

矿田构造变形岩相分类与应用效果

吕古贤¹, 张宝林^{2,3,4}, 胡宝群⁵, 王宗永⁶, 刘建民¹, 郭涛¹, 申玉科¹, 韦昌山¹,
许德如^{7,8}, 杨兴科⁹, 焦建刚⁹, 王翠芝¹⁰, 毕珉峰¹¹, 马立成¹
LÜ Guxian¹, ZHANG Baolin^{2,3,4}, HU Baoqun⁵, WANG Zongyong⁶, LIU Jianmin¹, GUO Tao¹,
SHEN Yuke¹, WEI Changshan¹, XU Deru^{7,8}, YANG Xingke⁹, JIAO Jiangang⁹, WANG Cuizhi¹⁰,
BI Minfeng¹¹, MA Licheng¹

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
 2. 中国科学院矿产资源研究重点实验室/中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
 3. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;
 4. 中国科学院大学, 北京 100049;
 5. 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013;
 6. 兰州财经大学, 甘肃 兰州 730000;
 7. 中国科学院广州地球化学研究所矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640;
 8. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013;
 9. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710064;
 10. 福州大学紫金矿业学院, 福建 福州 350108;
 11. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037
1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;
 2. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics/Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
 3. Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
 5. School of Earth Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;
 6. Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730000, Gansu, China;
 7. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;
 8. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China;
 9. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
 10. School of Zijin Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;
 11. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要:矿田相当于V级成矿区带的地质找矿勘查对象,需要研究“构造与建造共生”的地质现象,建立相应的概念和野外观测方法,有别于“沉积构造岩相”、“岩浆岩相”、“变质岩相”、“大地构造相”、“构造岩相”、“构造相”等理论观点。在长期矿田构造和深部外围找矿实践基础上,研究提出“构造变形岩相”的地质概念。构造变形岩相被理解为“显示构造变形的那部分岩

收稿日期:2020-03-05;修订日期:2020-06-20

资助项目:原冶金部玲珑金矿科研项目《胶东西北部典型金矿带、金矿田构造控岩控矿与成岩成矿地质特征研究》(编号:L-95-01)、国家攻关项目课题《胶东花岗岩-绿岩带金矿地质地球化学特征与找矿方向》(编号:0051-01)、国家计委青年科技找矿项目《金矿重点矿化区带隐伏矿床找矿方法和预测》(编号:G947110)、国家计委青年科技找矿项目课题《焦家金矿隐伏矿床构造物化探预测和构造物理化学研究》(编号:G947110-2)和全国危机矿山接替资源找矿项目《玲珑金矿和新城金矿深部预测的矿田构造研究》(编号:00799095)

作者简介:吕古贤(1949-),男,博士,研究员,从事矿田构造及构造岩相研究。E-mail:lvguxian@126.com

相”,是喻示受构造影响的那部分(沉积、岩浆和变质地质作用的)岩相,是包含构造变形及建造特征的地质实体,或构造建造形迹。构造变形岩相,是岩石形变和相变密切共生的地质体,既能反映成岩地质环境又包含成岩物理化学条件,是一种适用于开展“构造结合建造”观测和分析的构造岩石单元。依据地质作用类型,划分了4种矿田构造变形岩相:沉积构造变形岩相、岩浆构造变形岩相、变质构造变形岩相和复成构造变形岩相。根据地质亚相,划分了矿田尺度的27类构造变形岩相。建立矿田构造变形岩相的观测和分析方法,不仅推动了构造结合建造的地质调查和研究,而且为矿田构造向矿田地质学的发展奠定了基础。构造变形岩相研究,用1:1000~1:50000不同精度,可以调查几十至几百平方千米范围的地质找矿问题,直接服务于已知矿床的深部外围找矿。地表结合中段大比例尺填图,三维刻画矿化岩相带的分布特征,成为圈定靶区的最佳途径。在“就矿找矿”的基础上,探讨了中距离找矿的预测方向——构造变形岩相界面成矿带。

关键词:构造结合建造;构造变形岩相;构造变形岩相概念;构造变形岩相分类

中图分类号:P613 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)11-1669-12

Lü G X, Zhang B L, Hu B Q, Wang Z Y, Liu J M, Guo T, Shen Y K, Wei C S, Xu D R, Yang X K, Jiao J G, Wang C Z, Bi M F, Ma L C. Classification and application effect of structural deformation lithofacies in the orefield. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(11): 1669-1680

Abstract: The orefield is equivalent to the grade V metallogenic belt of geological exploration object. It is necessary to study the geological phenomenon of "structure and construction association" and establish the corresponding concept and field observation method. It is different from the theoretical viewpoints of "sedimentary tectonic lithofacies", "magmatic lithofacies", "metamorphic lithofacies", "geotectonic facies", "tectonic lithofacies" and "tectonic facies". On the basis of long-term orefield structure and deep peripheral ore prospecting practice, the geological concept of "tectonic deformation lithofacies" is proposed in this paper. Tectonic deformation lithofacies is regarded as "a part of lithofacies showing structural deformation", which indicates the part of lithofacies (sedimentary, magmatic and metamorphic geological processes) affected by structure. It is a geological entity containing structural deformation and formation characteristics or structural formation features. Tectonic deformation lithofacies is a geological body closely associated with rock deformation and phase transformation. It can not only reflect the geological environment of diagenesis but also contain the physical and chemical conditions of diagenesis. It is a kind of structural rock unit suitable for observation and analysis of "structure combined construction". According to the types of geological processes, four types of tectonic deformation lithofacies are recognized: sedimentary structural deformation lithofacies, magmatic tectonic deformation lithofacies, metamorphic structural deformation lithofacies and composite structural deformation lithofacies. According to the geological subfacies, 27 types of tectonic deformation lithofacies at the orefield scale are distinguished. The establishment of observation and analysis methods of structural deformation lithofacies in the orefield not only promotes the geological investigation and study of structural combination construction but also lays a foundation for the development of orefield structure to orefield geology. With different precision from 1:1000~1:50000, tectonic deformation lithofacies can be used to investigate geological prospecting problems in the range of tens to hundreds of km², directly serving the deep peripheral prospecting of known deposits. The best way to delineate the target area is to depict the distribution characteristics of mineralized lithofacies zones from the surface and large-scale mapping in the middle section. On the basis of "prospecting on the basis of ore", this paper discusses the prediction direction of medium distance ore prospecting, that is, the metallogenic belt of tectonic deformation lithofacies interface.

Key words: structural combination construction; tectonic deformation lithofacies; concept of tectonic deformation lithofacies; lithofacies classification of tectonic deformation

“构造与建造共生”是广泛发育的地质规律和长期研究的领域,对于地质调查和深部外围找矿的意义重大^[1]。但是,不仅“构造力能否影响化学平衡”的理论基础仍存在争论,同时,适用于“构造结合建造”的地质工作方法尚待建立。前人对此进行了长期探索,“变质相分带”和“应力矿物”^[2]、“槽台说”的构造-建造组合、“构造共生组合”、“构造相”^[3]、“变形-化学共生组合”^[4]、“构造-岩相

带”^[5]、“构造形质”^[6]、“构造动力成岩成矿”^[7]和“构造变形与变质”^[8]相关性研究等都取得了重要进展。

关于“构造与建造共生”领域的地质体及其概念,应该具备的前提条件有:①需要同时涵盖岩石的构造特征和建造组成;②与其他概念有明显的区别;③能够揭示岩石的地球化学组成和物理化学环境;④适应于室内外的地质研究和勘查工作。综

合前人研究成果,继承“构造形质”的观点^[9]和“构造-岩相带”^[10]的工作,提出“构造变形岩相”实体和概念^[11]。构造变形岩相,可以简称为“构造岩相”。显然,用它既可以进行构造形变、应力和运动学观测,有利于地球化学分布变化和流体成分与过程的研究,又能够控制同位素地球化学研究,是矿田层次的大比例尺地质工作方法新探讨。

本文回顾了岩相、沉积岩的构造岩相、变质岩相、岩浆岩相、构造相、构造变形岩相等研究历程,展示构造变形岩相的研究思路,提出较系统的“构造变形岩相”分类。

1 构造变形岩相的研究背景

“构造结合建造”是地质学长期研究的课题,产生了众多的重要进展和重大成果,例如应力矿物、构造地球化学、构造成岩成矿等^[1]。

构造地球化学产生在构造作用与岩石地球化学相关的交叉领域。将构造作用与岩石成分变化联系起来的的思想由来已久^[12],通常分别将应力矿物和岩石组构的变化归因于构造作用。Niggli 在变质岩相方面把温度和压力统一起来研究^[13]。王嘉荫^[14]运算了化学反应中体积变化的压力,探讨应力矿物形成问题。李四光^[15]认为受力岩石既有“形变”也有“形质”的变化。陈国达^[16]组建了大地构造与地球化学研究室,广泛开展构造地球化学研究。李四光^[17-18]认为“结构要素需要结合岩相大大地加以补充”,提出与构造形变对应的构造“形质”的概念,提倡“构造结合建造”和“构造结合岩相”的研究方向。涂光炽等^[5]完成了“祁连山构造-岩相带”的地质实践,研究大地构造、沉积学和沉积岩、变质岩、岩浆岩层次的“构造岩相”。卢金^[19]进行了岩浆后期矿床构造的地质填图。

李四光倡导“构造结合建造”的研究方向^[9],但尚缺乏“构造结合建造”和“构造地球化学”的地质概念和野外观测方法。在“形变”和“形质”概念基础上,笔者提出了“构造变形岩相形迹”的概念。这一概念既涵盖构造和建造两方面内容,又适用于室内和野外地质研究,具备野外地质工作的可操作性,为“构造结合建造”和“构造地球化学”研究领域提出了地质调查和地质研究的实用方法。对于研究岩相的相关概念,简单叙述如下。

(1)岩相:在地质学中,岩相是应用广泛的名

词。岩相泛指岩石的面貌,包括岩石的岩性组成、矿物含量、形态分布、形成时的地质与物理化学环境条件等特征。按照地质作用的不同,具体还分为沉积岩相、岩浆岩相、变质岩相等类别。此外,利用各种测试手段,观测和分析岩石的物相组成和显微结构,揭示形成条件等,还形成一个岩相概念。

(2)沉积构造岩相:指沉积岩生成时的自然环境物质成分、结构构造形态,以及所含生物特征等的总体表现。例如,应用构造-岩性-岩相填图开展的陆相红盆内部结构构造界面、岩性、岩相特征,建立地层系统。

(3)变质岩相:从岩石学意义上引用了浅变质带(浅变带)、绿片岩变质带(中变带)及角闪石和麻粒岩变质带(深变带)的术语。

(4)构造-岩相:涂光炽在美国开展过应力矿物的实验研究,学习了前苏联构造-岩相学说,20世纪50年代参加了祁连山的构造-岩相带研究^[5],为构造地球化学研究奠定了基础。

(5)构造相学说:前苏联地质学家提出“构造相”地质实体和地质概念^[3]。作为构造-建造共生研究的基础,“构造相”理论方法要求既研究构造,又分析相应岩石矿物地球化学组成,而且探讨形成过程的 $p-t$ 条件。“构造相”不仅对于提高地质现象的研究水平富有成效,而且是“建造结合构造分析”的概念。该学说分为:①地壳岩石垂直流变和构造分带的构造相学说,褶皱区完整的地壳剖面自上而下可以划出浅部带、中变带和深变带,岩石变形作用和变质作用可以进行同步对比,在构造相分析与变质成矿作用研究之间架起了一座桥梁。②劈理带的构造相学说,研究人员确认了中变带发育缝合线状裂隙-褶皱带,把断裂裂隙错动作为韧性剪切过程。认为它们不是地壳侧向压缩所致,而是局部断裂裂隙-揉皱的结果。所有8种褶皱变形类型均表明,构造缝-褶皱作用是3个次级构造相 $p-t$ 带的主导要素。③运动学和 $p-t$ 过程的构造相学说,提出局部构造相即构造-建造共生的分析方法,既研究构造过程,又探讨 $p-t$ 条件的过程。这种方法对提高地质现象研究深度富有成效,而且把建造-构造分析的概念具体化。④构造-变质-成矿作用的构造相学说,认为构造相级别越高,变形强度及变质作用程度也会越高,且提出褶皱区的构造-变质-成矿作用的实例,如浅变质带的南哈萨克斯坦卡套

地区海西期杂岩的构造相及其铅锌矿化作用,中变质带的穆龙套矿区构造相及其金矿化作用,深变质带构造相及其相关碱性交代岩的稀有金属成矿规律和成矿远景。

(6)大地构造相:20 世纪大地构造相研究兴起,出现了不同概念和认识,认为碰撞陆块、俯冲陆块和大洋岩石圈残余,形成典型的大地构造岩相叠加形成碰撞造山带的认识^[20];并“具有类似的内部构造的岩石构造组合在相似的环境中形成的,经历了相似的变形与就位作用”的定义。大地构造相分类的三级要素,即动力学要素、大地构造环境和构造与岩石组合^[21],认为构造变形形式是大地构造相的基础;根据青藏地区地质特点,提出大地构造相是反映陆块区和造山系(带)形成演变过程中,在特定演化阶段、构造部位的大地构造环境中形成的一套岩石-构造组合,是表达大陆岩石圈板块经过离散、聚合、碰撞、旋转等动力学过程而形成的地质构造作用的综合产物,具有恢复与揭示陆块区和造山带的组成、结构、演化与成矿地质背景的功能^[22]。

(7)构造岩相学:在矿山深部和外围找矿领域,方维萱等^[23-24]开展了长期深入的构造岩相填图,实践大比例尺填图和找矿,建立系统的“构造岩相学”理论与方法系统。他们认为,构造岩相学是在一定时间-空间结构上,岩石组合类型及这些岩石特征代表的构造-地质环境和条件的综合反映。构造岩相学包括岩相、亚相和微相类型,主要从不同层次进行研究,即大地构造岩相学、区域构造岩相学、矿田构造岩相学、矿床构造岩相学、显微构造岩相学 6 种不同尺度,其核心是围绕成岩成矿作用系统形成的大陆动力学背景和找矿预测进行研究。

(8)构造变形岩相:在金属矿矿田构造研究中,能够揭示金属矿形成的地质和物理化学环境与条件的构造建造形迹。“构造岩相”已经被使用,但是,与已经广为应用的构造岩相的含义显然不同,矿田-矿床研究尺度的“构造变形岩相”,是显示构造变形的那部分岩相,是喻示受构造影响的那部分(沉积、岩浆和变质地质作用的)岩相,是包含构造变形及建造特征的地质实体和地质形迹,也是反映岩石矿物地球化学组成与岩石变形及其应力应变构造密切相关的地质体。构造变形岩相既能反映成岩地质环境,又包含成岩物理化学条件,是一种适用于开展“构造结合建造”观测和分析的构造岩

石单元。但矿田构造研究理论方法的研究尚较薄弱。为了兼顾建造研究,必须加强构造变形岩相研究。

在金属内生矿矿田地质研究过程中,吕古贤^[11]提出矿田-矿床研究尺度的“构造变形岩相”概念。“构造变形岩相”,在提高矿田大比例尺的地质调查与勘查方面意义重大,但需要更加深入和发展。同时,在“就矿找矿”的基础上,探讨了一种中距离找矿的预测方向——构造变形岩相界面成矿带。

2 构造变形岩相的概念

构造变形岩相是显示构造变形的那部分(沉积、岩浆和变质地质作用的)岩相,也能反映地壳岩石变形与成分变化密切共生的地质实体。构造变形岩相既反映形成的构造应力场特点,也显示形成的地球化学特征,又能揭示形成的物理化学条件。研究构造变形岩相形迹,可以同时分析地质作用的物理学、化学和物理化学特征。

构造变形岩相,适用于进行“构造结合建造”的观测与研究,可用于多层次和透入性的构造、体积性的地球化学成分及流体状态过程的分析。它以变形为特征而明显区别于其他的相似概念,特别适用于矿田矿区和矿床的大比例尺研究和找矿工作,能够被用于多层次和多角度的测试与分析。借助地质力学理论观点,构造变形岩相的野外与室内地质观测,将更深入、更全面地研究地质过程、成矿规律和动力学背景,进一步提高环境、灾害、能源等领域的科技创新的水平。

构造变形岩相的逐步建立和发展,是以胶东金矿研究基地的持续地质实践,以及豫西钼矿、相山铀矿、赣南钨矿和长江中下游铁铜矿的矿田地质研究为基础,以地质找矿理论方法难题为目标的研究结果。在矿田 1:50000、1:25000、1:10000 和 1:1000 大比例尺野外地质填图和成矿预测工作中,发展了构造变形岩相地质找矿方法。

3 构造变形岩相应应用实践和找矿预测效果

3.1 胶东金矿矿田构造变形岩相填图研究和找矿预测效果

胶东是中国最重要的黄金基地,以往累计探明金资源/储量和黄金产量均占全国 1/4 左右。胶东一些金矿开采时间超过一个世纪,浅部矿脉大部分

已经开采,矿脉深部和延长都已经尖灭,深部的勘查已经见到无矿带和弱矿带。20 世纪末,胶东成为全国最大的资源危机矿山集中地区。随着浅表矿的日益减少,寻找深部金矿成为新一轮找矿的必然选择。然而,矿山外围和浅部很少发现新的矿脉,深部钻探在 300 m 以下普遍矿化不好,甚至进入无矿段。另外,研究并且测算的成矿深度达到 4~6 km,按照全球热液矿床大部分以地壳 10 km 深度为底界推断,胶东深部的找矿勘查远景信心不足。

胶东金矿深部找矿迫在眉睫。但是仅“就矿找矿”已经不够,如果没有理论方法创新,不会有地质找矿突破。本次研究根据“构造变形岩相填图方法”研究胶东金矿^[25-26],把依靠工业矿化作为预测目标转变为把包括矿脉围岩的构造变形蚀变矿化岩带作为预测标志,将预测标志从十几米扩大到几百至上千米宽,显著提高了预测能力。此外,还创建了成矿深度的“构造校正测算方法”,在玲珑、焦家、鑫汇等矿区预测金矿的“深部第二富集带”并提出预测靶区。依靠“深部第二富集带”的理论方法,研究工作取得了隐伏金矿找矿的重要突破,推动了胶东金矿深部找矿勘查。目前,胶东金矿区储量规模已经跃居全球第三位,为中国金矿资源的勘查作出重要的贡献。

“构造变形岩相填图与找矿方法”,以胶东金矿为地质实例简介如下:确定矿床模式,建立构造岩相系统(表 1);通过构造岩相剖面的实测,具体确定蚀变岩分带特点(图 1);确立成矿构造变形蚀变分带的观测标志和图例;开展地质填图;建立矿区构造蚀变矿化岩带的三维分布框架,指导地质研究和找矿;结合工程、物探和化探勘查提出找矿方向,指出预测区带并圈定靶区。矿田构造变形岩相填图的地质研究方法,叙述如下。

(1) 建立成矿模型

胶东玲珑-焦家式金矿是产于元古宙—太古宙变质岩系内,位于中生代陆内构造岩浆活化区(活化地台)的岩浆期后热液矿床;由于控矿成矿构造的差别,表现为“玲珑型”黄铁石英英脉和“焦家型”细脉浸染状黄铁绢英质蚀变碎裂岩 2 种矿化形式,是典型构造控矿和构造动力成矿的矿床^[11, 25]。胶东金矿矿床成矿模式是,海底火山-沉积岩→区域变质花岗-绿岩带→重熔深熔花岗岩+含金气液流体+脉岩→断裂破碎带热液交代蚀变岩→断裂构

造+金矿脉。

(2) 研究矿区构造变形岩相的地质特征

把成矿模式转化为地质填图的图例系统(表 1),并且经过构造变形岩相剖面的实测进一步确定。

(3) 实测构造变形矿化蚀变分带剖面 and 确定图例

为了实现地质找矿的目标,必须以成矿阶段的构造蚀变分带研究为重点。实测构造变形岩相剖面(图 1),确定构造变形岩相分带的野外标志,进行室内观测和测试分析,确定标志矿物和矿物含量范围,建立具体蚀变分带的填图图例。

实测剖面成为实测或编制矿田、矿区构造变相岩相成矿图的基础(图 1)。胶东玲珑-焦家式金矿区的构造变形岩相的图例如下。

表 1 胶东玲珑-焦家式金矿构造变形岩相形迹及其特征
Table 1 Lithofacies features and characteristics of structural deformation of the Linglong-Jiaojia type gold deposit in Jiaodong

同位素 年龄/Ma	成岩成矿 阶段	变形岩相形迹	构造变形特征
<70	成矿后脉岩 及错动	含交代岩 碎屑碎糜状,断层泥	剪切位移带有 上盘下滑的张性
	碳酸盐石 英脉阶段	浸染状、网脉细脉状 多金属硫化物 碳酸 盐石英脉	脆性裂开,张剪,剪 张变形
	石英硫化 物阶段	珠状、长圆状砾石碎 糜状黄铁绢英岩	脆性变形,以多轨 多向运动为主
	黄铁绢英 岩阶段	杆状、片状、砾石碎 糜-糜棱状黄铁绢 英岩	脆-韧性变形,反映 单向或单轨双向构 造运动
	绢英岩 阶段	叶理状、透镜状、糜 棱状绢英岩	韧性变形叶理状 构造
70~137	硅化钾化蚀 变岩阶段	细纹状硅化、钾化花 岗质岩石	剪切流变状定向变 形细纹结构,交代 层纹构造
134~136	花岗闪 长岩	挤压相似斑状花岗 闪长岩	剪压性挤压变形域 $\alpha=0^{\circ}\sim10^{\circ}$ 组构
150~155	二长花 岗岩	引张相中粗粒等粒 二长花岗岩	引张变形域,无定 向组构具花岗岩结构
155~164	黑云母 花岗岩	压剪域似片麻状黑 云母花岗岩	压-剪性剪切变形域 $\alpha=10^{\circ}\sim35^{\circ}$ 组构
1800	斜长角闪岩、 麻粒岩、片 岩及大理岩	流皱曲,流劈理,褶 皱及劈理状角闪岩 相及绿片岩相	塑性流变,脆-韧性 变形及韧-脆性 变形

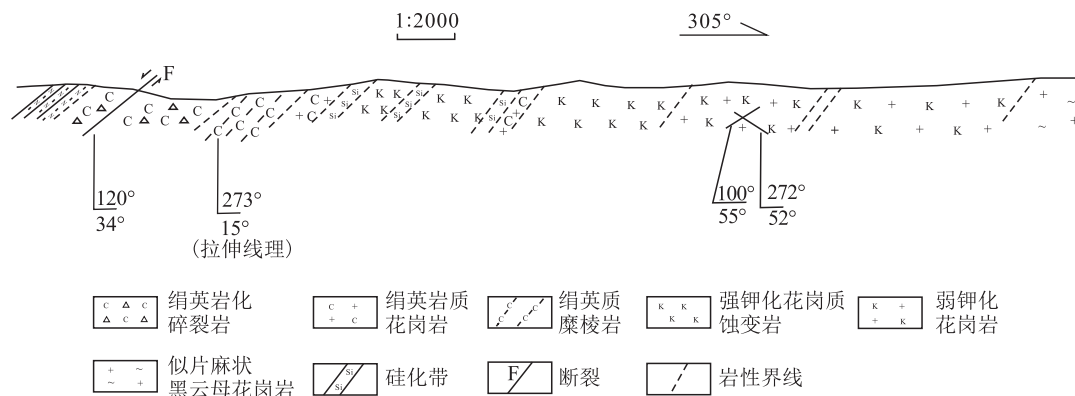


图1 构造变形岩相分带实测剖面

Fig. 1 Measured section of tectonic deformation lithofacies zoning

①黄铁绢英岩-硅化碎裂蚀变岩及糜棱岩带:黄铁石英脉带,由石英、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、方解石等矿物组成,为Au元素发育最有利部位。角砾多为珠状/杆状。黄铁绢英岩带,由石英、碱性长石、绢云母组成,有浸染状黄铁矿化;金矿化较弱,局部可达工业品位。变形体为片状。②绢英岩化碎裂蚀变岩带:黄铁绢英岩、弱绢英岩化、钾化花岗质碎裂岩,淡灰色-淡灰绿色,碎裂及碎斑结构,角砾状、斑杂状构造,主要由石英、碱性长石、黑云母、绢云母及少量碳酸盐矿物组成,常具有细脉浸染状金矿化,是金矿化最主要的岩带。矿化为平行密集裂隙和网脉群构造。③绢英岩化碎裂钾化蚀变岩带:钾化花岗岩和强钾化蚀变岩带,岩石为淡肉红色,变余花岗结构,常见钾化及轻度的绢云母、绢云母化和少量星散状、细脉状黄铁矿。面状蚀变和脉状穿插状蚀变。④弱钾化花岗岩:花岗岩出现朱红色斑状变斑晶,蚀变斑状似斑状花岗结构,原岩的花岗岩矿物组成和结构构造基本未发生根本的改变。⑤正常花岗岩。

(4) 矿区构造变形蚀变岩相成矿图的编测

图2是玲珑矿田一个矿区3 km²的矿区构造变形蚀变岩相成矿图。

(5) 确定成矿构造变形岩相带三维分布,开展成矿预测

通过地表结合中段的观测,编制构造蚀变矿化带的矿区分布图和矿脉的中段、勘探剖面 and 垂直纵投影分布图^[26-27],结合系统的构造、岩石、矿物、地球化学和含矿性测试和分析,依靠探矿和采矿工程、物探和化探的勘查信息,建立预测标准,指出找

矿方向,圈定预测区和靶区。

3.2 构造变形岩相和区域成矿规律研究

胶东金矿直接与断裂破碎蚀变岩带有关,与花岗岩岩浆期后热液有关^[28]。在胶东西北部莱州、招远地区(图3),研究实测了7条、累计长度共240 km的构造变形蚀变岩相剖面,结合多个矿区的不同比例尺勘查资料,获得胶东地质调查和找矿勘查的新认识:①断裂构造蚀变岩相带的宽度与矿床规模大小有关,矿床规模与蚀变规模呈正相关关系。如果构造蚀变岩带不发育,基本没有工业矿体。②胶东金矿构造蚀变岩带不是以往认为的几十米宽,大型金矿的构造蚀变岩带宽度可以达到1.5~2.0 km,中小型金矿的蚀变岩带宽度仅几十米至几百米。③蚀变分带性质与矿化形式有关;弱钾化蚀变花岗岩带宽的矿区发育“玲珑式”石英脉金矿。强钾化蚀变花岗岩带宽的矿区发育“焦家式”蚀变岩脉金矿。

在招远北部台到道头30 km长的距离内,沿招平断裂带两侧,重点在内接触带范围,开展1:10000的构造断裂破碎蚀变岩带填图。在有利区段,结合物探和深穿透地球化学勘查,提出南花园预测区、郭家埠和后疃村3个靶区。钻探验证都见到工业矿体,在化工厂的河流南岸NEE向断裂下盘发现大型金矿,业已经成为新的成矿区带。

3.3 构造变形岩相勘查方法应用和推广

本研究方法直接应用在豫西钼矿、相山铀矿、赣南钨矿和长江中下游铁铜矿的武山、新桥等矿田地地质研究和找矿工作中,取得了显著的找矿成果。中国地质调查局、中煤集团、河南有色地矿局等单

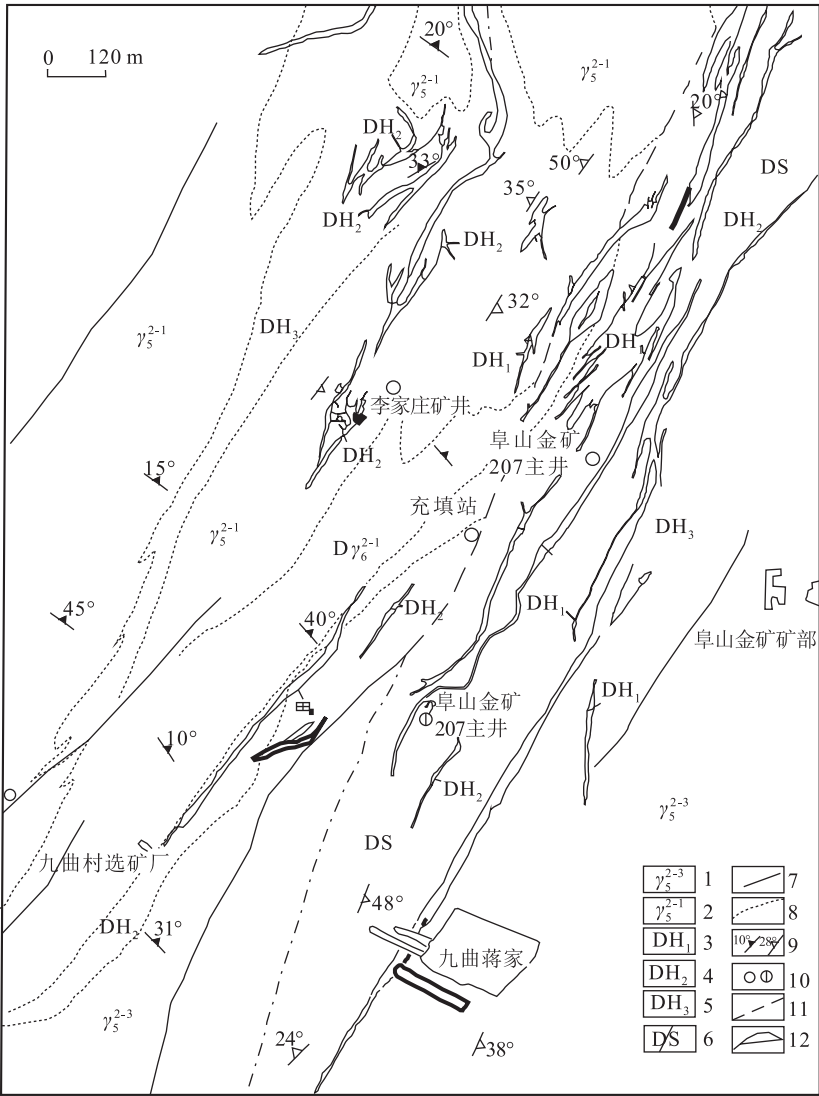


图 2 玲珑金矿田阜山金矿区的构造变形岩相成矿图

Fig. 2 Tectonic deformation lithofacies metallogenic map of the Fushan gold ore district in the Linglong gold orefield

1—栾家河二长花岗岩;2—玲珑黑云母花岗岩;3—强变形蚀变岩;4—变形蚀变岩;5—弱变形蚀变岩;6—破碎花岗岩带;7—断裂;8—岩性界线;9—片麻理产状及叶理产状;10—主井和风井;11—推测断裂;12—蚀变岩带

位推广和应用了“构造变形岩相勘查方法”,圈定了内蒙古、河南、胶东、甘肃等地区的一批重要找矿远景区和靶区,实现了金、铜、锡等找矿突破或新发现。山东地勘局的多个地勘单位应用“构造变形岩相勘查模式”,在境内外重要矿田发现和评价了多个矿床,涉及金、银、铜、锌、铅、锡、铁、煤炭、氯化钾等矿产。

4 矿田构造变形岩相分类方案

4.1 构造岩相的地质作用分类

关于岩相、沉积岩的构造岩相、变质岩相、岩浆

岩相、构造相等研究,曾经提出了不同的岩相分类^[3,5,10,13]。在“构造变形岩相”地质研究和分析基础上,初步建立地质作用和地质亚岩相-次级亚相 2 个层次的分类。

常用的矿床成因分类大多依据成矿作用,即成矿物质及其来源、成矿环境和成矿物质分布与变化等基本或主要内容划分。本次研究提出构造岩相的地质作用或成矿环境的分类(表 2)。

其中,复成构造蚀变作用,主要包含层控改造的或岩浆热液改造岩相,表现为构造-蚀变岩建造的成矿特征。复成构造蚀变,表现为构造与热液蚀

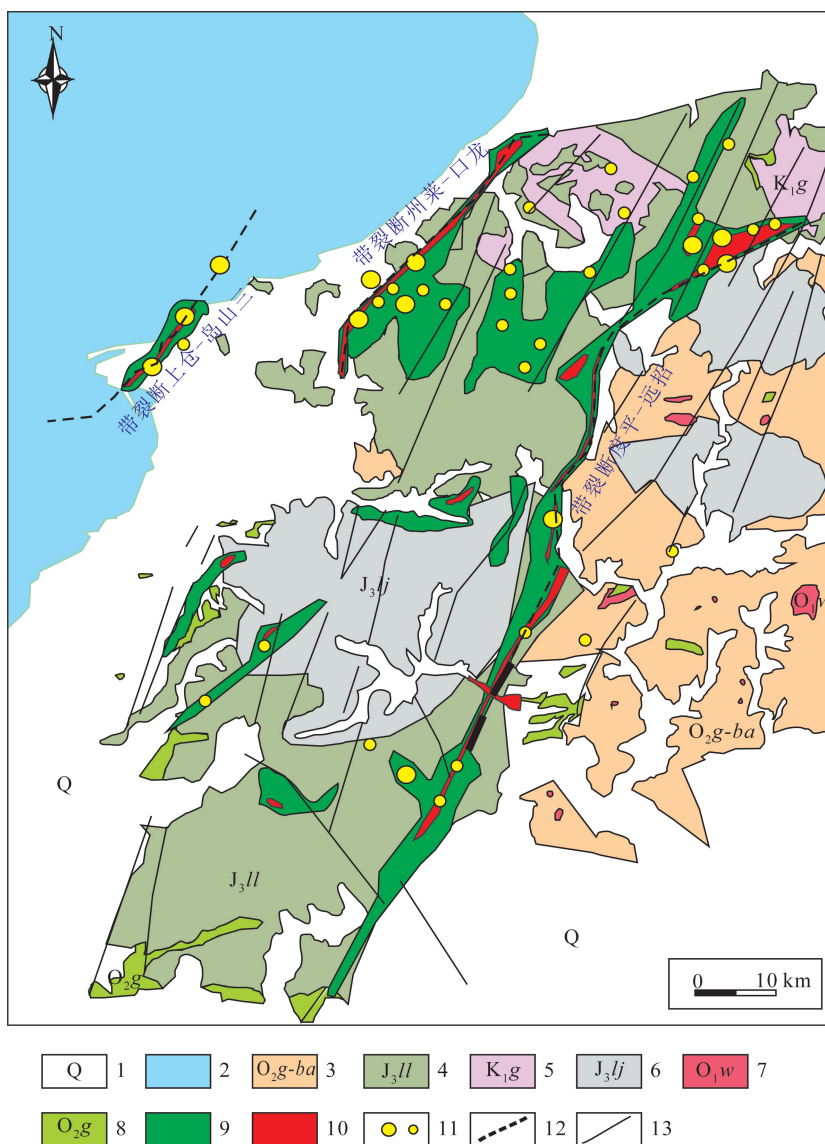


图3 招远-莱州金矿集中区区域构造变形蚀变岩成矿图

Fig. 3 Metallogenic map of regional tectonic deformation altered rocks in the Zhaoyuan-Laizhou gold concentration area

- 1—第四系;2—海域;3—栖霞片麻岩套;4—玲珑型黑云母花岗岩;5—郭家岭型花岗闪长岩;6—栾家河型二长花岗岩;
7—马连庄超基性-基性侵入岩组合;8—莱州超基性-基性侵入岩组合;9—钾长石化蚀变带;10—黄铁绢英岩化蚀变带;
11—金矿床(大型/中小型);12—主要控矿断裂带;13—断裂

变叠加或改造前期的和围岩的作用,是以构造热液蚀变而发育的地质作用。在中国中生代形成的各类矿床,复成构造蚀变是普遍发育的矿化形式和成矿作用^[26, 28]。

4.2 构造变形岩相的地质亚岩相分类

在岩相的地质作用分类基础上,根据地质作用的亚岩相划分了“构造变形岩相”类别(表3)。构造变形岩相的地质亚岩相分类,特别适于矿田层次的大比例尺地质研究和勘查,初步分出27个类型。

4.3 地质作用和构造亚相的典型矿床简介

上述成因分类是基本的岩相分类,但是对于开展矿田地质研究的精度不够。各类地质作用的岩相还可进一步细分,相当于亚相,对于矿田研究较合适。如岩浆岩相中可分为结晶分异岩相、熔离岩相等,热液交代岩相的高、中、低温热液交代岩相。矿田构造岩相的研究在不断深化,随着勘查工作的进展,将会有新的矿田级构造变形岩相类型被发现,本文提出的分类还需进一步补充和完善。

表 2 构造岩相的地质作用分类
Table 2 Classification of geological processes
of tectonic lithofacies

地质作用	构造岩相一级类别	矿床实例
沉积作用	沉积构造岩相:由沉积作用形成的构造建造	宁乡铁矿
岩浆作用	岩浆构造岩相:由岩浆及其热液作用形成的构造建造	铜陵狮子山铜矿、 云南个旧锡矿
火山地质作用	火山构造岩相:由火山地质作用形成的构造建造	江西省相山铀矿
变质作用	变质构造岩相:受变质作用而形成的构造建造	鞍山铁矿
复成构造蚀变作用	层控改造的或岩浆热液改造岩相,为构造蚀变岩建造	MTV 型铅锌矿,胶 东金矿

(1)沉积岩相及其构造变形岩相

沉积构造及岩层组合、沉积盆地及构造变形岩相见表 4。典型矿床如四川峨眉龙门铜-黄铁矿矿床、河南巩县铝土矿等。其中,巩县小关铝土矿产出层位为上石炭统本溪组,分 3 段:上段为粘土岩,中段为铝土矿层,下段为山西式铁矿层位。矿层显层理及水平层纹,具层理的铝土矿层平行排列的砾石及微波状层纹。矿层下部局部地段夹薄煤层,矿层上部有时可见较平整的小型冲刷面。矿体中各种矿石之间界线不清楚,多呈渐变关系。深部矿层均为深灰色及黑色,而浅部 100~200 m 以内矿石的颜色普遍变浅。深部矿层与围岩界线不明显,浅部界线易于识别,品质较富的半土状矿石有向浅部增多、向深部减少的趋势。

(2)火山构造变形岩相及矿床

包括火山机构及火山岩组合、次火山岩体、火山沉积盆地及其构造火山岩相(表 5)。

典型矿床如北祁连山黄铁矿型矿床,在北祁连山加里东期优地槽内,以细碧岩为主的海相火山岩极其发育,其中蕴藏丰富多样的黄铁矿型矿床。

江西省相山铀矿田,位于华南铀成矿省北部赣杭构造火山岩铀成矿带的南西端,受制于相山大型塌陷式火山盆地。燕山中期(晚侏罗世)强烈挤压运动,导致大规模的火山活动,形成赣杭火山岩带;燕山晚期(白垩纪)火山活动减弱并向东迁移,该时期在赣杭构造火山岩带发生了高强度、大规模、短时限的铀成矿作用,形成相山、盛源、大洲铀矿田及数十个铀矿床,相山铀矿田是其中的典型代表。相

表 3 构造变形岩相的地质亚岩相分类
Table 3 Classification of geological subfacies of
tectonic deformation lithofacies

地质作用	地质岩相	构造亚岩相	典型矿床
岩浆地质作用	岩浆岩相	岩浆结晶分异变形岩相	西藏罗布莎铬铁矿
		岩浆熔离变形岩相	甘肃金川铜镍硫化物矿床
		岩浆爆发变形岩相	南非金伯利岩中的金刚石矿
	伟晶岩岩相	伟晶岩变形岩相	新疆阿尔泰含稀有金属花岗伟晶岩矿
	接触交代岩相	接触交代变形岩相	湖北大冶砂卡岩型铁矿
	热液蚀变岩相	热液蚀变变形岩相	江西大庾西华山钨矿
火山地质作用	火山岩相	火山岩浆变形岩相	智利拉科铁矿
		火山-次火山气液变形岩相	甘肃白银厂黄铁矿型铜矿
		火山-沉积变形岩相	阿塔苏铁矿
沉积地质作用	风化岩相	风化岩相	新喀里多尼亚硅酸镍矿
	沉积岩相	海相沉积变形岩相	河北宣龙式铁矿
		湖泊相沉积变形岩相	山东淄博沉积铝土矿
		沼泽沉积变形岩相	山西大同煤田
		残积沉积变形岩相	河南巩县铝土矿
	可燃有机岩相	可燃有机变形岩相	辽宁抚顺煤矿
变质作用	接触变质岩相	接触变质变形岩相	波兰科瓦拉磁铁矿
	区域变质岩相	区域变质变形岩相	美国霍姆斯塔克金矿
	混合岩化岩相	混合岩化变形岩相	辽宁宽甸硼镁铁矿
复成地质作用		砂卡岩化构造变形岩相	钨、锡、钼、铁、铜、铅、锌等矿产
		云英岩化构造变形岩相	钨、锡、钼、铋、铌、钽、铍、锂等矿产
		钾长石化构造变形岩相	铅、锌、金、铀、稀土等矿产
		钠长石化构造变形岩相	钨、锡、金、铁、铜、磷、黄铁矿矿产
		绢英岩化构造变形岩相	金、铜、铅、锌、钼、铋等矿产
		绿泥石化构造变形岩相	铜、铅、锌、金、银、锡、黄铁矿等矿产
		硅化构造变形岩相	铜、钼、铅、锌、金、银、汞、黄铁矿矿产
		碳酸盐化构造变形岩相	铋、钽、锗等矿产

表 4 沉积亚相及其矿床

Table 4 Sedimentary subfacies and their deposits

相组	陆相组	海相组	海陆过渡相组
沉积构造相矿田	(1) 残积相矿田		
	(2) 坡积-坠积相矿田		
	(3) 山麓-洪积相矿田	(1) 滨岸相矿田	(1) 三角洲相矿田
	(4) 河流相矿田	(2) 浅海陆棚相矿田	(2) 泻湖相矿田
	(5) 沼泽相矿田	(3) 半深海相矿田	(3) 障壁岛相矿田
	(6) 湖泊相矿田	(4) 深海相矿田	(4) 潮坪相矿田
	(7) 沙漠相矿田		(5) 河口湾相矿田
	(8) 冰川相矿田		

表 5 火山岩构造亚相及矿床

Table 5 Tectonic subfacies and deposits of volcanic rocks

火山岩相	火山构造亚相	典型矿床
火山岩相	岩浆喷溢相	智利拉科岩浆喷溢相铁矿
火山岩相	火山熔离相	科马提岩系中的火山-熔离相硫化镍矿
火山气液相	陆相火山-喷气相	中国台湾龟山岛陆相火山-喷气相自然硫矿
	陆相火山-热液相	赣东北德兴陆相火山-热液相铅锌矿
	陆相次火山-热液相	德兴斑岩陆相次火山-热液相铜矿、宁芜凹山陆相次火山-热液相铁矿
	海相火山(次火山)-热液相	甘肃白银厂海相火山(次火山)-热液相黄铁矿型铜矿、加拿大海伦铁山海相火山(次火山)-热液相菱铁矿
火山-沉积相	陆相火山-沉积相	陆相火山-沉积相 Fe、Mn、B、Li 矿
	海相火山-沉积相	兰第耳海相火山-沉积相铁矿、阿塔苏海相火山-沉积相铁矿

山火山盆地基底地层为南华系震旦系浅变质岩,盖层为一套上侏罗统火山岩系及出露于火山盆地西侧的白垩纪红层。火山岩系由酸性、中酸性火山熔岩、火山碎屑岩及少量正常沉积夹层构成,分为打鼓顶组(J_3d)和鹅湖岭组(J_3e),每组的特点总体是由沉积到爆发再到喷溢式侵出,由此构成一个大的火山喷发旋回。大规模火山活动期后,次火山岩侵入,以不规则的弧形和半环形围绕盆缘的北、东、南部出露,岩性主要为花岗斑岩。

(3) 岩浆构造变形岩相及其矿床

包括侵入岩体及其构造亚相(表 6)。典型矿床,如狮子山矿田,是受燕山期中浅成中酸性岩浆

侵入岩控制的岩浆热液成矿系统,成矿元素、矿床类型和蚀变特征在空间上表现出明显的规律性和分带性:矿田中的岩体在剖面上自上而下依次为浅部的岩枝、岩墙→中深部的岩浆房(体)→深部的岩基;成矿元素自上而下依次为 $Au(Ag) \rightarrow Au(Cu) \rightarrow Cu(Mo, Au) \rightarrow Cu(Au) \rightarrow Mo(Cu)$;矿床类型自上而下依次为热液脉型、矽卡岩型、层控矽卡岩型和斑岩型;蚀变特征以岩体为中心,自岩体向围岩表现为钾长石化+绿泥石化+硅化+蛇纹石化+碳酸盐化→矽卡岩化(黄铁绢英岩化)→角岩化-大理岩化。

(4) 变质亚相及其矿床

变质变形岩相组合较多见,有不同分类。根据变质相分类,可分为低压变质相和高压变质相。低压变质相:①钠长-帘角岩相;②角闪石角岩相;③辉石角岩相;④透长岩相中高压变质相;⑤沸石相;⑥葡萄石-纤石变质硬砂岩相;⑦绿片岩相;⑧角闪岩相;⑨麻粒岩相。高压变质相:⑩蓝闪石-柱石相;⑪榴辉岩相。

鞍山铁矿属于受变质沉积铁矿,为受变质铁硅质建造。该矿产于太古宇鞍山群及与其相当的变质岩系中的不同层位,变质岩大多属角闪岩相,部分属麻粒岩相。由于年代老,原始覆盖层可能较厚,一般变质较深。其中,构造变动剧烈而复杂、埋深大的,变质程度高,且往往呈现明显的混合岩化现象。铁矿形成时,主要处于地壳发展史上尚未出现大量碳酸盐岩石的阶段,其大地构造背景具有一定的后期优地槽特征,在一定地区和阶段,曾有铁镁质甚至较酸性的火山活动,往往为铁矿层的形成提供主要的物质来源。

(5) 复成构造蚀变岩相与矿床

构造及热液蚀变是与成矿相伴的、广泛的和普遍的地质作用,在中新生代构造岩浆活化区域,构造与蚀变作用叠加和改造作用形成各类矿床,是非常普遍的。但是,由于其形成作用在时间和空间上的穿透性,其在岩石学和矿床学的位置尚有不同的认识。

复成构造热液蚀变成矿作用一直以来受到矿床学家的重视。结合成矿学和找矿学,根据胡受奚^[29]的热液蚀变类型,叠加构造变形岩相带、韧性剪切带、变质核杂岩作用,形成构造蚀变岩相分类表(表 7)。

表 6 岩浆作用和构造岩浆岩相
Table 6 Magmatism and tectonomagmatic lithofacies

岩石类型	超基性岩类	基性岩类	中性岩类	酸性岩类	碱性岩类	
					偏碱性岩类	过碱性岩类
岩相名称	橄榄岩-苦橄岩相	辉长岩-玄武岩相	闪长岩-安山岩相	花岗岩-流纹岩相	正长岩-粗面岩相	霞石正长岩-响岩相
浅成岩	金伯利岩	微晶辉长岩 辉绿岩 辉长玢岩 辉绿玢岩	微晶闪长岩 闪长玢岩 石英闪长玢岩	微晶花岗岩 花岗斑岩	微晶正长岩 正长斑岩	微晶霞石正长岩 霞石正长斑岩
深成岩	纯橄榄岩 橄榄岩 辉石岩 角闪石岩	辉长岩 苏长岩 斜长岩	闪长岩 石英闪长岩	花岗岩 花岗闪长岩	正长岩 石英正长岩	霞石正长岩
相关矿田	超基性岩类橄榄岩-苦橄岩相(铬、镍、钴、铂族金属等)矿床	基性岩类辉长岩-玄武岩相(钒钛磁铁矿和铜镍硫化矿床,其中常伴生有铂、钴、金、银等)矿床	中性岩类闪长岩-安山岩相(矽卡岩型的铁、铜、金以及一些镍、钴、黄铁矿、钨、锡、铍、铅、锌等中性岩)矿床	酸性岩类花岗岩-流纹岩相(铁、铜、金、铅、锌、银、钨、锡、钼、铋、汞、铌、铍、锂、铀、稀土等酸性岩)矿床	碱性岩类正长岩-粗面岩相(矽卡岩型铁)矿床	

表 7 复成构造热液蚀变岩相和典型矿床
Table 7 Complex tectonic hydrothermal alteration lithofacies and typical deposits

蚀变岩相	典型蚀变岩相和金属矿
矽卡岩化构造岩相	矽卡岩相和钨、锡、钼、铁、铜、铅、锌等矿产
云英岩化构造岩相	云英岩相和钨、锡、钼、铋、钽、铍、锂等矿产
钾长石化构造岩相	钾长石化岩相和铅、锌、金、铀、稀土等矿产
钠长石化构造岩相	钠长石化岩相和钨、锡、金、铁、铜、磷、黄铁矿矿产
绢英岩化构造岩相	绢英岩化岩相和金、铜、铅、锌、钼、铋等矿产
绿泥石化构造岩相	绿泥石化岩相和铜、铅、锌、金、银、锡、黄铁矿等矿产
硅化黄铁矿化构造岩相	硅化岩相和铜、钼、铅、锌、金、银、汞、黄铁矿等矿产
碳酸盐化构造岩相	碳酸盐化岩相和铌、钽、锆等矿产

胶东金矿与绢云母化和黄铁绢英岩化岩相同步产生,其成矿具有多次脉动、叠加的特点,主要可分为早期蚀变、晚期矿化 2 个阶段。早期蚀变:当含矿热液渗透到控矿断裂裂隙中时,与周围岩石进行广泛交代,发生钾化,形成宽大的钾化带。

此后,伴随控矿构造继承性活动,大量含矿热液涌入。在热液作用下,围岩中的暗色矿物蚀变为绿泥石,进一步转变为绢云母,同时析出铁、镁,其中铁与热液中的硫结合形成了由星散状黄铁矿、鳞片状绢云母和微粒石英组成的一种变鳞片细晶结构的岩石-黄铁绢英岩。黄铁绢英岩化蚀变,叠加改造了原钾化带。早期蚀变既没有使蚀变岩石及矿物释放出大量金,也没有从热液中沉淀出很多金,仅是整个蚀变矿化的一个组成部分,与金成矿有一定联系。晚期矿化:早期蚀变后,控矿断裂系统多次间歇活动,使先成的蚀变岩形成一系列脆性变形构造岩,并在主干构造内外产生一些新的伴、派生张性断裂裂隙。伴随成矿热液理化条件、成分的改变,先后在这些断裂裂隙中充填矿液并沉淀矿质。

胶东金矿显示为蚀变岩型和石英脉型 2 个典型矿化形式。在蚀变岩型金矿中,由主断裂面向外依次为黄铁绢英岩带、黄铁绢英岩化碎裂岩带、黄铁绢英岩化花岗岩质碎裂岩带、黄铁绢英岩化花岗岩带。一般情况下,主裂面上盘的黄铁绢英岩化较弱,尤其是黄铁矿化更微弱,而下盘的黄铁绢英岩化较强,且往往是矿体的赋存部位。玲珑-焦家式

金矿的成矿系列特点,对于其他成矿作用的相关系统研究,具有重要的参考作用。

5 结 论

矿田相当于 V 级成矿区带的地质找矿勘查实体,适用于本研究提出的“构造变形岩相”地质概念和地质找矿方法。

(1) 构造变形岩相是岩石变形和相变密切共生的地质体,既能反映成岩地质环境又包含成岩物理化学条件,是一种适用于开展“构造结合建造”观测和分析的构造岩石单元。

(2) 构造变形岩相的地质调查和找矿方法简单归结为:确定矿床模式,建立构造岩相系统;通过构造岩相剖面的实测,具体确定蚀变岩分带特点;确立成矿构造变形蚀变分带的观测标志和图例;开展地质填图;建立矿区构造蚀变矿化岩带的三维分布框架,指导地质研究和找矿;结合工程、物探和化探勘查提出找矿方向,指出预测区带并圈定靶区。

(3) 依据地质作用类型划分了 4 种矿田构造变形岩相:沉积构造变形岩相、岩浆构造变形岩相、变质构造变形岩相和复成构造变形岩相。根据地质亚相,又划分出矿田尺度的 27 类构造变形岩相。

(4) 构造变形岩相研究,用 1:1000~1:50000 不同精度可以调查几十至几百平方千米范围的地质找矿问题,直接服务于已知矿床的深部外围找矿。地表结合中段大比例尺填图从三维上刻画矿化岩相带的分布特征,成为圈定靶区的最佳途径。

致谢:本研究是在李四光“构造结合建造”、“构造形质”学术思想指导下开展的,是在杨开庆的超基性岩“构造岩相”找矿成功实践基础上发展起来的,是笔者与多家科研机构长期合作与探索的成果,深表感谢。

参考文献

[1] 吕古贤.构造动力成岩成矿和构造物理化学研究[J].地质力学学报,2019,25(5):962-980.
[2] Harker A. Metamorphism[M]. London, 1932 // 蒋荫昌译.变质作用—岩石转变的研究[M].北京:地质出版社,1981:1-373.

[3] 帕塔拉哈 E N.构造相分析产生与发展[J].国外地质科技,1991,(5):15-29.
[4] 贡恰罗夫 M A 等.变形—化学共生组合与构造—变质分带[J].国外地质科技,1996,3:48-53.
[5] 涂光炽.祁连山构造—岩相带的研究[J].地质科学,1959,(7):193-198.
[6] 李四光.地壳构造与地壳运动[J].中国科学,1973,4:400-429.
[7] 杨开庆.构造带的特征与超基性岩体的铬铁矿的分布关系[J].地质力学论丛,1979,5:44-57.
[8] Jones M E. The relationships between metamorphism and deformation of rock[J]. J. Struct. Geol., 1981, 3(3): 333-338.
[9] 李四光.关于地质构造在三重基本概念[J].科学通报,1953,33(4):253-261.
[10] 涂光炽.什么是矿山地质工作?(一)[J].地质知识,1956,(1):8-11.
[11] 吕古贤.胶东半岛构造—岩相形成及玲珑—焦家式金矿的构造动力成岩成矿地质特征研究[J].中国地质科学院院报,1991,2:65-80.
[12] Sander B. Gefügekunde der Gesteine [M]. Wien: Verlag Von Julius Springer, 1930: 1-641.
[13] Niggli P. Rocks and mineral deposits [M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1954: 1-559.
[14] 王嘉荫.应力矿物概论[M].北京:地质出版社,1978:1-238.
[15] 李四光.关于改进构造地质工作的几点意见[J].地质论评,1965,23(4):245-255.
[16] 陈国达.成矿构造研究法[J].北京:地质出版社,1978:1-413.
[17] 李四光.旋卷构造及其他有关中国西北部大地构造体系复合问题[J].地质学报,1954,34(4):339-410.
[18] 李四光.中国铬铁矿图册[M].北京:地质出版社,1966.
[19] 卢金 A H. 岩浆期后矿床构造的地质填图[J].国外地质科技,1991,(5):4-15.
[20] 许靖华.中国大地构造相图(1:400万)[M].北京:科学出版社,1991:1-155.
[21] 李继亮.碰撞造山带大地构造相//现代地质研究文集(上)[M].南京:南京大学出版社,1992:9-21.
[22] 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等.大地构造相的定义、划分、特征及其鉴别标志[J].地质通报,2008,27(10):1613-1637.
[23] 方维萱.陕西省小秦岭地区断裂构造地球化学特征[J].地质与勘探,1990,26(12):60-63.
[24] 方维萱,杜玉龙,李建旭,等.大比例尺构造岩相学填图技术与找矿预测[M].北京:地质出版社,2018:1-377.
[25] 吕古贤.石槽矿区不同力学性质结构面中岩浆岩的某些变异问题探讨[J].中国地质科学院院报,1987,17:65-80.
[26] 吕古贤,王红才,郭涛,等.热源体分割程度引起热传导及其温度变化[J].科学通报,1999,44(10):1099-1102.
[27] 吕古贤,武际春,崔书学,等.胶东玲珑金矿田地质[M].北京:科学出版社,2013:1-685.
[28] 吕古贤,孔庆存.胶东玲珑—焦家式金矿地质[M].北京:科学出版社,1993.
[29] 胡受奚,叶瑛,方长泉.交代蚀变岩岩石学及其找矿意义[M].北京:地质出版社,2004.