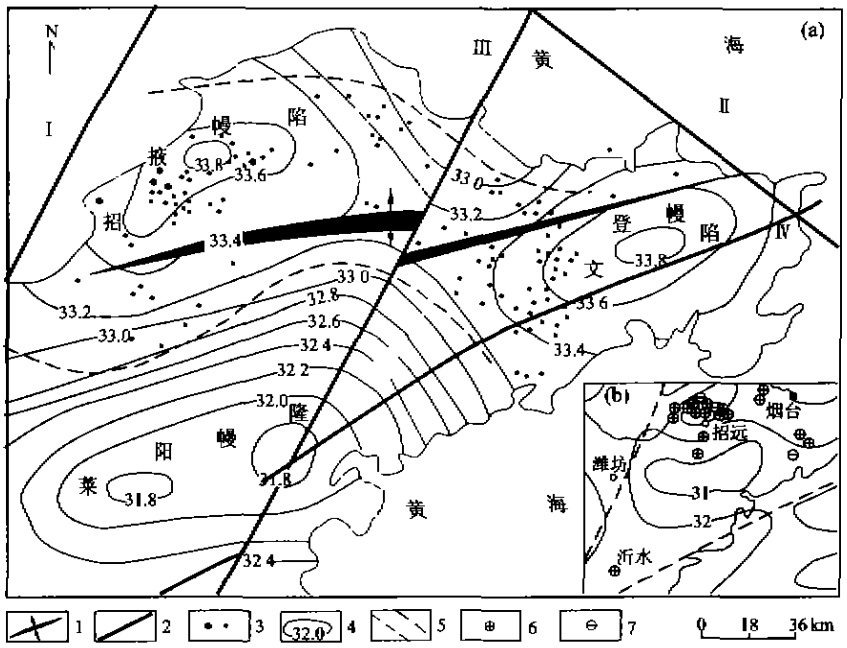


图 4　胶东及邻区深部结构与金矿床(点)分布

Fig. 4　Distribution of gold ore deposits and deep structures in Jiaodong area, Shandong Province

a. 胶东地区;b. 胶东及邻区;Ⅰ. 郯庐断裂;Ⅱ. 秦皇岛—威海断裂;Ⅲ. 牟平—即墨断裂;Ⅳ. 五莲—荣成断裂;1. 复背斜;2. 深断裂;3. 金矿床(点);4. 莫霍面深度,km;5. 胶东金矿集中区分布范围;6. 蚀变岩型金矿床;7. 石英脉型金矿床

构造单元之间的界线与重、磁异常梯级带明显一致,反映了深部作用对区域构造和金矿床形成、演化及分布的控制.

2.1　深部结构聚矿功能

矿集区的形成和演化与深部壳—幔结构有关.下地壳低速层和软流圈结构横向上的强烈不均一性,导致莫霍面呈波状起伏和上地幔物质上涌.而地壳—上地幔在不同尺度范围内具有软硬相间的格架,以及上地幔复杂的层状—块断构造、地幔塑性流动网络和深部各界面在纵向上和横向上的极度不均一性,制约着成矿系统物质和能量的交换—反馈耦合,反映在其结构、构造和演化等多个方面.

按照地壳均衡理论,地壳厚度与地表大型隆起区和坳陷区相间的构造特征对应.地表隆起区对应于莫霍面坳陷区,地表坳陷区对应于莫霍面隆起区,即深部构造与浅部构造相反相成.胶东矿集区为相对于周边的 NE 向地幔隆起带中走向近 EW 的坳陷区,莫霍面深度一般在 33 km 左右,而局部隆起区不足 32 km.与胶莱盆地对应的莱阳幔隆中莫霍面深度最小,围绕莱阳幔隆,幔陷区呈弧形带状展布,与栖霞复背斜轴部的花岗岩基相对应,并形成 2 个中心:招掖幔陷和文登幔陷,分别对应于胶西北隆起和牟平—即墨构造混杂带.而深大断裂和剪切带均处于莫霍面隆起带或斜坡带上,明显反映出深部结构对其活动方式和空间展布的控制作用.

华北地区岩石圈厚度在世界各正常大陆地区最薄.软流圈上隆、幔内低速体的宏观形态为"蘑菇云状",为低速体从 150 km 深度下沿幔内薄弱带呈不规则柱状体上升,并在 5～130 km 处向四周延展所致,而郯庐断裂带及燕山地区低速体上升最为明显[10,11].下地壳低速层在 20 km 处普遍存在(厚度约 5～8 km)[10],反映了地壳内部介质不均一性分布特征.低速层的底部和顶部是壳内介质极度不均一的地方,此处应力集中,物质、能量交换频繁,是控制矿集区形成、演化的关键深部结构原因.

矿集区莫霍面呈波状起伏,金矿床(点)往往产于幔隆与幔坳过渡转换带的地壳增厚处(33.6～33.8 km)、莫霍面的梯度变化处或变形部位,表现为不同构造部位金成矿系统的聚矿功能不同.它既与幔隆及幔坳的交替产出紧密相连,也与深断裂对莫霍面的影响关系密切,反映了后期构造的叠加效应.幔坳四周与幔隆接触地带是基底上隆最显著、基底构造最发育、升降运动最频繁、且升降幅度最大的构造活动带,同时也是盖层构造最发育地带;其深—浅物质

维普资讯 http://www.cqvip.com

和能量交换一反馈耦合成矿条件最佳，成矿强度大. 而幔隆区的局部隆起部位基底下凹，地表为沉积盆地，具有厚层的中、新生代沉积，金的成矿强度明显小于其他地段(图4).

2.2 深部构造成矿作用

矿集区成岩一成矿作用受地幔剪切带及深部流体控制，构造体制转换是壳一幔成矿物质活化、运移，并在浅部聚集以至成矿的基本动力学保障. 深部构造分区的边界与盖层区域性构造基本一致，说明深部结构控制了作为断块边界的深大断裂，但与块体内的浅部次级剪切带并不显示明显相关性.

金矿床主要分布于重力异常梯级带附近和磁异常低值区边缘，即花岗岩变薄部位与变质岩的接触带上，这有3个方面的原因：(1)此处基底抬升最高，而结晶基底的构造与地壳、上地幔的组成和结构密切相关，成矿物质来源最为丰富；(2)基底上升剧烈，是构造应力集中地带，深大断裂和剪切带发育，它们长期活动、上下沟通，导致成矿物质(含流体和元素)由深层向浅层集中，而且距矿源场近，是有利的成矿输运场；(3)剪切带和断裂构造纵横交错、相互叠加，常形成有利的储矿场.

由于岩石圈厚度长期减薄，古老的岩石圈根被薄的、热的、亏损程度低的岩石圈地幔取代，其下富含流体组分和成矿组分的软流圈得以形成[12]. 在地幔演化过程中，富含地幔流体的幔内剪切带不仅具有深部热流和热质传输通道的作用，其内也发生流体一热一化学一物理(机械)耦合.

中、新生代板块俯冲挤压、地幔上隆，导致幔隆与幔坳交替产出，其实质是深部地质构造特征的显示，莫霍面坳陷区与挤压构造体制紧密相关，幔坳后的局部变形则与拉张环境相互关联. 印支中晚期郯庐断裂带深切上地幔，将岩石圈中的地幔薄弱带连接成树枝状网络，为新生软流体上升提供了良好的通道，打破了岩石圈原有的"平衡"，出现强烈的热、化学、流体及应力不平衡，其内有大规模流体渗入，并通过壳一幔相互作用，将含矿流体系统输运到更高的层位，蚀变、矿化作用发生，在扩容部位成矿元素聚集、沉淀而成矿. 在早期(230～150 Ma)挤压体制下，从地幔到地壳发生了强烈的质量转移，形成花岗岩化带，而在上部层位开始产生花岗片麻岩穹隆. 在此过程中，Au^0 氧化为 Au^+，从岩石中溶出硫化物和 Au^+ 络合. 随着深断裂切割加深，其发育程度和构造体制向张剪性转换，深源物质侵位于早期挤压体制下形成的花岗片麻岩穹隆，从而发生成矿组分的预富集作用. 晚期转变为应力松弛阶段(135～110 Ma)，由于剪切带向上变窄，引起流体聚积及流体压力 p_f 增高. 当 $p_f > \sigma_n + R_t$ 时(σ_n 为载荷压力或正应力，R_t 为抗张强度)，引起岩石破裂，产生构造扩容空间，使之成为构造低压区，并被流体充填，形成含金石英脉或蚀变岩. 随着 p_f 下降，流体继续积聚，重新开始上述过程，如此循环往复、周而复始地运移、积聚，从而形成广泛的蚀变与矿化.

研究工作自始至终得到翟裕生院士的指导，翟裕生院士审阅了论文初稿，并提出重要修改意见，滕吉文院士和闫雅芬研究员提供了指导与帮助. 作者对他们的指导与关心，表示衷心的感谢!

参考文献：

[1] 陈毓川. 中国主要成矿区带矿产资源远景评价[M]. 北京：地质出版社，1999. 101～303.

[2] 刘光鼎，郝天姚. 应用地球物理方法寻找隐伏矿床[J]. 地球物理学报，1995，38(6)：850～854.

[3] 梁德超，杨立强，邓军. 地面高精度磁法测量找金应用[J]. 地球学报，1999，20(3)：294～301.

[4] 顾留成，万国普，段林祥，等. 胶东破碎带蚀变岩型金矿床的地质一地球物理一地球化学模型及评价指标研究[A]. 见：山东省地质矿产局编. 山东地质矿产研究文集[C]. 济南：山东科学技术出版社，1996. 178～193.

[5] 李冶华. 华北地台地球物理场、深部构造和金矿床[J]. 物探与化探，1987，11(6)：408～415.

[6] 曾华霖，万天丰，Teyssier C，等. 山东玲珑花岗杂岩体三维形态的重力模拟[J]. 地球科学——中国地质大学学报，1999，24(6)：607～612.

[7] 曲晓明，王鹤年. 郭家岭岩体壳幔岩浆混合作用与侵位机制的动力学研究[J]. 地质科学，1997，32(4)：445～454.

[8] 彭聪. 山东招平断裂带南段金矿成矿地质背景的地球物理研究[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊，1994，1：139～145.

[9] 王良书，李成，薛革，等. 山东及邻区上地幔波速各向异性及动力学意义[J]. 地质科学，2000，35(1)：40～46.

[10] 魏斯禹，滕吉文，王谦身，等. 中国东部大陆边缘地带的岩石圈结构与动力学[M]. 北京：科学出版社，1990. 1～188.

[11] 孙继源. 华北地区板内构造及深部过程初探[J]. 地质科技情报，1992，11(1)：4～13.

[12] 邓军，杨立强，方云，等. 胶东地区壳一幔作用与金成矿效应[J]. 地质科学，2000，35(1)：60～70.

维普资讯 http://www.cqvip.com

LITHOSPHERIC STRUCTURE AND DEEP-SEATED MINERALIZATION IN JIAODONG GOLD DEPOSIT CONCENTRATION REGION, SHANDONG, CHINA

Yang Liqiang[1] Wang Guangjie[1] Zhang Zhongjie[1] Deng Jun[2] Zhao Aihua[1] Wang Jianping[2]
(1. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100101, *China*; 2. *Faculty of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: The information of geophysical field was, based on the results of 1 : 1 000 00 aeromagnetic anomaly and 1 : 2 000 00 Bouguer gravity anomaly in Jiaodong and its neighboring regions, Shandong, China, divided into two parts: deep- and shallow-focus field. The information of the two different fields was then combined with these of wave velocity anisotropy and deep-seated geology. The integrated result was adapted to the analysis of the three-dimension structure, the probe into deep-seated mineralization and the dynamics of ore-forming system. This research indicated that the interaction and conversion of materials and energy in the ore-forming system were restricted by the heterogeneity of lithospheric structure, resulting in effects in different aspects, such as texture, tectonics and evolution. The occurrences and processes of deposit concentration region in Jiaodong were basically controlled by the transformation of tectonic regimes. The deposit concentration region is located in the down-warping area of the mantle upwelling zone, but gold deposits are located in gradient-variation and deformation places of Mobole. The major mineralization intensity is located at the junction between down-warping and upward region, while the minor one is located in the upward district of the upward region. The down-warping area of the mantle is related to the tectonic regime of compression, but the local deformation following the down warping is connected with the tectonic regime of extension. The gold deposits, controlled by large deep-seated faults and shear belts, are mainly distributed near the gradient belts of gravity anomaly and the brink of sub-aeromagnetic anomaly regions, the junction between thinning positions of granites and metamorphic rocks. The Tancheng-Lujiang fault is a mature lithosphere fault of deep mantle-cut, and also a fluid-bearing mantle shear zone. Because of long-term reduction of lithospheric thickness, the asthenosphere enriched with fluid components and metallogenic elements, occurred under the Tancheng-Lujiang fault where occurred the coupling of fluid-heat-chemistry-physics. The shear-anatexis of the fault was responsible for the lithogenesis and mineralization, and also for the ore-forming reactivation and migration. The mantle ore-fluid system was migrated to the upper horizon through this solution divergence and migration along the Tancheng-Lujiang fault in the middle-late Indo-Chinese epoch when the alteration and mineralization took place. The uniqueness of the tectonic position of the Aishan pluton shows that the Aishan pluton might be the center of the convection and intrusion displacement of the crustal-mantle magma.

Key words: geophysical field; lithosphere structure; deep-seated effect; mineralization dynamics; deposit concentration area in Jiaodong; Shandong Province.