

构造物理化学学科建设回顾、应用与展望

吕古贤

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

1 构造物理化学的发展历程

(1) 构造物理化学学科定义

构造物理化学, 是研究地壳物质受构造作用产生物理化学变化的交叉学科, 是构造作用力改变物理化学条件进而影响地球化学过程的领域, 即地质构造力与成岩成矿物理化学条件相关性的研究领域。构造物理化学, 是研究构造力改变地壳岩石压力、温度等物理化学条件, 由此影响地球化学作用的理论和方法。构造物理化学是物理学-化学-物理化学交叉的地质学科领域, 是地质力学和构造动力成岩成矿理论的继承和发展。

(2) 构造物理化学学科形成思路

构造物理化学的提出和学科建设过程中, 发展出矿田地质学的新概念。研究发现, 尽管地质环境和成岩成矿条件, 是随时间和空间而变化的, 但从成岩成矿的角度看, 控制元素运移和沉淀的基本物理化学参数是不变的。形成岩石和矿床的化学过程, 往往有流体参与来完成, 这个过程直接受当时物理化学环境条件的控制和影响。因此认为, 如果能够说明物理化学条件受构造作用的制约, 如果能从理论、实验和实测数据证实“构造作用力影响静水压力”“构造作用影响温度条件”等科学问题, 则构造地球化学各层次研究所揭示的岩石形变作用与变质交代作用的地球化学过程密切共生, 不同变形带及部位的岩相特征与不同深度的岩相有一定对应性等现象将得到较合理的解释。据此提出新思路, 即“构造作用力通过控制压力温度和其它物理化学条件来影响成岩成矿地球化学过程”, 这实际上深入到了一个新的学科研究领域, 即地质构造作用力与成岩成矿物理化学条件相关性领域, 称之为地质构造物理化学或构造物理化学。

“构造影响物理化学条件而控制地球化学过程”的研究思路, 是构造物理化学的理论基础, 也是构造物理化学的主要研究方法。

(3) 构造物理化学学科建设历程

构造物理化学是在继承和学习构造动力成岩成矿理论、开展矿田构造研究过程中发展起来的。在“构造如何影响成岩成矿地球化学”研究中, 吕古贤提出“构造改变物理化学条件影响化学平衡”的研究方向和构造物理化学的概念。欧阳自远在 1999 年认为, 构造物理化学是我国科学家提出、倡导和发展起来的学科研究领域, 不仅在构造附加静水压力方面取得基础创新成果, 而且建立了深部构造校正测算技术和构造变形岩相填图方法, 在胶东金矿深部第二富集带预测和勘查方面做出开创性的贡献, 业已形成了理论方法系统, 值得继续深入发展。

潘立宙在 1976 年指出, 构造应力场可以分解成各向等应力和差应力两部分, 这一认识奠定了构造物理化学的力学基础。刘瑞珣阐述了构造应力场差应力和各向等正应力分解的数学关系; 王连捷等建立“应变-差应力”计算三维主应力的联立方程方法。在此基础上, 吕古贤创建了成矿深度的构造校正测算方法, 更系统地形成了“构造改变物理化学条件影响化学平衡”的研究方法和构造物理化学的概念。

构造物理化学的发展得到地学界前辈的大力支持与肯定。马宗晋曾在 1989 年指出, 构造物理化学在地质资料和构造研究基础上, 高度综合出“构造改变物理化学条件影响地球化学反应”新思路, 是地质力学和构造地球化学领域的发展; 欧阳自远、翟裕生和陈毓川认为, “构造物理化学在成矿学和找矿学之间开拓了一个新的研究领域”。

中国地质学会于 1992 年召开第一次“构造物理化学研究和胶东金矿深部找矿”小型理论研讨会。在孙殿卿支持下, 1996 年地质力学专业委员会设立“构造物理化学专业学组”, 并委派黄庆华和王连捷具体了解“构造附加静水压力”的概念、数学力学依据和实测方法; 1996 年陈庆宜与吕古贤就构造物理化学学科属性究竟是“构造物理+化学”还是“构造+物理化学”进行了细致分析讨论, 并确定了构造物理化学的英文名词; 2002 年中国科学技术协会批文, 同意举办“地壳深部压力状态与地质作用国际会议”; 中国地球物理学会 2018 年批准成立“构造物理化学专业委员会”。

2 构造物理化学的主要研究内容

(1) 构造物理化学的地质研究

构造物理化学研究需要的地质资料——展示不同构造变形构造带的岩石、矿物和地球化学特征，显示挤压带、剪切带和引张带在矿物、岩石、化学成分和物理化学条件等方面的差别，研究它们规律性的变化。研究提出受力岩石构造应力场的各向等压应力部分——“构造附加静水压力”，是影响岩石形成的构造物理化学参量和地球化学分布的重要原因。有了这样的地质基础，构造物理化学才能探讨“构造力通过改变物理化学条件进而控制地球化学反应”的过程。

构造物理化学，研究“构造结合岩相”“构造结合建造”和“构造地球化学”的特点，需要合适的地质现象和概念。这些地质概念必须既包含岩石组成特征又呈现岩石形态的地质现象，既要涵盖结构和组分两方面的状态，也要在室内外地质工作中可以使用。多年的研究探讨和实践认为，“构造变形岩相”的概念能够适应于野外观测、填图勘查和室内测试分析等方面的要求。构造变形岩相是能够显示岩石变形、岩石地球化学分布以及形成岩相环境的地质实体。在不同的地质背景中，构造变形岩相形迹的涵义是有差别的，但其立足于构造变形基础和地质建造（沉积、岩浆、变质及成矿等），这两点是不变的。构造变形岩相的概念与方法，成为构造物理化学研究的地质基础。

(2) 构造附加静水压力的研究

这部分研究主要涉及构造附加静水压力的数学和力学表达，构造力改变岩石压力的研究，挤压、剪切和引张构造变形带内构造附加静水压力的有限元模拟等。

①构造附加静水压力的力学表达

地下某处的固体岩石，在重力、热力或其它地质作用下，会产生一定的偏应力状态。而当其受到构造力的作用时，固体岩石会在其他偏应力状态上叠加一种构造应力场。这种应力叠加后的总应力状态可以分解为差应力和各向等正应力两个部分。前者是改变岩石形状的差应力，后者即为静水压力（亦可称之为围限压力），能够影响化学平衡。

对于固体岩石，尤其是赋存于中浅部地壳的岩石，重力和构造力都是有方向性且各向不平衡的外力，这种外力（在 $10^8 \sim 10^6$ a 时间尺度内）能够使岩石处于偏斜应力场。这种偏应力（ $\tilde{\sigma}$ ）场中的差应力（ σ' ）部分只会引起岩石变形；而偏应力场中的各向等正压应力（ \tilde{P} ）的部分，可以看作是平均压应力，也被称之为“静水压力”的部分才能够使固体岩石发生体积变化，并导致岩石围压发生变化。这种“构造附加静水压力”，既是导致岩石发生体积变化的围限压力，也是控制地球化学反应的各向等正压应力。

②构造力改变岩石压力的研究

这项研究从概念上改变了经典的地下岩石“静水压力模型”和认识，建立了“构造力和重力复合的岩石压力模型”。可以证明，构造力的叠加，明显改变了岩石的（围限）压力。

用固体力学原理分析地壳中构造力和重力的应力场叠加表明，岩石的应力状态可以看成是一个各向等正应力状态叠加一个差应力状态，这种普遍的岩石应力状态是，既有重力产生的围限压力又有构造力叠加的压力。

研究在同样外力条件下，挤压带、剪压带和引张带内的构造附加静水压力分布规律。构造变形带构造附加静水压力的变化理论、数学模拟和实测资料还表明，同一外力作用下，挤压变形带（ P_C ）、剪压变形带（ P_S ）和引张变形带（ P_T ）中岩石承受的构造附加静水压力不同，且 $P_C > P_S > P_T$ 。

(3) 深部“构造力与重力复合的岩石压力”模型

这项研究涉及了地质科学的一个根本问题，就是地下岩石压力模型，将影响地质学的各个方面。经典的认识是地下岩石处于“静水压力”状态，认为地下一点的压力与上覆岩石重力有关，没有构造干扰和差应力作用。然而，地下的“静水压力”状态的认识不符合现代的研究和实测资料。

研究提出了“构造力复合重力的岩石压力”——深部地壳岩石压力既包含上覆岩石重力的压力，又包含水平构造力的压力。地壳深部岩石的受力主要源自重力和构造力，相对应的概念分别为重力附加静水压力和构造附加静水压力。其中，构造力产生的部分静水压力，改变了岩石的静水压力或围压的受力条件。因此，地壳中岩石受到的压力是由重力和构造力的两部分球应力叠合而成。

(4) 构造附加压力与岩石力学性质的关系

随着围压的变化，岩石的各方面特征都发生变化。科拉半岛深钻各类岩石的密度、孔隙度、光电磁反应等的实验和分析结果显示，随着深度和压力逐步增大，岩石诸多物理性质产生了规律性变化。

岩石的强度与岩石围压大小有关。已有的岩石强度测定，多在常温常压的环境条件下进行，大部分

结果表明普通岩石单轴抗剪强度小于 0.5 GPa。但问题关键在于，深部岩石并不是处于单轴应力状态中，而是处在很大的围压或三轴应力条件下。Handing 在 1966 年的实验证明，岩石所受的围压越大，其抗剪和抗拉强度就越高；当围压持续增高时，其抗压强度几乎是无限的。综上所述，在研究岩石力学性质的时候，不仅要分析岩石的矿物组成特点，还要考虑围限压力的影响，如果构造力存在，那就应该研究构造附加压力的作用。

(5) 构造动热过程与温度效应

构造作用可以使地下岩石发生位移和变形。根据能量守恒定律，机械能可以转变为其他形式的能量，例如部分机械能转化为热能，可导致受力对象的温度产生变化，即构造热过程。

构造热可以分为 3 种类型：构造变形热、构造摩擦热以及构造条件下的热传导过程。构造运动能够引起岩石脆性破裂和变形。岩石受构造应力产生变形，进而提高了岩石的应变能，扩大了岩石的表面积，显著增加表面能，岩石破裂面之间的摩擦也会产生热量。构造运动过程中的能量除了使岩石产生声响、光电效应和位移之外，大部分以热的形式传递到岩石中。由于岩石多为热能的不良导体，因此，构造运动能够造成岩石的局部温度场效应。

(6) 构造物理化学成岩成矿的研究——以胶东金矿研究为例

如果构造产生一部分压力的话，构造力也能影响成岩成矿的地球化学平衡。这一部分内容既是构造物理化学的基础，也是构造物理化学应用方向的桥梁。

① 构造物理化学成岩成矿模式研究

经地质构造研究，结合岩石、地球化学、物理化学和同位素等多方面测试分析资料，建立胶东玲珑—焦家式金矿的构造物理化学成矿模式。

以胶东金矿构造变形岩相填图为基础，研究岩石、地球化学和物理化学条件的分布。开展矿区面积性物理化学参数 (P 、 T 、 Eh 、 pH 、 lgf_{S_2} 、 lgf_{O_2} 和 K^+ 、 Na^+ 、 CO_2 等) 测试，发现了构造影响物理化学参数及成矿的地质证据：挤压断裂带的物理化学条件下，发生 K 和 Si 增高而 Al 和 Na 氧化物降低的化学反应，形成蚀变岩型金矿；引张断裂带的物理化学环境下，发生 K 增高而 Si 、 Al 和 Na 氧化物降低的化学过程，发育石英脉型金矿。

② 构造物理化学地质基础——构造变形岩相研究

构造变形岩相测量扩大了预测目标，不仅研究金矿化标志，还把远矿蚀变，甚至弱钾化花岗岩也归为蚀变岩相带，将蚀变带整体作为预测的目标，从而把找矿标志从几米宽扩大为几百米甚至上千米宽，突破了“就矿找矿”的局限性，大大提高了找矿效果。

③ 构造物理化学场与成岩成矿分析

在 1:1 万构造变形岩相填图基础上，结合岩石、地球化学及物理化学参数 (P 、 T 、 Eh 、 pH 、 lgf_{S_2} 、 lgf_{O_2} 和 K^+ 、 Na^+ 、 CO_2 等) 资料，进行面积性编图。

矿化分布处于成矿构造物理化学参数突变的区带。由此进一步提出，地球化学分布是成矿作用的结果，而物理化学条件才是成矿的动力原因，为“构造力通过改变物理化学条件影响化学平衡”的思路提供了地质基础。

④ 构造物理化学的界面带成矿研究

物理化学参数 (P 、 T 、 Eh 、 pH 、 lgf_{S_2} 、 lgf_{O_2} 和 K^+ 、 Na^+ 、 CO_2 等) 的突变带，显示出一定规模的界面带，这些界面带不仅与成矿带分布相关，而且与成矿元素分布有关。研究揭示“构造物理化学参数界面带成矿”的新认识。

各构造物理化学参数都有高值和低值分布区。在应力集中和松弛的交接部位，发育物理化学参数的剧变带。在金矿成矿中，各构造物理化学参数的剧变带，是最有利于金矿成矿的界面带。

⑤ 构造物理化学临界成矿的热力学分析

我国东部中生代发生大规模成矿作用，胶东金矿区尤其典型，但是其成矿构造机理一直处于探讨阶段。胡宝群等较早探讨流体临界大规模成矿的物理化学成因问题，认为主要受控于水的临界奇异性，即在温压同时达水的临界值时发生临界二级相变而控矿。他们建立了大规模成矿作用的构造物理化学“深断裂临界成矿”的初步模型，认为由于岩石圈深断裂带中的压力急剧下降，形成压力的凹陷等值面，而深部岩浆及其热液等沿断裂带上侵，发育温度上隆凸起等值面。压力面凹陷和温度面凸起，在上地壳浅部一定区段就可能形成温压同时达到水发生临界二级相变区域。从而在这个临界区段就发生非线性、短时限和大规模的成矿作用。简言之，由于深断裂引起压力下降和温度上升，在浅部地壳能够形成临界区带，控制着大规模成矿作用。

该研究表明, 化学元素的分布只是成矿作用的结果, 而物理化学条件的变化才是成矿的原因, 成为“构造改变物理化学条件影响化学平衡”的热力学基础。

3 构造物理化学的应用与展望

(1) 成岩成矿深度研究测算方法和深部预测

构造物理化学研究, 对一些地质认识、观念和方法提出了新的思路。如成矿深度的测算方法, 经典方法是压力/比重, 而“构造校正测算方法”却是首先从压力剔除“构造附加静水压力”之后, 再测算成矿深度。经典方法认为胶东金矿形成于 4~6 km 深处, 而运用构造校正方法, 获得胶东金矿的成矿深度为 1~3.5 km, 且集中在 2.5 km 左右深处形成。同时发现胶东金矿是浅成矿床。这一新的研究成果表明, 主要的矿体在深部赋存, 现有大型矿山深部的金矿资源远景非常乐观。据此在 1993 年和 1996 年分别预测焦家矿田和玲珑矿田发育“深部第二富集带”。后经勘探, 证明胶东金矿深部较普遍存在“深部第二富集带”。

(2) 超高压变质“构造增压壳内成因”的深入研究

超高压变质的“构造增压壳内成因”研究, 不仅具有全球构造的意义, 也是构造地质学的前沿问题。超高压变质的广泛深入研究, 带动了深部地质、岩石学、矿物学、地球化学等多个学科的研究与发展, 同时也涌现出新的观点。如超高压变质的“深俯冲-折返”模式和“构造增压壳内成因”模式等。前者认为超高压形成于超过 100 km 的深度; 而“构造增压壳内成因”模式认为, 超高压的形成深度介于 33~55 km。运用构造物理化学的新认识开展变质岩构造研究, 能够发现和开拓新的科学问题, 促进地质科学理论方法的创新与发展。

(3) 构造作用下液体改变岩石变形性质的研究

①地震灾害过程流体-岩石系统的构造物理化学约束

根据目前的认识, 关于流体-岩石系统, 在时间尺度, 地震断层至少经历以下变形阶段: 间震期断层蠕滑与断层闭锁、准静态失稳与地震成核、亚临界失稳、同震滑动, 以及震后断层余滑与松弛阶段的非稳态蠕变。研究岩石变形特征和断层滑动方式随深度的变化规律, 同时要考虑构造力引起的局部构造超压和温度效应, 也是认识地震活动规律性的重要内容。断层滑动的稳定性与地震的孕育和发生, 是一个复杂的地质、物理和化学作用, 研究流体-岩石系统的构造物理化学影响, 也是分析强震孕育条件、探索震前机理和预测的研究方向。

②水岩系统的构造作用, 能够改变岩石变形性质

流体活动与岩石相互作用始终贯穿断层变形时空的各个阶段, 对断层强度与变形机制和地震诱发机制有重要影响。流体对地震活动的影响, 体现在物理作用和化学作用两个方面。流体对断层带的物理影响包括: (a) 流体对断层流变强度的弱化; (b) 流体增加了孔隙压力, 降低了有效压力, 降低了断层摩擦强度; (c) 流体促进了断层的非稳定滑动, 有利于断层地震成核。然而, 流体的化学作用影响断层强度和地震孕育方面尚未引起重视。实验研究已经证实, 流体对断层带的化学影响包括: (a) 流体与岩石发生反应, 生成了含水的环状和层状矿物, 从而降低了断层的强度; (b) 流体促进了断层带裂缝的愈合, 增加了断层的强度, 但同时也提高了断层带内流体压力, 改变了构造岩带强度和脆塑性转化的深度。因此, 开展流体对于断层带构造、物理和化学的综合研究, 分析流体-岩石系统的构造物理化学约束条件, 是断层力学与地震孕育机制、地震预测研究中非常重要的研究内容。

(4) 矿田构造变形岩相填图和深部外围找矿

“就矿找矿”是深部外围找矿的常用方法, 目标是寻找达到工业品位的矿脉。但是, 多数矿山的矿体已经采空, 深部预测没有找矿标志, 如何找矿? 这成为深部找矿的问题, 也是矿山普遍的生产难题。

矿田“构造变形岩相”填图, 能够弥补这一缺陷。“构造变形岩相”用来显示构造变形的矿化地质体, 就是说, 成矿构造变形岩相不仅包括金矿脉, 还把近矿-远矿的蚀变, 甚至蚀变的围岩也归为蚀变岩相带。由于构造蚀变带整体作为预测的目标, 从而把找矿标志从几米宽扩大为几百米甚至上千米宽, 大大提高了找矿效果。提出“构造变形岩相”的成因分类, 建立了“构造变形岩相”的识别地质标志, 划分了 31 种构造变形岩相类型, 形成了适用于野外观测、室内研究的找矿预测方法。该方法加快了圈定靶区的速度, 显著提高了预测能力。

近年, 在海南抱伦金矿、内蒙柴胡栏子金矿、豫西栾川钼矿、赣南钨矿等地, 用构造变形岩相填图方法取得找矿重要进展。

(5) 岩浆成岩构造测量和流变结构几何研究

经过 10 多年的花岗岩构造岩相野外填图和室内测试研究, 建立了岩浆岩构造岩相的分类方案, 划分

出3类岩浆岩构造岩相：剪切构造岩相、引张构造岩相、挤压构造岩相。对于胶东成矿花岗岩，可以考虑：

①剪切构造岩相的结构构造

例如，玲珑型似片麻状黑云母花岗岩。最明显的岩石结构特征是普遍发育韧性变形的C-S组构，变形矿物不是轴面对称，而具有斜方对称特征。依据构造测量的要求，可以开展野外构造填图，推测应力的方式和运动的方式。

②引张构造岩相的结构构造

例如，栾家河型中粗粒等粒二长花岗岩。岩浆在开放性构造环境侵入成岩。岩石结构与围岩组构不协调，内部无明显定向性，产于较稳定的成岩环境，这是典型张裂带区岩浆岩相。

③挤压岩相的结构构造

例如，郭家岭型粗粒似斑状花岗闪长岩。受定向挤压应力作用结晶-碱交代成岩的典型构造特征，还有暗色矿物和基质矿物平行于主挤压面定向的流动状分布，以长石斑晶为代表的矿物组成典型的共轭排列，共轭钝夹角约为 135° 。它们的钝交角平分线指向挤压应力方向，且平行最大主应力方向往往发育引张断裂和空间，也说明受到定向挤压应力。

(6) 油气田成藏构造应变-应力场的定量化研究

油气在一定的地质环境中可以产生远距离运移，该运移过程的动力学机制可以用浮力与重力之间的差值进行解释。该现象是油气构造中出现过剩压力造成的。油气在过剩压力的作用下发生运移的过程中，过剩压力的梯度与渗透率之比决定了运移方向。油气在垂向过剩压力梯度大的区域，运移方向可能为垂向；而当油气在垂向过剩压力梯度较小且储层渗透率较好的区域，则会出现以水平运移方式为主的迁移过程。总之，油气的运移都是受到过剩压力差的影响，从高压值区域向低压值的方向运动。以陕甘宁盆地庆华地区的B6井区长3油层为例，盆地的油气从四周的相对高压值区向低压值区运移，最终在低压值区域形成了局部的油气富集区。上述案例中，地壳同一深处的压力值并不相等。这一现象产生的原因，可能正是由于地壳中存在的构造附加压力（张力）。因此在研究油气长距离水平运移的时候，构造附加静水压力可能是油气运移富集的重要驱动力来源。

近年来有关剪切变形使页岩物理性质（如温度、压力、氧化-还原条件、元素活度等物理化学条件）的改变，控制页岩气富集规律的研究成果，已经形成了构造改变岩石的物理特征-岩石的物理化学条件-油气运移富集的思路和技术路线。

(7) 煤变质大分子结构演化的构造物理化学研究

煤对温度、压力等地质环境因素的变化十分敏感，各类构造-热事件会使煤发生物理、化学、结构和构造等变化，如构造运动能够破坏煤的结构，形成各类构造煤，从而影响到煤层气的产生，增加瓦斯突出危险性，是制约煤炭和煤层气资源开采和生产安全的重要问题。

曹代勇等人的研究显示，构造动力变形不仅是一种物理作用，同时也起着化学作用，促进了煤大分子结构变化，揭示了构造应力，特别是剪切应力所导致的煤结构裂解、聚合、异构、芳构等化学效应。在此基础上，提出了应力降解和应力缩聚两种机制，强调了构造应力在煤化作用中的“催化”意义。未来，定量化测试由构造应力产生的温度、压力和其他物理化学条件变化引起的各类效应，将是煤变形-变质化学作用的研究方向。

(8) 地热田分布与发育过程的构造物理化学研究

以陆内构造体系研究成果为基础，把应变应力规律的研究方法，用于研究地热的构造物理化学分布规律。

新华夏构造体系发育NWW 300° 方向（长江式构造）横张构造，其控制了我国东部两条巨大地热温泉分布带。实际上，这一重要方向的断裂带，基本上是地幔隆起带切地壳的深断裂，是中新生代以来的构造岩浆岩带，是新构造的活动带。新华夏构造体系的分布和演化研究，将会对中生代资源、环境和地震灾害的控制影响作用具有巨大的推动力。

西藏地热研究发现，地热分布带受NNE 30° 方向构造控制。根据西藏反S形弧形构造体系分析，认为该组控制地热的NNE 30° 方向构造是一组张性构造，为西藏S形压扭性构造带的横张断裂。

(9) 地球物理的构造岩相勘查

地球物理探测和深部钻探结果表明，地壳物质成分和结构随深度变化很大，地表地质图不能代替深部地质体特征，地球物理异常图不等同地质图。而矿床地质的复杂性及成矿类型多样性，严重制约了深部预测参数的准确和数学模型的有效性。需要加强构造变形岩相带为基础的综合研究，包括地质模型、

岩石矿物的物性参数和数学模型等方面的综合研究,才能推进和提高地球物理勘查的有效性和精确性。

近些年来,综合发展“地物化三场异常耦合”理论和方法,提出了“构造岩相带为基础的地球物理勘查分类”,将“构造变形岩相带”作为物探目标体,实测和实验确立构造蚀变岩相独立的物性参数,依此提高了地球物理勘探的成矿预测能力。

研究强调,构造变形变质的岩石物性和地球物理勘查要依赖地质工作:(a)确定目标的地质研究比例尺,再选择适用的物探方法组合和精度。由于地质体物质成分和结构构造研究的精细程度,已经远高于地球物理勘查,地质勘探的要求决定了地球物理方法和工作设计;(b)研究构造应力和应变状态,分析矿区挤压带导矿和引张带富矿的规律,注重张性蚀变相岩石的物理参数和勘查信息研究,提高预测勘查效果;(c)地震勘探是识别不同地质体界面的最好方法。从分析地震相特征入手,建立构造岩相带的判别标志,乃是深部资源和地震灾害勘探的有效途径。

(10) 构造蚀变岩相的地球化学勘查

马生明等在海量的化探资料基础上,结合构造变形岩相地质填图开展焦家金矿区勘查地球化学研究。这一工作将推进地质认识达到勘查地球化学的量化阶段,是区域地质找矿新的探索。

焦家式金矿属于复成构造蚀变岩型金矿,矿床的形成受初始矿源岩、直接矿源岩的联合控制。矿源岩系研究显示,变质岩与交代重融成矿花岗岩,在元素成分上有明显的区别。而构造蚀变岩是花岗岩经历构造蚀变后形成的,岩石的化学成分与原岩相比发生较大变化,这就为地球化学勘查提供了应用前提和条件。

(11) 陆内岩浆核杂岩隆起-拆离构造的特征

胶东地区发育卵状或穹窿状成矿花岗杂岩体,称为“岩浆核杂岩隆起构造”。胶东岩浆核杂岩穹窿构造组合非常典型,金矿受控于“岩浆核杂岩隆起-拆离构造作用”。“岩浆核杂岩隆起”构造在中国复合大陆中可能较普遍发育,在中新生代并不发育变质核杂岩构造。胶东“岩浆核杂岩隆起-拆离带蚀变岩金矿床”,在全球已知金矿床类型中是独特的。

(12) 构造体系的“米字型”结构面特征

新华夏系“米字型”构造,由 NNE 25°方向挤压断裂和褶皱带、NNW 345°方向(大义山式)张扭断裂、NEE 75°方向(泰山式)压扭构造和 NWW 300°方向(长江式)的横张构造组成。其演化经历了共轭剪切构造、挤压构造和张性剪切构造三个阶段。“米字型”构造样式的识别,为研究构造体系的应力-应变成因,探讨构造体系的形成演化提供了新的研究思路。

① 共轭构造阶段:发育 NNW 340°方向(大义山式)张扭断裂和 NEE 75°方向(泰山式)压扭构造,控制基性-中性脉岩及相关金属矿产形成。

② 挤压构造阶段:发育 NNE 25°方向的褶皱-断裂带和隆起-沉降带,组成构造体系的主体,对于油气、煤炭和铀铝等沉积型矿床具有重要的控制作用。

③ 横张构造阶段:发育 NWW 300°方向(长江式)的张裂构造。它们强烈改造了地区构造格局,发育有大规模的张扭性断裂构造带,控制形成了重要的与岩浆岩有关的多种金属矿床、矿带,并且进一步造成大型地块的移位变动,对于研究区域地壳稳定、分析地震活动、探寻地热资源等方面都有现实意义。

4 结语

“构造作用力如何影响化学平衡”依然是个难题,地质学家们从不同角度对这一科学问题进行了广泛的研究。从 20 世纪 80 年代起,吕古贤等开展地质力学矿田构造研究,注重以构造应力场的数学力学研究为起点,提出了“构造附加静水压力”的新概念,逐步兴起、发展成为构造物理化学的新学科研究领域。近几年,在煤田地质、油气田构造、水岩系统实验、物探和化探勘查、成岩成矿热力学、地热和岩浆岩构造等方面,应用、推广和发展了构造物理化学理论方法,并产生了重要的学术影响。

构造物理化学是李四光地质力学理论的新发展,是杨开庆构造动力成岩成矿理论的继承和发展。近四十多年来,构造物理化学的研究和实践得到郭文魁、宋叔和、孙殿卿、陈庆宣、陈国达、涂光炽、曹国权、刘宝珺、张炳熹、董申保、沈其韩、张本仁、马宗晋、欧阳自远、翟裕生、李廷栋、叶大年、常印佛、任纪舜、裴荣富、何继善、古德生、岳光溪、欧阳晓平、邱爱慈、李焯芬、张铁岗、郭仁忠、多吉、王双明和毛景文等院士的鼎力支持与热情帮助。近 20 年期间,刘瑞珣、王方正、胡宝群、郭涛、张宝林、王宗秀、王红才、周永胜、曹代勇、许德如、刘建朝、杨兴科、方维萱、韩润生、王翠芝、刘建民、焦建刚、申玉科、韦昌山、马立成、刘向冲、刘贵和马越等,协同开展了大量的研究工作,还有 30 多名博士研究生和硕士研究生参加了野外地质、室内测试和实验研究,在此表示衷心的感谢。