

论沉积盆地内成岩相系划分及类型

方维萱^{1,2}

FANG Weixuan^{1,2}

1. 有色金属矿产地质调查中心矿山生态环境资源创新实验室, 北京 100012;

2. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093

1. Innovation Laboratory of Mine, Environment and Mineral, China Nonferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China;

2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China

摘要:沉积盆地内成岩作用和成岩相系划分研究,不仅有助于提升对沉积盆地内金属矿产、非金属矿产、能源矿产(石油、天然气、煤和铀矿)等同盆共存富集与协同成岩成矿成藏作用等方面的研究水平,也有助于提升对沉积盆地形成演化历史、盆山和盆山原耦合转换等大陆动力学过程的深入研究。将沉积盆地内成岩作用和成岩相系划分与地球化学岩相学识别技术紧密结合,采用构造岩相学与地球化学岩相学研究思路和方法,以成岩事件序列为主线,将沉积盆地内成岩相系划分为:①成盆期埋深压实物理-化学成岩作用和成岩相系;②盆地改造期构造-热事件成岩作用与构造热事件改造成岩相系;③盆内岩浆叠加期构造-岩浆-热事件成岩作用和岩浆叠加成岩相系;④盆地表生变化期表生成岩作用和表生成岩相系。从地球化学岩相学成岩机理上,对成岩相系的成岩环境和成岩机理进行识别,促进非金属矿产、金属矿产-油气资源-煤-铀等同盆共存与协同富集成矿成藏机理研究和深部矿产资源预测。

关键词:沉积盆地;成岩相系类型;成岩作用;分类

中图分类号:P586 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)11-1692-23

Fang W X. Classification and types of diagenetic lithofacies systems in the sedimentary basin. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(11): 1692-1714

Abstract: Classification of diagenesis lithofacies systems in sedimentary basin may help promote the research level of enrichment and synergistic diagenesis-mineralization for metallic and nonmetallic deposits and such energy mineral resources as oil, gas, coal and uranium deposits in the same basin; moreover, it may encourage researchers to get a better understanding of geodynamic process in basin evolution and formation, coupling transitions of basin-mountain, and coupling transitions of basin-mountain-plateau. In this study, systems of diagenetic lithofacies in the basin were categorized based on the principal line of diagenesis events in the basin, using means of tectonic lithofacies and geochemical lithofacies, and combining diagenesis and systems of diagenetic lithofacies with recognition technology of geochemical lithofacies. Systems of diagenetic lithofacies in the basin were classified into four systems, i.e., diagenesis system formed by buried compaction to chemical diagenesis at the stage of basin formation, renovated diagenesis system formed by tectonic-thermal events at the stage of basin renovation, magmatic superimposed diagenesis system formed by thermal events of tectonics-magmatism at the stage of magmatic intrusions in the basin, and supergene diagenesis system at the stage of supergene modification in the basin. Therefore, environments of diagenetic lithofacies and diagenetic mechanisms may be recognized from the mechanism of geochemical lithofacies. This may help promote the research level of enrichment and synergistic diagenesis-mineralization for metallic

收稿日期:2020-02-10; **修订日期:**2020-05-28

资助项目:国土资源公益性行业科研专项项目《塔西砂砾岩型铜铅锌矿床成矿规律与找矿预测》(编号:201511016)、《塔西地区砂砾岩型铜铅锌矿床成矿系统、找矿预测技术集成与靶区圈定》(编号:201511016-1)、国家自然科学基金项目《有机质与金属矿共存的微纳米尺度特征及成藏成矿机理》(批准号:41872160)、云南省矿产资源评价工程实验室(2010)和云南省地质过程与矿产资源创新团队项目(2012)

作者简介:方维萱(1961-),男,博士,研究员,从事沉积盆地和造山带、矿产普查与勘探研究。E-mail:569026971@qq.com

and nonmetallic deposits, such energy mineral resources as oil, gas, coal and uranium deposits and predication of deep mineral systems in the same basin.

Key words: sedimentary basin; types of diagenetic lithofacies systems; diagenesis; classification

按照淡水-半咸水介质、酸性水介质(含煤地层)和碱性水介质(盐湖),对不同成岩阶段划分与成岩相进行深入研究,促进了油气资源储集层预测和勘探新发现^[1-3]。在沉积盆地内成岩作用和成岩相研究方面,岩石类型、地理-气候环境类型、成岩演化阶段和成岩事件序列、盆地动力学类型、沉积盆地成岩作用系统、构造成岩作用、岩浆热事件、水-岩-烃-流体相互作用系统及时空演变机制成为重点领域^[3-9]。近年,在中国塔里木、鄂尔多斯、二连和海拉尔盆地,玻利维亚、阿根廷北部等盆山原镶嵌构造区,发现了非金属矿产、金属矿产-油气资源-煤-铀同盆共存与协同富集成矿成藏^[10-18],揭示需从协同勘查新角度,重新认识沉积盆地内成岩事件序列与成岩相系、成岩成矿成藏事件与成岩相类型;深入揭示多种矿产同盆共存的成岩成矿成藏动力学机制,进行高效综合找矿预测,为深部(5000 m)示矿信息提取、构造相体填图、成矿成藏圈闭构造预测提供依据。邹才能等^[3]针对碎屑岩、碳酸盐岩、火山岩等扩容性成岩相,发育有机酸性水溶解作用、白云石化等8种成岩作用机理,划分了9类扩容性成岩相和7类致密化成岩相,建立了“孔渗级别+岩石类型+成岩作用类型”的成岩相命名方案。沉积盆地内成岩作用可划分为沉积-化学流体成岩作用、沉积-构造成岩作用和沉积-热变质成岩作用,它们形成了三大类成岩相系,为多重地质作用和相互叠加形成的构造岩相学的产物^[9]。成岩事件序列包括埋深压实成岩事件、构造-热事件、构造-流体-热事件、构造-壳源岩浆-叠加热事件、构造-幔源岩浆-叠加热事件,按照构造岩相学和地球化学岩相学研究方法和填图理论,建立成岩事件和成相事件序列,对油气和金属矿产预测具有重要作用。将沉积盆地内成岩成矿期次划分为同生沉积成岩成矿期、早期成岩成矿期(B和C阶段)、中期后生内源性热流体改造成岩成矿期(A、B和C阶段)、中期后生外源性热流体叠加改造成岩成矿期(A、B和C阶段)、晚期表生成岩成矿期(A、B和C阶段)。按照参与成岩成矿流体介质类型的不同,划分为酸性相、碱性相、中性相、多期叠加相及多种过渡相类型^[9]。

沉积盆地内构造成岩作用、构造-岩浆-热事件和成岩事件序列、成岩相系等科学问题,仍处于持续完善和不断创新研究中。由于沉积盆地具有复杂的演化历史,需从成盆期、盆地变形改造期、盆内岩浆叠加期、盆地表生变化期等重大地质事件序列出发,深入研究山-弧-盆和盆山原镶嵌构造耦合转换过程中,沉积盆地内成盆期、构造-热事件改造期、盆内构造-岩浆-热事件叠加期、盆地表生变化期与成岩成矿成藏作用,揭示盆内多种叠加改造成岩作用在物质-时间-空间上的耦合结构和分布规律、成岩成相与成矿成藏机理、含矿和示矿信息提取原理。从(非)金属矿产-油气资源-煤-铀等多种矿产同盆共存富集成矿成藏角度,揭示多种矿产协同富集规律、成矿成藏机理、示矿信息提取原理。本文以地质系统复杂性科学理论^[19]为指导,以成岩事件序列为主线,将构造岩相学^[20-23]与地球化学岩相学^[24-27]研究方法相结合,进行共性导向和交叉融合研究,对成岩事件序列和成岩相系的物质-时间-空间结构进行研究。将沉积盆地内成岩相系划分为:①成盆期埋深压实物理-化学成岩相系;②盆地改造期构造-热事件成岩作用与构造热事件改造成岩相系;③盆内岩浆叠加期构造-岩浆-热事件成岩作用和岩浆叠加成岩相系;④盆地表生变化期内表生成岩作用和表生成岩相系。从地球化学岩相学机理入手,对成岩相系成岩环境和成岩机理进行识别,促进(非)金属矿产-油气资源-煤-铀同盆共存协同富集、成矿成藏机理研究和深部资源预测。

1 沉积盆地内成岩作用与成岩相系划分

1.1 成岩作用类型与成岩相系

对沉积盆地内的油气和煤炭资源相关成岩阶段和成岩相划分,遵循前人研究方法^[1-8]。在大陆内部山-弧-盆和盆山原耦合转换过程中,从(非)金属矿产和能源矿产(石油、天然气、煤炭和铀)高效综合勘查角度,考虑到盆地改造期、盆内岩浆叠加期等后生叠加成岩作用,以金属矿产储集相体层、能源矿产优质储集层成岩作用和控制因素为核心,按照成岩事件序列、成岩作用方式、参与成岩作用

的物质和能量内源性及其外源性流体叠加成岩机理,将沉积盆地演化期次和沉积盆地内成岩作用事件相结合,划分出成盆期埋深压实物理-化学成岩作用、盆地改造期构造-热事件成岩作用、盆地岩浆叠加期构造-岩浆-热事件叠加成岩作用和盆地表生变化期表生成岩作用四大类型成岩作用(表1;图1、图版I),它们分别形成四大类成岩相系^[9]。

在成岩相系和相类型划分的基础上,将构造岩相学填图^[20-23]、地球化学岩相学填图和识别技术^[23-27]相结合,配合流体地质填图、专题填图、矿物包裹体研究等专题方法^[28-34],确定成岩作用演化、成岩相系组合和成岩事件序列^[35-39]。可有效圈定沉积盆地内成盆期与成岩事件、盆地改造期与构造-热事件改造成岩事件、盆地岩浆叠加期与构造-岩浆-热事件叠加成岩事件、盆地表生变化期和表生成岩事件等,以及不同成岩事件序列在物质-时间-空间上的结构特征、识别标志和分布范围,最终进行深部构造岩相体探测和矿产资源预测。

(1)成盆期埋深压实与物理-化学成岩作用。沉积物在埋深压实过程中经历了沉积-生物-物理-化学等初始成岩作用,以沉积盆地内源性地质作用和内源性热流体作用为主。在沉积盆地内部整体性埋深压实过程中,沉积-生物-物理-化学作用等初始成岩作用具有显著的耦合过程,如因埋深压实作用(沉积物自身重力作用)导致沉积物密度增高和孔隙度减小的物理收缩作用,同时随着埋深增大和压实作用增强,沉积物中水的排泄作用增强。伴随古地温场增热作用增大(压力-热效应),有机质成熟作用和成熟度增加;随着物理-化学-内源性流体耦合成岩作用增强,成岩相系内相分异作用也随之增加,在成盆期内形成与埋深压实物理-化学成岩作用有关的相系和相类型(初成岩作用或早期成岩作用)。

(2)盆地改造期内构造-热事件改造成岩作用主要由盆地变形过程中构造-热事件、构造应力、热应力事件作用等综合形成。如垂向构造抬升和沉降作用、横向挤压收缩作用、斜冲走滑构造作用、层间滑动作用等,它们均形成了局域构造成岩作用。角度不整合面和古风化壳、节理-裂隙构造带、层间滑动构造带中碎裂岩化相、构造热流体角砾岩相、节理-裂隙化相、热流体角砾岩相、碎裂岩化相、糜棱岩化相、似层状类角岩-类角岩化相等构造岩相学类型

和相体,由盆地改造期内构造-热事件所形成。

(3)盆地内岩浆叠加期以构造-岩浆-热事件叠加成岩作用为主导,形成异源岩浆侵入叠加成岩作用和沉积-热变质成岩作用,它们为盆地内构造-岩浆-热事件叠加成岩相系类型和相体结构。①在盆地内岩浆叠加期,火山喷发-岩浆侵入作用由来源于盆地底源深部地质作用所形成,火山岩体-侵入岩体本身是异源叠加成岩相体,以底源热物质和热能量添加为主;同时,在盆地内形成岩浆热流体循环对流体系和叠加成岩作用,对沉积盆地内先存的沉积相系,形成强烈的叠加改造成岩作用。②构造-岩浆-热事件和相关构造岩相体,围绕盆地内侵入岩体和火山喷发机构呈环带状和半环状分布,如角岩-角岩化相系、矽卡岩-矽卡岩化相等,为盆地内侵入岩体接触热变质和接触热交代作用形成的构造-岩浆-热事件记录。③在盆地内岩浆叠加期,同岩浆侵入期构造-热事件发育;沿同岩浆侵入期断裂带内,常形成面带状和线带状热液蚀变带、角岩化相带和矽卡岩化相带,为岩浆热液-盆地热流体循环对流体系形成的叠加成岩相带。④与区域性构造-岩浆-热事件同期,在增温型区域古地热场和构造动热转换作用下,形成沉积盆地内大气降水-盆地封存水等组成的热水循环对流体系,常以角度不整合面、滑脱构造带、断裂带、热液角砾岩相带等为热水循环对流体系中心,形成构造-热事件叠加成岩作用。这些构造-热事件叠加成岩事件和相系特征标志,为深部构造相体填图和找矿预测的示矿信息提取对象。

(4)在盆地表生变化期,以沉积盆地局部抬升和剥蚀作用为主,表生裂隙发育且与地表潜流层相互作用强烈,大气降水渗滤循环作用形成沥青化蚀变相和炭质岩系的褪色化蚀变。在热带雨林区形成铁铝矾土、铁矾土、铝矾土化、富有机质酸化沼泽土等地球化学高氧化态的酸性相。在干旱气候条件下,以机械风化作用和盐碱障积沉淀作用为主,其次为毛细管蒸腾作用,发育氯化钠型盐积盘壳(如氯铜矿盐磐层,图1)、白垩土化型钙积盘壳等,尤其是铜、铁、铝、锌等,煤、油页岩矿等,它们具有显著表生成岩作用。

1.2 成岩相系的相类型与预测功能

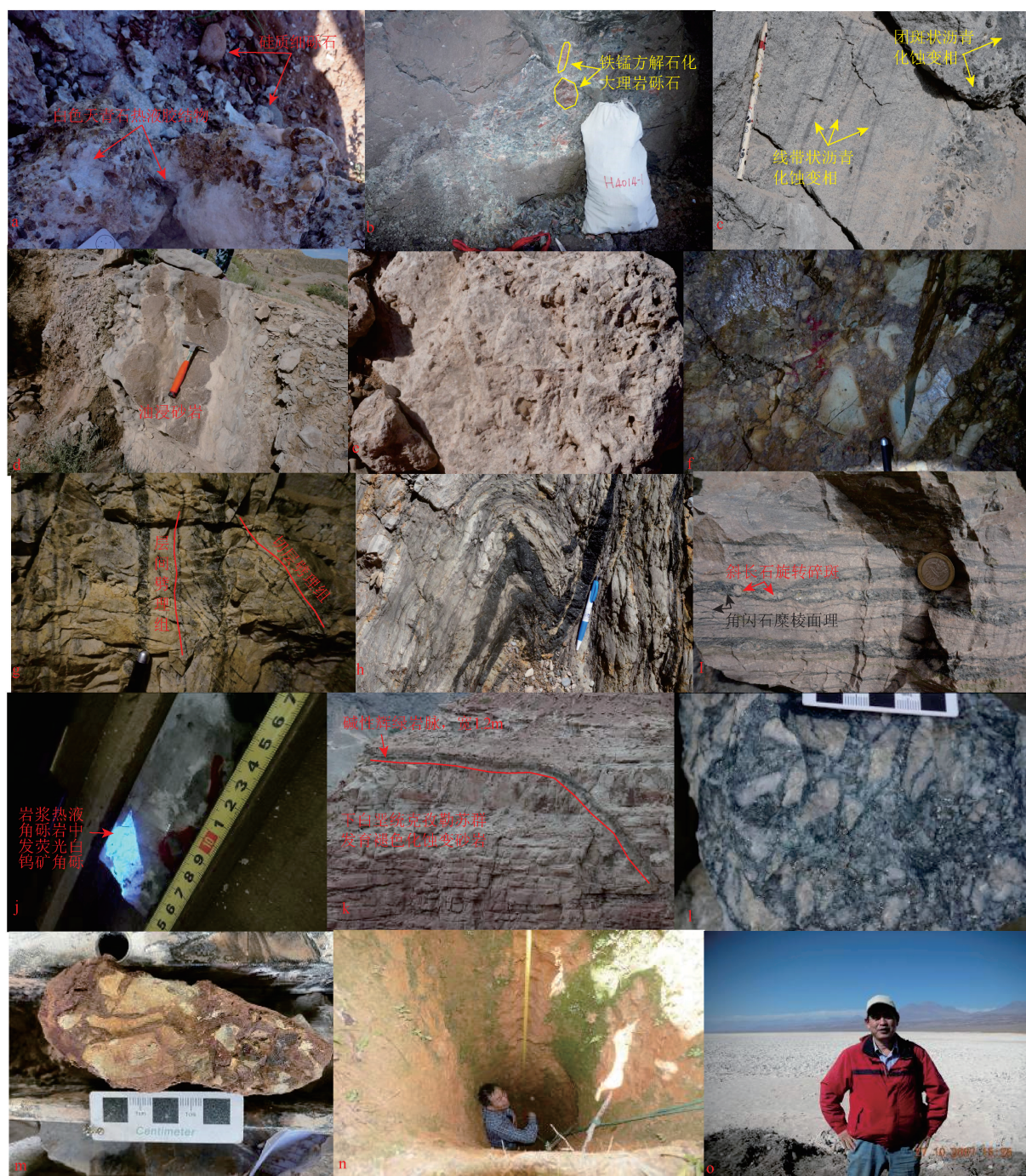
在成盆期埋深压实物理-化学成岩作用、盆地改造期内构造-热事件改造成岩作用、盆地岩浆叠加期的盆地内构造-岩浆-热事件叠加成岩作用、盆地

表 1 沉积盆地内成岩相系类型及特征

Table 1 Classification and natures for system of diagenetic lithofacies in sedimentary basin

成岩期次与 成岩相系	主要成岩相系类型	主要相类型与成岩环境
成盆期与埋深 压实物理- 化学成岩相系	酸性成岩相系	成盆期包括初始成盆期、主成盆期和盆地反转期前,在埋深压实成岩环境中形成有机酸型成岩相、无机酸型成岩相(图版 I-a)、复合酸型成岩相
	碱性成岩相系	天然碱-碳氢钠石-碳酸钠钙石-小苏打型碱性成岩相形成于尾闾湖盆内;盆地压实流体形成了 Fe-Mn-Ca-Mg 碳酸盐型碱性成岩相(图版 I-b)、片钠铝石型碱性成岩相、富碱性木质素碱性有机质成岩相等
	氧化-还原成岩相系	还原成岩相系(图版 I-c、d)、氧化成岩相系、氧化-还原成岩相系等形成于成盆期和盆地变形期过程中
	酸碱耦合反应成岩相系	硅质热液角砾岩相(硅化灰岩-硅化白云岩)、天青石热水岩溶角砾岩相(图版 I-e)、热水岩溶白云质角砾岩、复合热液角砾岩相
	化学溶蚀-充填成岩相系	碱性化学溶蚀-充填成岩相、酸性化学溶蚀-充填成岩相、酸碱反应-溶蚀-充填成岩相、水-岩-烃-流体-气相多重耦合反应相
盆地变形期与 构造成岩相系	同生断裂带-热化学 反应界面相系	热水沉积岩相(硅质岩、钠长石岩、碧玉质钠长石岩等)、火山热水沉积岩相(钾长石岩等)、钠质热水同生角砾岩相(图版 I-f)
	构造压实固结成岩相系	在盆地反转构造带、山原转换构造带和盆山转换构造带等区域,形成构造驱动盆地流体发生成岩作用
	节理-裂隙-劈理化 成岩相系	在前陆冲断褶皱带、盆内断裂带和盆内褶皱带内,构造破裂面和劈理化相带(图版 I-g)为成矿流体充填作用提供了构造空间
	碎裂岩-碎裂岩化相系	在盆内冲断褶皱带内形成断层相关褶皱(图版 I-h)和碎裂岩化相
	碎斑岩化相-角砾 岩化相系	在盆内层间和切层断裂内多期次碎裂岩化相叠加作用,形成构造碎斑岩化-构造角砾岩化相,层间滑脱构造带尤为显著
盆地岩浆叠加 期与岩浆叠加 成岩相系	初糜棱岩化相-热流体 角砾岩化相系	初糜棱岩化相-热流角砾岩化相系发育在脆韧性剪切带内,多伴随较强烈构造-热流体作用,热流体角砾岩化相为构造释压作用形成
	糜棱岩相系	在韧性剪切带内发育糜棱岩相(图版 I-i),与糜棱岩化相等有分带性
	壳源岩浆叠加相系	花岗岩等为主侵入岩类,形成岩浆热液角砾岩相(图版 I-j)、接触交代变质相系(矽卡岩相系)和接触热变质相系(角岩相系-角岩化相系)
	幔源岩浆叠加相系	以碱性超基性岩、碱性岩和碳酸岩等为主要侵入岩类,受幔型断裂带控制,呈带状延伸、岩脉(图版 I-k)、岩枝群、小岩株群等,伴有小规模蚀变带
	壳幔混源岩浆叠加相系	以碱性岩和碱性斑岩为主要侵入岩类,具有岩浆底拱侵位和幔型断裂释压上侵机制特征,伴随区域性构造-岩浆-热事件和陆内小型拉分盆地
盆地表生变化 期与表生成岩 相系	岩浆事件驱动的深部 热流体叠加相系	以隐伏侵入岩体为主,岩浆热液角砾岩(图版 I-l)发育面带状、线带状和弥漫状蚀变带,发育铁锰碳酸盐蚀变相、角岩化相、硅化相等蚀变岩相
	古表生成岩相系	在盆内角度不整合面和古风化壳中,发育古土壤层、古粘土风化层和古半风化层、古岩溶角砾岩(图版 I-m),后期盆内流体叠加成岩作用显著
	同构造抬升期表 生成岩相系	干旱气候下为陆内粗碎屑岩,湿热气候下发育红土型厚层风化壳(图版 I-o)
	盆地表生变化期 表生成岩相系	以向下楔形尖灭表生裂隙和表生富集矿物为主,发育赤铜矿-铜盐-副氯铜矿等特殊矿物组合(图 1)
	尾闾湖盆表生 成岩成矿相系	在陆相尾闾湖盆(图版 I-o)中形成方解石-白云石相、石膏相和芒硝相、氯化物相

图版 I Plate I



a.新疆帕卡布拉克天青石硅质细砾岩/氧化成岩相系,强酸性高氧化态相;b.新疆萨热克含铜细一中砾岩中砾石发生铁锰方解石化/铁锰碳酸盐岩型碱性成岩相系;c.新疆乌拉根砂砾岩型铅锌矿床中沥青化蚀变相/富烃类强还原成岩相;d.新疆杨叶油浸砂岩/富烃类强还原成岩相;e.新疆帕卡布拉克气孔状天青石岩/灰岩发生气成热水岩溶作用;f.云南东川落雪铜矿床内钠质热水角砾岩;g.云南落雪铜矿床内含铜碎裂状白云岩,辉铜矿沿切层和顺层劈理分布/劈理化相;h.新疆康苏煤矿区前陆冲断褶皱内断层相关褶皱与碎裂岩化相和劈理化相;i.智利月亮山铁铜矿床西侧韧性剪切带内角闪石-斜长石糜棱岩/糜棱岩相系;j.海南丰收钨铍铀矿床二长花岗斑岩与岩浆热液角砾岩;k.新疆萨热克碱性辉绿岩脉与褪色化蚀变带/盆内岩浆叠加相系;l.云南个旧电气石热液角砾岩相;m.云南SMG卡林型金矿床二叠系铁质岩溶角砾岩/古表生成岩相;n.印尼苏拉威西南探井深揭露风化壳大于7 m;o.智利阿卡塔玛盐湖内含锂硼硝石矿地表面景观/石膏硝石表生成岩相

表生变化期内表生成岩作用过程中(表 1;图 1、图版 I),因参与成岩作用流体类型、成分和性状不同、沉积物和沉积岩成分不同(不同的地球化学岩相学类型),这些相体结构和相类型在成岩(成矿成藏)作用上也具有不同的响应。可按照四大类成岩相系岩石组合,将成岩相系划分为不同相类型,这些相类型及相体结构组合具有特殊预测功能。它们有助于揭示和厘定成盆地埋深压实物理-化学成岩作用、盆地改造期构造-热事件改造成岩作用、盆内岩浆叠加期构造-岩浆-热事件叠加成岩作用、盆地表生变化期表生成岩作用。不同成岩事件序列和成岩相系在物质-时间-空间上的耦合结构和分布规律,可为预测和圈定隐蔽构造-热事件和隐伏盆内构造-岩浆-热事件提供依据。深入研究成岩事件序列和成岩相系特征,可为解析和预测金属矿产储集相体层、油气资源成藏系统、煤、铀成藏成矿系统等,提供丰富含矿和示矿信息。通过揭示成岩相系的成相-成岩-成晕与成矿成藏机理,为创建含矿和示矿信息提取创新方法提供科学依据。

2 成盆地埋深压实物理-化学成岩作用和相系类型

按照成盆地埋深压实物理-化学成岩作用(表 1;图版 I-a~f),从地球化学岩相学成岩机理和相分异作用角度,将埋深压实物理-化学成岩相系划分为 7 种主要相系类型,包括酸性成岩相系(如有机质酸性成岩相等)、碱性成岩相系(如 Fe-Mn-Ca-Mg 碳酸盐型成岩相等)、酸碱耦合反应成岩相、氧化-还原成岩相系(如硫酸盐热化学还原作用)、化学溶蚀-充填成岩相系、同生断裂带-热化学成岩界面相系和标型成岩矿物相系。

2.1 酸性成岩相系与相类型

酸性成岩相为有机酸、无机酸等酸性地球化学环境下成岩作用的总称。根据酸基类型和相关成岩作用,可进一步划分为有机酸型成岩相、无机酸型成岩相和复合酸型成岩相,它们为酸性地球化学相类型。但酸碱耦合反应界面成岩相系,主要为地球化学酸性-碱性相耦合反应导致化学聚沉作用所形成。

(1)有机酸成岩作用以有机质、煤、油气资源和外来富含有机质流体参与成岩作用为主,形成有机质酸性成岩相,主要表现为大量有机酸参与成岩作用。①沉积物和沉积岩中含有较多有机质、煤炭和烃类流体,随着成岩作用形成有机酸类和烃类流体参与成岩作用。②在沉积物形成过程中,外界有机酸物质大量加入而参与沉积物成岩作用,以富烃类还原性流体形成地球化学酸性还原相作用(如含烃盐水、气液烃类流体等)为特征。地幔和地壳排气作用也可形成有机酸成岩相,但目前对此研究不够。

(2)在酸性成岩相系内无机酸类形成于酸性成岩环境,包括沉积岩和火山岩系中的石膏-硬石膏岩相、重晶石-重晶石岩相、天青石-天青石岩相、明矾石-明矾石岩相、芒硝-无水芒硝-钙芒硝-白钠镁矾型含钠硫酸盐岩相、萤石-萤石岩相等,为典型地球化学高氧化态酸性成岩相。

(3)复合酸型酸性成岩相系包括磷灰石型磷酸盐相、氟碳铈矿型和独居石型含 REE(稀土元素)磷酸盐相、硼砂型硼酸盐相、电气石型硼硅酸盐相等,揭示了复合酸型的酸性成岩环境。磷酸盐相对于 REE 富集成矿有利。

(4)在同一成岩成矿体系内,地球化学酸性-碱性成岩相系常具有显著的地球化学相分异作用,如

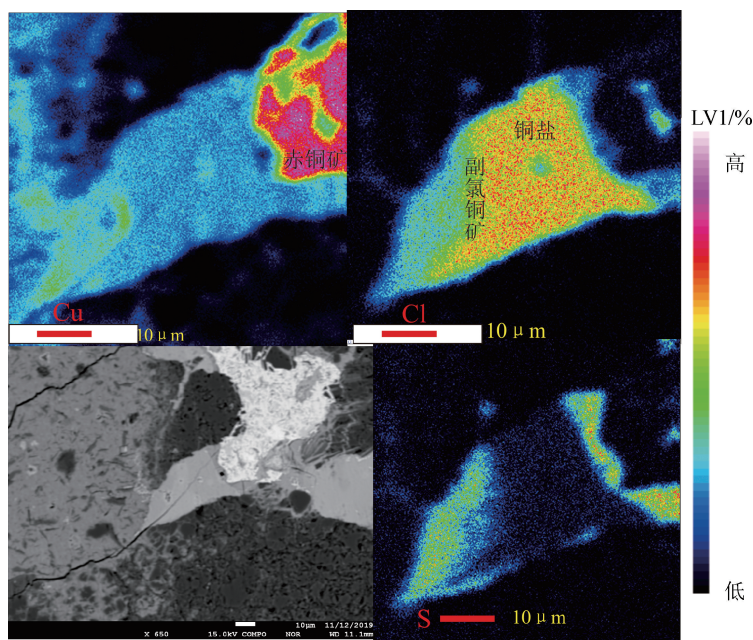


图 1 新疆杨叶铜矿床表生铜矿物电子探针 BSE 图

Fig. 1 BSE map for supergene copper minerals from Yangye copper deposit in Xinjiang

玻利维亚劳拉里 (Laurani) 高硫化型浅成低温热液金银成矿系统内地球化学相分异作用明显, 中心相为石英明矾石化蚀变带, 为重晶石-明矾石型地球化学高氧化态酸性相; 外缘相为绿泥石铁碳酸盐蚀变相, 为铁绿泥石型+菱铁矿型地球化学弱还原态弱碱性相。

2.2 碱性成岩相系与相类型

碱性成岩相系包括天然碱-碳氢钠石-碳酸钠钙石-小苏打型碱性成岩相系、Fe-Mn-Ca-Mg 碳酸盐型碱性成岩相系、片钠铝石型碱性成岩相、富含碱性木质素碱性有机质成岩相等, 为地球化学碱性相类型。钾钠硅酸盐蚀变相、黑云母蚀变相、绢云母蚀变相等也属碱性成岩相系。

(1) 在陆内山间盆地和高原盆地内, 陆内咸化湖泊环境中发育碱性地球化学岩相学垂向和水平相序结构, 有助于恢复咸化湖盆沉积环境和演化史。在干旱气候环境下湖泊水体逐渐咸化过程中, 溶解度较小的物质先沉淀, 形成碳酸盐沉积物、硫酸盐沉积物、氯化物沉积物等, 最终以沙化干枯而消亡, 具有 4 个碱性地球化学相组成的垂向相序结构。①碱化湖泊环境以方解石-白云石相、苏打-天然碱相和硼砂相为特征。在咸化湖泊环境初期, 溶解度较低的碳酸盐首先达到饱和而结晶沉淀, 形成碳酸盐沉积物。Ca-Mg 碳酸盐首先形成结晶沉淀, 形成方解石-白云石相。随着咸化湖泊环境进一步形成咸化水体, 形成苏打-天然碱, 苏打 ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)-天然碱 ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 以 CO_3^{2-} 浓缩富集为特征, 为碱湖环境或苏打湖。在较高硼含量的碱化湖泊环境中, 形成硼砂相 ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), 为硼砂湖。②苦盐湖环境以石膏相和芒硝相为特征, 水体进一步咸化和变浅, 硫酸盐类开始结晶沉淀, 形成石膏相 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。苦盐湖水体进一步咸化, 形成芒硝相 ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), 干旱气候下形成无水芒硝 (Na_2SO_4)。③残余苦盐湖环境中, 最终达到氯化物结晶沉淀期, 形成含盐量较高的卤水, 氯化钠型天然卤水可直接开采。湖水持续浓缩和蒸发, 氯化钠 (NaCl)、光卤石 ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 和钾盐 (KCl) 开始结晶沉淀。氯化物相为咸化湖泊环境下, 水体盐度最高的卤水环境。④咸化湖泊环境沙化萎缩期内最终被沙化和萎缩封闭, 封存于砂层下, 卤水层可再度形成成岩作用, 以水溶作用的地球化学碱性相为主要特征。

(2) 按照成岩作用方式, Fe-Mn-Ca-Mg 碳酸盐碱性成岩相系可划分为同生沉积型 Fe-Mn-Ca-Mg 碳酸盐碱性成岩相、Fe-Mn-Ca-Mg 碳酸盐蚀变岩相和 Fe-Mn-Ca-Mg 碳酸盐热液角砾岩相。在 IOCG 矿床成岩成矿系统中, Fe-Mn-Ca-Mg 碳酸盐蚀变相 (方解石化、铁方解石化-铁白云石化、锰方解石-锰白云石化) 为成岩成矿系统远端相标志。①铁白云石菱铁矿蚀变岩相、铁方解石-铁白云石蚀变岩相在先存脆性断裂带中, 热液充填作用形成的构造岩相学类型, 以铁白云石-菱铁矿-铁方解石矿物组合为特征, 揭示了地球化学强还原偏碱性相类型。②铁锰碳酸盐化硅化蚀变岩相以先存断裂带为前提, 指示构造减压作用导致两类成矿热液发生混合作用, 形成铜金银成矿物质卸载沉淀、扩容构造储矿构造环境。③铁锰碳酸盐热液角砾岩相可能为构造减压沸腾或成岩成矿流体内部压力较大而成, 揭示为构造-流体-围岩多重耦合结构, 属顶端相 (远端相) 热液蚀变体系中心部位。④铁锰碳酸盐化蚀变相多为顶部相的构造岩相学标志, 形成铁锰碳酸盐化角砾岩相带和铁锰碳酸盐化蚀变岩 (脉) 相带, 主要为金银铜富集成矿的构造岩相学指标。受断裂-裂隙构造控制明显, 一般分布在脆韧性剪切带和脆性断裂带中, 地球化学岩相学为开放体系中强还原偏碱性相。如智利月亮山和 GV 地区 IOCG 矿床、贝多卡铜银金矿床等。

(3) 在智利侏罗纪-白垩纪弧前盆地和弧后盆地内, 盆地改造期形成了铁锰碳酸盐化蚀变相, 为智利曼陀型铜银金矿床内小型储矿构造岩相学特征。①铁锰碳酸盐化蚀变相为盆地流体形成的构造流体蚀变岩相, 以铁锰方解石细脉-网脉带、铁锰白云石细脉-网脉带、铁锰碳酸盐化-硅化细脉-网脉带和盆地液压致裂角砾岩类为主。②细脉-细网脉铁锰碳酸盐化蚀变相和铁锰碳酸盐化-硅化蚀变相, 受脆韧性剪切带和脆性断裂带控制明显, 与碎裂岩化相共生, 为碎裂岩化相内节理和裂隙内热液充填物, 指示了盆地流体运移构造通道相。③铁锰碳酸盐化蚀变相与碎裂岩化-盆地热流体角砾岩化相共生, 铁锰碳酸盐化常为热液角砾岩化相内的热液胶结物, 具构造热流体角砾岩构造系统物质组成和构造岩相学特征。

2.3 氧化-还原成岩相系与相类型

氧化-还原成岩相系可以划分为还原成岩相

系、氧化成岩相系、氧化-还原成岩相系3种不同相系。

(1)还原成岩相系由5种主要相类型组成,分别为富氢气型还原成岩相、富氮气型还原成岩相、富有机质型还原成岩相、富 H_2S 型还原成岩相、富 $Fe-Mn-Mg-Ca-CO_2$ 型还原成岩相、富硫化物型还原成岩相,它们为主要地球化学还原相类型。气相流体在还原成岩相系中具有特殊作用,以水-岩-气多重耦合反应中气相还原作为特点。

(2)氧化成岩相系有5种主要相类型,以同生沉积成岩作用为主,分别为紫红色赤铁矿质氧化成岩相、灰色-灰黑色氧化锰质氧化成岩相、重晶石氧化成岩相、天青石氧化成岩相和石膏质氧化成岩相。在蚀变岩区和火山岩区,以赤铁矿相、明矾石相、重晶石相和天青石相、锰氧化物相、铜氧化物相(赤铜矿-氯铜矿等)等标志矿物相为地球化学氧化相确定依据。①在蚀变岩和蚀变火山岩区进行成岩相类型恢复,以标志矿物相为依据进行厘定,如赤铁矿相为青磐岩化和钠长石化蚀变区标志矿物相,赤铁矿青磐岩化蚀变相、绿泥石绿帘石赤铁矿相、绿帘石-赤铁矿相、钠长石-赤铁矿相等,均为地球化学氧化相确定标志。②在智利新近纪弧前山间盆地内,Mina Sur和Huiniquitipa(异地铜矿)砂砾岩型铜矿床发育高盐度地球化学氧化相,铜工业矿物为氯铜矿-副氯铜矿(内带)、硅孔雀石-孔雀石-蓝铜矿(中带)和含铜铁锰氧化物(外带),这些矿物呈胶结物形式分布在山麓-河流相粗砾岩和盐沼瀉湖相砂砾岩内。

(3)在氧化-还原成岩相系内,存在氧化成岩相与还原成岩相共存的氧化-还原非平衡相态,它们是非平衡相分异作用或相耦合界面直接的岩相学记录,也是典型氧化-还原作用导致物质聚沉的非等化学位相耦合反应界面物质的记录。如碳酸盐岩层内硫酸盐热化学还原作用(TSR)是典型氧化-还原成岩相,是导致富含硫化氢天然气生成和聚集、碳酸岩盐储层酸化和溶蚀的重要因素,也是沉积盆地内水-岩-烃类流体多重耦合反应。碳酸盐岩层富含干酪根热降解生成气态烃,与硫酸盐接触后发生热化学还原反应,热化学还原反应最低反应温度集中在 $100\sim 180^\circ C$;气态烃和硫酸盐是热化学还原反应的主要反应物,硫化氢、水、二氧化碳和碳酸盐、金属硫化物是主要产物,也是油气资源与金

属矿产协同成岩成矿作用机制之一。

(4)气侵作用与气相地球化学还原相作用。由于气相成分多为瞬态或中间过渡相态成分,气相地球化学还原相作用主要记录在矿物包裹体内气液相内。在新疆萨热克砂砾岩型铜多金属矿床内,①石英包裹体内发育 CO_2 型、 CH_4 型、 N_2 型、 H_2S 型、 N_2-CH_4 型、 N_2-CO_2 型、 $N_2-CH_4-CO_2$ 型、 $N_2-CH_4-H_2O$ 型等气相包裹体,它们分别为富氮气型、 CH_4 型富烃类、 CO_2 型、富 H_2S 型还原成岩相等不同地球化学岩相学记录。将含烃盐水、 CH_4 型气相、液烃、气烃液烃、轻质油、沥青等矿物包裹体归为富烃类流体还原成岩相。将 N_2 型、 H_2S 型、 N_2-CH_4 型、 N_2-CO_2 型等气相包裹体归为非烃类还原性成岩相。将 $N_2-CH_4-CO_2$ 型、 $N_2-CH_4-H_2O$ 型等气相包裹体归集为富烃类-非烃类混合还原性成岩相。总之,它们均具有还原成岩相的地球化学岩相学物质组成特征。②富氮气型还原成岩相独立存在,具有特殊意义, N_2 具有较强的地球化学还原相作用,煤层在遭受构造-热事件和构造-岩浆-热事件后,形成的煤层气具有 $CH_4-N_2-CO_2$ 型特征^[40],属典型气体地球化学还原相。冶金实验证明,惰性气体 N_2 具有还原作用,其不但有助于还原铜渣中 Fe_3O_4 ^[41],而且有助于将胶质黄铁矿还原为磁黄铁矿^[42]。塔里木叠合盆地天然气中氮气具有3种来源,油型天然气中氮气和煤型天然气中氮气,与烃类流体具有同源特征。烃源岩在成熟、高成熟和过成熟阶段均能形成氮气,塔西阿克莫木气田天然气中的氮气来自高-过成熟阶段烃源岩热氮化过程,还存在较明显的幔源 N_2 混入^[43],暗示塔西地区氮气具有多源性。萨热克地区硫和碳同位素示踪研究揭示,烃类流体来自下伏侏罗系煤系烃源岩,推测石英包裹体内氮气来自煤系烃源岩,随烃类流体运移到库孜贡苏组储集相体层内。③富氢型流体还原成岩相与沉积盆地内源型和盆地深部异源型气相氢和富氢流体气侵还原成岩作用有关。深部异源型气相氢和富氢流体气侵作用,与深部岩浆侵入活动和幔型断裂带气侵作用有关。气相氢和富氢流体具有较强的成矿物质搬运能力,也是地幔流体的主要成分之一^[44-46]。实验研究证明,超基性岩-基性岩在蛇纹石化蚀变过程中,形成 $H_2-CO_2-CH_4$ 型共生气相流体^[47-49],来自地幔的气相氢和富氢流体对油气资源形成具有特殊作用^[50-52]。煤岩、

煤系烃源岩、油型天然气和煤型天然气中气相氢和富氢流体,属盆地内源型富氢流体。煤系烃源岩和煤层自燃、构造煤岩、盆内岩浆侵入活动,均能使煤岩和煤系烃源岩形成气相 H_2 和富氢流体(H_2 - CO_2 - CH_4 型等),且 H_2 - CO_2 型非烃类流体与 CH_4 型烃类流体共生^[53-55],它们为内源型富氢型流体还原成岩相物质特征。在盆地改造期,构造-热事件造成油气藏破坏,油气的耗散作用^[56-58]形成铀矿床和大规模褪色化蚀变相系。萨热克砂砾岩型铜多金属矿区和乌拉根砂砾岩型天青石-铅锌矿区,发育大规模褪色化蚀变相,与富烃类还原性流体和富 N_2 - H_2 - CO_2 - H_2S 非烃类还原性流体大规模气侵还原性蚀变作用有密切关系,导致大量 Fe^{3+} 被还原为 Fe^{2+} ,形成褪色化-灰色化蚀变,属典型还原成岩相。现代煤层自燃作用仍在形成富氢气型流体,对于铁氧化物和铜氧化物相,具有较强的表生还原成岩作用,如砂岩型铜矿床内自然铜和赤铜矿,推测与气相 H_2 还原作用有关。

2.4 酸碱耦合反应成岩相系与相类型

在酸碱耦合反应成岩相系内,碳酸盐岩内热水岩溶作用为典型酸碱耦合反应界面成岩相系。如贵州晴隆大厂锑-萤石-黄铁矿-金矿田内,茅口组结晶灰岩-生物碎屑灰岩顶面发育硅质热液角砾岩相系。云南东川小溜口岩组白云质灰岩顶面古喀斯特和古风化壳发育,以复合热液角砾岩相系为铜金银钴综合矿体主要储矿构造岩相学类型。在新疆乌拉根砂砾岩型天青石-铅锌矿田内,古近系阿尔塔什组白云质角砾岩和白云质结晶灰岩之间,发育气成高温地球化学氧化态的酸性相作用,形成热水岩溶白云质角砾岩,为典型酸碱耦合反应形成的成岩相系(复合热液角砾岩相系)和相类型^[21-23]。

2.5 化学溶蚀-充填成岩相系与相类型

以酸性、碱性、酸碱反应的地球化学相作用为主,可进一步划分为碱性化学溶蚀-充填成岩相、酸性化学溶蚀-充填成岩相、酸碱反应-溶蚀-充填成岩相 3 种主要相类型。

(1)碱性化学溶蚀-充填成岩相。在海拉尔油气田内,发育幔源气藏和碱性幔流体交代作用,形成了碱性化学溶蚀-充填成岩相,碱性蚀变成岩相在酸性环境稳定矿物中发育大量热液溶蚀孔隙,形成柯绿泥石化、钠长石化、钠板石化、碳钠铝石化、蒙脱石化、方沸石化、片钠铝石化、绿磷石、铈褐

帘石、铁绿泥石等碱性成岩环境稳定的矿物。在碱性成岩环境中,铁方解石、铁白云石、菱铁矿等铁碳酸盐胶结物发育,碎屑高岭石和自生高岭石-迪开石等酸性成岩环境稳定矿物发生大量溶解溶蚀作用^[59-61]。沸石化相在碱性玄武岩和碱性岩中发育。

(2)酸性化学溶蚀-充填成岩相在碳酸盐岩中较发育,在富含有机酸流体或无机酸流体作用下,碳酸盐岩发生热液岩溶作用,形成大量扩容性裂隙和溶洞,充填酸性成岩环境中形成的热液充填物、热液角砾岩等。如贵州晴隆大厂金-萤石-锑矿田内,茅口组碳酸盐岩顶面不但发育古岩溶构造,而且火山热水岩溶作用强烈,形成硅化蚀变岩、硅化热液角砾岩、黄铁矿岩和重晶石-萤石热液角砾岩、萤石岩和石膏岩(脉),这些成岩相体局部呈上下小的漏斗状(古喀斯特),为典型酸性化学溶蚀-充填成岩相。

(3)酸碱反应-溶蚀-充填成岩相。在酸性地球化学岩相学和碱性地球化学岩相学相互作用界面,因强烈酸碱地球化学岩相学作用,形成酸性-碱性地球化学相耦合反应界面,导致在碱性成岩环境和酸性成岩环境内形成酸碱耦合反应、化学溶蚀和物理性充填作用,引起成岩成矿物质聚沉和同沉淀共存富集,为酸碱反应-溶蚀-充填成岩相。在云南东川新太古代-古元古代小溜口岩组顶面发育古风化壳和复合热液角砾岩构造系统,小溜口岩组顶面古喀斯特内形成巨晶状方解石铁白云石岩(碱性成岩相)、黄铜矿硅化铁白云石岩和黄铜矿硅化铁白云石热液角砾岩(酸碱反应-溶蚀-充填成岩相);在岩溶裂隙带内充填方解石黄铁矿脉带、方解石黄铜矿黄铁矿脉、黄铜矿黄铁矿脉、钴黄铁矿脉等酸性化学溶蚀-充填成岩相。它们是小溜口岩组复合热液角砾岩构造系统中构造岩相学的重要识别标志。

(4)水-岩-烃-流体-气相多重耦合反应相界面(如地下水溶蚀、流体混合、流体溶蚀、流体沸腾作用)。在早期沉积成岩过程中,盆地流体参与成岩作用,因地下水溶蚀、流体混合溶蚀、流体沸腾作用等在特定深度范围内,形成水-岩-烃类流体耦合反应相界面作用。在地下水的含水层内,不但可以形成地下水化学溶蚀层,也因该层为地下水渗流与盆地流体混合形成的流体混合层,溶蚀孔隙发育,为流体混合作用导致矿质沉淀的耦合反应相界面。在欠压实成岩作用区,因孔隙释压作用,低温流体

沸腾作用具有显著的热液充填-胶结成岩作用。火山岩区金属成矿与油气成藏,具有类似的水-岩-烃类流体多重耦合反应,需将微观尺度下的火山岩成岩作用和成岩演化研究,与宏观尺度的盆地构造-埋藏热史-烃类充注过程地质演化背景结合,建立与盆地构造演化史-埋藏热史-烃类充注史相应的火山岩储层的成岩-孔隙时空演化动态过程,从而实现火山岩成岩演化在空间-时间-物质上的定量化描述^[34]。

2.6 同生断裂带-热化学反应界面相系与相类型

同生断裂带为金属成矿盆地主要盆内同生构造样式,也是控制热水沉积岩相和火山热水沉积岩相系的主控因素,它们不但是各类成矿成藏流体运移和输送的构造通道系统,在沉积盆地内同生断裂带发育部位,也是重要的成矿成藏中心相,成矿成藏场所常围绕同生断裂形成同心圆状、椭圆状或带状拓扑学结构,以热水沉积岩相和火山热水沉积岩相系垂向相序分带和水平相序分带为典型特征,对恢复热水沉积成岩成矿系统和构造岩相学找矿预测具有较大作用^[35-39]。

2.7 标型成岩矿物相系及矿物地球化学岩相学指示意义

不同标型成岩矿物组合有助于恢复成岩相系的地球化学岩相学类型。①石膏-硬石膏相、重晶石-重晶石岩相、天青石-天青石岩相、明矾石-明矾石岩、萤石-萤石岩等,指示了地球化学高氧化态的强酸性相(酸性成岩相)。②天然碱(碳酸氢钠)、碳酸氢钠-碳酸钠钙石、片钠铝石、碳酸盐型卤水等,指示了地球化学高氧化态的碱性相(碱性成岩相)。在碱性成岩环境下,以方解石、白云石等碳酸盐胶结物为主,菱铁矿、白云石等标型成岩矿物相,石英多发生溶蚀作用。③高岭石-绢云母相等指示了酸性成岩相。在标型成岩矿物相系内,标型成岩矿物相可以用来恢复不同成岩温度相、古地温场和异常古地温场结构、压力相和构造侧向挤压应力场、盆地流体排泄场等。如,①石膏-硬石膏相的相变规律、结合矿物包裹体测温和测压等矿物地球化学岩相学研究,可以揭示埋深压实成岩作用和构造侧向挤压成岩作用,恢复盆地流体排泄场;②多水高岭石-伊利石-绢云母相与矿物地球化学岩相学研究,有助于揭示埋深压实成岩作用和构造侧向挤压成岩作用,恢复盆地流体排泄场;③结合矿物包裹体

等地球化学岩相学和矿物地球化学岩相学研究,不同类型绿泥石化成岩相,可恢复古地温场和异常古地温场结构、估算古地温场热通量、厘定构造-热事件、盆内构造-岩浆-热事件等^[22-27]。

3 盆地改造期构造-热事件成岩作用与相系类型

主要有 6 类构造-热事件改造成岩相系与盆地改造期构造-热事件成岩作用有关(表 1;图版 I-g~i),分别为构造压实固结成岩相系、节理-裂隙-劈理化成岩相系、碎裂岩-碎裂岩化相系、碎斑岩化相-角砾岩化相系、初糜棱岩化相-热流角砾岩化相系、糜棱岩相系。它们为构造应力和热力改造成岩作用不断增加过程中,构造热流体作用不断增强。盆地改造期构造-热事件成岩作用与相系类型,与盆地改造期构造-热事件场结构和构造-热事件序列有密切关系:①在单一构造-热事件形成过程中,构造岩相学侧向相序结构和分带规律,能够揭示构造-热事件场热结构和构造应力场分布规律。如塔西地区中—新生代陆内沉积盆地内,从沉积盆地中心到相邻造山带,构造岩相学侧向相序结构为固结压实成岩相系→节理-裂隙-劈理化成岩相系→碎裂岩-碎裂岩化相系→碎斑岩化相-角砾岩化相系→初糜棱岩化相-热流角砾岩化相系→糜棱岩相系,揭示了从沉积盆地→造山带耦合转换带内,构造岩相学水平相变规律为构造变形强度不断增加和构造应力场增大,构造-热事件形成古地温场不断增温,构造-热流体作用也不断增强。②在盆地改造期内,多期次构造-热事件叠加改造成岩作用,可形成两期以上构造-热事件改造成岩事件序列,均需要进行构造岩相学变形筛分,建立构造事件序列与构造-热事件序列。③在盆内构造-岩浆-热事件作用过程中,以侵入岩体为中心,形成盆内构造-岩浆-热事件叠加成岩作用,但随着远离侵入岩体,也形成同期区域构造-热事件改造成岩作用。在盆内岩浆叠加期形成侵入岩体尚未剥蚀出露地表,现今观测到构造岩相学特征为构造-热事件改造相系,需要结合深部构造相体填图、地球物理探测和地球化学岩相学综合研究,进行系统综合分析,寻找隐伏岩浆侵入构造系统和隐伏成岩成矿中心,这也是今后重要研究方向。

3.1 构造压实固结成岩相系与微裂缝相

(1) 构造成岩作用在盆山原转换构造带和盆山

转换构造带内十分发育。在沉积盆地边缘与相邻造山带构造转换带内(如前陆冲断褶皱带等),沉积物在埋深压实成岩作用和构造侧向挤压的压实成岩作用双重作用下,形成构造压实固结成岩相系。在沉积盆地边缘向盆地中心,构造侧向挤压或埋深压实的初始成岩作用较强,以沉积物压实、孔隙度减小、流体排泄、体积缩小等构造成岩作用为主。富水沉积物-矿物类(如粘土矿物、石膏等)发生脱水作用;泥质胶结物、赤铁矿、褐铁矿等铁质胶结物、有机质胶结物等细粒-胶体类胶结物压实成岩和脱水反应。在构造侧向挤压形成的压实固结成岩相系内,以发育裂缝相和微裂隙相为主要特点。因此,构造成岩相系也是识别盆山原和盆山转换构造带的构造岩相学标志之一。

(2)构造成岩作用在盆地反转构造带内发育。在盆缘同生断裂带的构造正反转作用包括由伸展作用反转为挤压作用、从走滑拉分断陷成盆作用反转为挤压走滑变形作用等。如新疆萨热克巴依盆地在中侏罗世末期,从拉分断陷成盆转变为挤压走滑作用为主导,在构造侧向挤压作用下形成构造应力压实固结成岩作用和微裂隙系统,随着构造侧向挤压应力增加,发展成为断层传播褶皱带。在断裂挤压变形-传播褶皱带内,构造侧向挤压和褶皱作用导致富水沉积物和粘土矿物、泥质和铁质胶结物,发生构造压实固结成岩作用,形成构造流体排泄作用、煤系烃源岩的构造生排烃作用。在中侏罗世末—晚侏罗世初盆地正反转构造作用下,在萨热克砂砾岩型铜多金属矿床北侧莎里塔什组、康苏组、杨叶组、塔尔尕组下段内,形成小型褶皱和层间褶皱,构造侧向挤压成岩作用造成煤系烃源岩生排烃作用增强;在中—下侏罗统内发育碎裂岩化相、层间裂隙相带和层间褶皱带,它们为盆地反转构造期形成的构造压实固结成岩相系^[15-17]。

(3)在盆山转换过程和盆地构造变形期,构造成岩作用在前陆冲断褶皱带和逆冲断裂-断层相关褶皱带内十分发育。在盆地卷入造山带的外缘带(盆→山转换带)、盆缘前陆冲断褶皱带、盆内逆冲断裂和断层相关褶皱带、断层传播褶皱带等构造侧向挤压强烈变形带内,形成盆地超压流体、构造-热流体角砾岩化相、微裂隙-裂缝相、裂隙相等变形构造相和构造-热流体岩相,也是煤-铀-天然气-金属矿等多种矿产同盆共存富集成矿区域。如库车

坳陷北部克拉苏-依奇克里克构造带,为南天山造山带南侧前陆冲断褶皱带发育部位,在大北-克深地区已发现大北气田、克深2气藏、克深5气藏等盐下超深层千亿立方级大型天然气藏。下白垩统巴什基奇克组为超深层致密砂岩储层,埋深超过6200 m,最深约8000 m。研究揭示^[62-64],前陆逆冲带具有异常高压、构造圈闭发育和成藏条件复杂的特点,该区域特大型气藏形成于超压流体主排放通道带。在逆冲断裂强烈构造挤压作用下,古近系膏泥岩/盐岩封闭层因塑性流动变薄并发育断裂,成为超压流体排放的主要通道,也是超压流体主排放通道和天然气垂向运移的主要途径。下部烃源岩层系内天然气不断地向上部白垩系储层运移。超压流体排放有助于形成溶蚀孔隙而改善储层物性,超压流体主排放通道对该区天然气成藏具有控制作用。前陆逆冲带构造挤压作用有利于构造裂缝形成,2组构造裂缝为近EW向高角度张性裂缝、近SN向直立剪切裂缝,前者充填率较高,后者多数未被充填。微观构造裂缝多为穿粒缝,缝宽10~100 μm。3期构造裂隙形成于白垩纪、古近纪、新近纪—第四纪,第3期构造裂缝为区域工业规模气藏形成的关键因素之一。构造裂缝对天然气储层改造成岩作用表现在3个方面:①构造裂缝直接提高了储层渗透率,沿构造裂缝发生溶蚀作用,有效改善孔喉结构,早期充填裂缝仍可作为有效渗流通道;②背斜高部位对张性和张剪性裂缝形成较为有利,也是构造裂缝渗透率高值区和天然气富集高产区;③网状及垂向开启缝与储层基质孔喉高效沟通,促进了天然气产量高产和稳产。

(4)在盆地深部构造应力转换层、构造侧向挤压应力与强流变岩层耦合转换带内,构造应力-流体-岩石多重耦合的远程传输机制下,特殊的构造-热流体成岩作用强烈,构造-热流体形成底劈构造和盐底劈构造。在区域性构造侧向挤压收缩体制下,沉积盆地内部构造流体-软弱岩层内,垂向上涌的构造热流体为构造侧向挤压传输与构造-流体垂向转换的热应力区。初期以盆内塑性流动和盆内流体垂向上涌,形成盐岩底劈构造作用为主导;晚期以逆冲推覆构造作用为主导,形成构造-流体转换作用下的构造侧向挤压成岩相系。在库车-拜城地区秋里塔格冲断褶皱带西段发育盐构造系统^[65-68]。古新世—始新世厚层膏盐岩和含膏泥岩,

在压实重力作用下发生塑性流动,形成却勒盐丘和吐孜玛扎盐墙等盐底辟构造。在上新世晚期强烈区域挤压应力场下,大规模逆冲推覆构造作用形成底辟型盐墙和喷出型盐席,发育整合型米斯坎塔克盐背斜和大宛齐盐枕,滴水砂岩型铜矿床与却勒盐推覆构造和整合型米斯坎塔克盐背斜密切相关。在云南东川和易门铜矿集区,发育岩浆热底辟构造、构造热流体型和构造角砾岩型热流体垂向底辟构造,它们具有十分特殊的构造成岩成矿机制,易门凤山式铜矿床受刺穿构造岩相体控制^[69-70]。因此,构造-热流体底辟构造、盐底辟构造、(非)金属矿产-油气矿产-煤-铀同盆共存富集和协同成矿成藏机理等是今后的主要研究方向。

3.2 节理-裂隙-劈理化成岩相系

在盆内构造变形带中,当沉积物和沉积岩达到一定压实作用或有外界构造作用协同下,发生显著破裂作用,形成节理-裂隙(裂缝)-劈理化构造成岩作用,表现为:①这些构造扩容空间(节理-裂隙-劈理带)为成岩期间的流体排泄通道和储矿相体,内源性构造热液脉体呈充填-半充填分布在储矿相体内。②节理-裂隙-劈理化成岩相中可见充填-半充填状态的外源性热液脉带,这些节理-裂隙-劈理化成岩相的发育程度和分布区域,以及热液脉体密度和成分可揭示外源性热流体叠加成岩作用空间位置和叠加强度。③节理-裂隙-劈理化成岩相中,在内源性热流体和外源性热流体耦合作用下,发生了较大规模的水岩反应,具有显著构造-热流体耦合的物理-化学成岩作用,为识别构造-热事件与地球化学岩相学反应界面的标志。如乌拉根砂砾岩型铅锌矿床北侧康苏-前进煤矿带,在中侏罗世杨叶期末形成前陆冲断褶皱带,在由南向北倾的冲断褶皱带内,发育构造片岩相、构造劈理化相和节理-裂隙化相。在层间滑动构造面上分布碎裂状煤岩和初糜棱岩相煤岩,呈S型、S-L型、透镜状、脉状和网脉状煤岩脉,它们为构造生排烃事件和生排烃运移构造通道相。前陆冲断褶皱带形成了杨叶组煤系烃源岩中构造生排烃作用,这些节理-裂隙-劈理化成岩相系,为盆地内源性烃类流体提供了大规模南向运移的构造通道和构造侧向挤压驱动力。

3.3 碎裂岩-碎裂岩化相系

该相系沿沉积盆地内逆冲断裂和断层相关褶皱带呈切层和顺层分布,在褶皱群落内层间滑动构

造带内呈似层状相体。碎裂岩化相是原岩在较强应力作用下破碎形成的,碎裂岩化相内粒化作用仅发生在矿物颗粒边缘,颗粒间相对位移不大,原岩特征尚部分被保存,采用碎裂结构参加碎裂岩化相岩石命名,如碎裂状泥岩、碎裂状粉砂岩、强碎裂状粗砾岩等。按碎斑与基质含量比例将碎裂岩(相)分为:①初碎裂岩,基质占10%~50%;②碎裂岩,基质占50%~90%,主要粒径在0.5~1.0 mm;③超碎裂岩,基质为90%~100%,主要粒径小于0.1 mm。碎裂岩相由初碎裂岩、碎裂岩、超碎裂岩等组成,是岩石经过碎裂岩化构造变形后形成的构造岩类。针对不同岩石类型进行建相研究后,确定碎裂岩相和碎裂岩化相强度识别标志,进行示矿信息提取和识别。在海南省丰收钨铍钼多金属矿区,根据角岩类中裂隙类型和裂隙密度等,碎裂岩化相划分为4种类型:①强碎裂岩化角岩(裂隙密度大于100条/m);②中碎裂岩化角岩(裂隙密度100~50条/m);③弱碎裂岩化角岩(裂隙密度小于50条/m);④角岩(无碎裂岩化)(裂隙密度小于0.1条/m),组成了碎裂岩化相独立填图单元。在萨热克砂砾岩型铜多金属矿区,碎裂岩化相根据节理-裂隙密度进行划分:①强碎裂岩化杂砾岩(裂隙密度大于5条/m);②中碎裂岩化杂砾岩(裂隙密度1~5条/m);③弱碎裂岩化杂砾岩(裂隙密度小于1条/m);④紫红色铁质杂砾岩(无碎裂岩化)(裂隙密度小于0.01条/m)。

3.4 碎斑岩化相-热液角砾岩化相系

碎斑岩化相-角砾岩化相为多期次碎裂岩化相叠加作用,或多组构造应力场叠加变形所形成的构造岩相学类型。它们在沉积盆地呈似层状构造岩相体,多为层间滑脱构造岩相带,或呈切层构造岩相体受断裂带控制。碎斑岩化相和角砾岩化相分布在断裂带内、层间滑动构造带和层间滑脱构造带产状变化部位、层间滑脱构造与切层断裂交汇部位等,它们是构造应力与热流体强烈耦合部位。在乌拉根-康西砂砾岩型天青石-铅锌成矿带内,在下白垩统克孜勒苏群顶部与古近系阿尔塔什组底部发育层间滑脱构造带,发育碎斑岩化相和构造-热流体角砾岩相带,为层间滑脱构造带形成的构造-热流体-热事件改造成岩相系^[21-23]。

(1)碎斑岩化相以发育大型碎斑岩块和小型碎斑构造、S-L构造透镜体、网状节理-裂隙-劈理化相为特征,按照构造应力作用和构造-热流体作用

参与程度,可划分为构造碎斑岩化相和构造-热流体碎斑岩化相两类端元构造岩相体,其间为过渡类型。构造碎斑岩化相主要在多期次和不同构造应力场下,岩石以发生机械构造破碎作用为主,填隙物和胶结物与原岩成分相似,以构造破碎作用形成的碎粉岩为主,缺少同构造期或构造期后热液胶结物充填。构造-热流体碎斑岩化相在多期次和不同构造应力场下,在岩石发生机械构造破碎作用过程中,伴随同构造期或构造期后的强烈热液作用充填-交代作用,填隙物和胶结物主要为热液胶结物,含有部分原岩成分。在构造岩相学变形筛分上,构造-热事件可为同构造期的构造-热事件,也具有构造破碎事件先期形成或构造期后,发生热流体充填-交代作用。

(2)热液角砾岩化相。根据角砾、胶结物类型和特征,构造-热流体耦合结构,可划分为断裂角砾岩相、热液角砾岩相、构造-热液角砾岩化相 3 类。根据角砾变形特征、构造岩相学结构面、断层力学特征等,可划分为压性角砾岩相、压剪性角砾岩相、张性角砾岩相、张剪性角砾岩相等,以揭示构造动力学特征,为确定构造应力场规律提供依据。

3.5 初糜棱岩化相-热液角砾岩化相系

在挤压型脆韧性剪切带和滑脱型脆韧性剪切带内,初糜棱岩化相和热液角砾岩化相系较为发育,这些构造岩相学类型分布在沉积盆地强构造变形带内,一般为盆山转换构造带蚀变标志。如在元古宙—中生代沉积盆地内较发育,在塔西中—新生代陆内沉积盆地内,在古生代盆地上基底构造层(志留系—二叠系)和中元古代盆地下基底构造层(中元古代阿克苏岩群)内发育初糜棱岩化相-热液角砾岩化相系。如萨热克巴依中生代陆内拉分断陷盆地南侧,盆地下基底构造层阿克苏岩群逆冲于侏罗系之上,脆韧性剪切带为绢英质初糜棱岩、碳酸盐质初糜棱岩和绿泥石透闪石初糜棱岩,它们组成初糜棱岩化相,为萨热克南逆冲推覆构造系统的前锋带。盆地北侧石炭系为盆地上基底构造层,发育滑脱型脆韧性剪切带,绢英质初糜棱岩和压剪性热液角砾岩相发育,为造山型金矿的主要赋存相体。

在陕西凤县-太白晚古生代拉分盆地内发育双王-八卦庙含金脆韧性剪切带,在八卦庙含金脆韧性剪切带内^[71-72],近水平分层剪切变形构造样式 $[DS1(D-S_0//S_1)]$ 发育在泥盆系泥质岩层中,为初

糜棱岩化相特征,构造成岩作用和构造样式包括:
①拉伸线理与黑云母剪切面理置换具有构造协调性。绢云母、黑云母和黄铁矿组成拉伸线理($100^\circ \sim 130^\circ \rightarrow$ 约 30°);黑云母剪切面理置换构造在长石黑云母岩及黑云母钠长岩中发育,化学成分层理(S_0 为长石、铁白云石、石英等)被黑云母剪切面理置换(S_1), S_1 与 S_0 夹角为 20° ,显示了左旋近顺层剪切作用特点。
②长石旋转碎斑及高角度破裂面显示了脆韧性剪切变形特征。钠长石中发育高角度的韧性破裂面,与层理交角在 70° 左右,还发育与剪切面理相平行的一组脆性破裂面。更长石碎斑系有黑云母形成的面理效应,钠长石鱼尾化构造现象明显,指示左旋剪切作用特点。钠长石鱼尾化及细碎化构造发育,总体显示出一致性特点。
③顺层剪切流变构造在长石成分层中发育,长石类矿物发育顺层剪切流变构造,显示塑性变形特点,这种肠状塑性流变构造指示了顺层左旋剪切作用。长石石英成分层中有“S”形剪切流变构造,黑云母剪切面理转换强烈时,长石石英成分层(S_0)被 S_1 置换后形成书斜构造,指示左旋剪切作用。
④近水平固态流变褶皱发育。在 ZK4201 孔绢云母钙屑等深积岩层中,发育近水平的固态流变褶皱,黄铁矿-磁黄铁矿绢云母薄层在等深积岩中单层厚一般在 1.0 mm 以下,个别单层厚达 3.0 mm,黄铁矿-磁黄铁矿呈微粒层纹状(15%),粒径为 0.05~0.2 mm。形成流变褶皱后,磁黄铁矿及黄铁矿含量增高到 60%~70%,粒径增大到 1.0 mm,单晶呈斑点状,总体呈肠状的流变褶曲状,流变褶皱近水平,与层理夹角在 45° 左右,黄铁矿-磁黄铁矿-绢云母成分层增厚到 5(鞍部)~3 mm(翼部),表明在近水平左旋剪切作用下,富含金的黄铁矿及磁黄铁矿含量增高 4 倍多,而且单层体积增加了 3 倍以上,表明这种物质在顺层剪切流变过程中富集了 12 倍以上。
⑤无根顺层石英细脉在八卦庙金矿区内普遍发育,形成一些顺层产出无根石英细脉 $[DS1(D-S_0//S_1)]$ 。
⑥粘滞剪切滑移构造在上泥盆统星红铺第三岩段泥灰岩-砂质灰岩中发育,表现顺层掩卧褶皱一翼正常,另一翼强烈拉伸变薄,其与两侧相对变形弱的岩层之间无明显的破裂面,但岩层被拉薄并改变走向很强烈。
⑦小型层间顺层掩卧褶皱群落发育,倒向一致的层间褶皱系多发育在钙质或粉砂质板内,由一系列轴面平行的褶曲组成,两翼紧闭拉长,转折端增厚;层

间平卧褶皱在星红铺组条带状泥质灰岩中发育,两翼同向北倾,核部转折部位明显增厚,轴面及枢纽均小于 20° 。

3.6 糜棱岩相系和热液蚀变糜棱岩相系

糜棱岩相和糜棱岩为沉积盆地内强构造变形域标志,指示了沉积盆地被卷入后期造山带或为造山带外缘带强变形区。糜棱岩相和糜棱岩具有糜棱结构,矿物定向构造发育,由基质和残斑晶或变斑晶组成,基质是细粒化重结晶矿物,残斑晶是细粒化后残存的原晶体残骸,变斑晶是在韧性剪切变形过程中重结晶或生长的较大矿物。糜棱岩相系由 4 类岩石组成:①糜棱岩化相多发育在软硬相间岩层内,具糜棱结构,变斑晶含量小于 10%,基本保持原岩成分和结构,构造面理置换较强; $S-C$ 组构不发育,矿物定向排列构造发育。②初糜棱岩相内糜棱结构发育, $S-C$ 组构清楚,基质含量为 10%~50%,斑晶占主要地位,且粒度较大,具定向排列,动态重结晶较多,同构造期新生矿物和新生面理发育。③糜棱岩相具典型糜棱结构,宏观和微观 $S-C$ 组构十分发育, S 面理和 C 面理构造分异清晰。基质含量大于 50%,以动态重结晶为主,细粒化发育,斑晶含量少。不对称构造和云母鱼构造,劈理化强烈,各种小型褶皱构造发育。糜棱岩中长石和黑云母矿物数量减少,石英和绢云母矿物大量出现(绢英岩相)。④超糜棱岩相具糜棱结构,基质含量大于 90%,斑晶很少,粒度很小,几乎全部由动态重结晶晶粒组成,呈斜列排列的条带。不对称构造不发育,斑晶、透镜体长轴与 C 面理近乎平行或夹角很小, $S-C$ 组构不明显, C 型面理发育。流变褶皱十分发育。长石和黑云母含量很少,以石英和绢云母的大量新生矿物为主。糜棱岩化相作为构造岩相学填图单元,由糜棱岩化岩、初糜棱岩、糜棱岩、超糜棱岩等组成。糜棱岩化相作为野外构造岩相学填图基本单元^[20-23],重点在圈定地表和钻孔中糜棱岩化相分布规律,以圈定糜棱岩化相带和脆韧性剪切带,进行找矿预测。在脆韧性剪切带内构造热流体发育,形成热液蚀变糜棱岩相(如黄铁绢英岩化蚀变相),它们是构造-热流体耦合作用与成岩成矿作用标志。热液蚀变糜棱岩相系也可划分为以上 4 个相,但蚀变矿物需参加命名,当糜棱岩相系发生强烈蚀变后,以蚀变岩为主进行命名,如黄铁绢英蚀变岩、铁白云石-菱铁矿化蚀变糜棱岩等。

3.7 构造成岩相系的相变规律与构造-热事件场

从固结压实成岩相系→节理-裂隙-劈理化成岩相系→碎裂岩-碎裂岩化相系→碎斑岩化相-热液角砾岩化相系→初糜棱岩化相-热流角砾岩化相系→糜棱岩相系,为构造挤压应力不断增强和构造流体作用逐渐强烈的构造-热事件极性方向,有助于揭示盆地流体大规模运移路径。在盆山原耦合和盆山耦合转换带内,构造侧向挤压收缩作用对构造-热事件具有六方面作用:①构造侧向挤压形成煤系烃源岩和深部烃源岩系发生构造成岩事件,同期形成大规模构造生排烃事件,富烃类和富 CO_2-H_2S 型非烃类流体为金属矿产和能源矿产同盆富集的共同媒介。②构造应力场动热转换能量和能源矿产自燃形成区域构造-热事件,触发煤系烃源岩大规模生排烃甚至发生自燃,迫使先存油气系统或天然气大规模再度运移甚至自燃,加热地层封存水后在成盆期内形成热水沉积岩相系,为金属矿产形成提供成矿能量供给源区。③构造应力场驱动成矿成藏流体大规模运移,有利于形成切层断裂带和断层相关褶皱带,为成矿成藏流体大规模运移提供了构造通道和岩相岩性圈闭构造。④有利于形成碎裂岩化相带和裂缝裂隙相带,在对先存储集相体层改造后,有利于形成优质储集相体层和隐蔽褶皱圈闭,为层间成矿成藏流体提供流体运移通道和储集相体层。⑤在塔西地区,这种区域构造岩相学侧向分带相序结构在中-新生代陆内沉积盆地,到造山带和高原转换过渡部位发育较完整,如前陆冲断褶皱带和逆冲推覆构造系统。对构造成岩作用强度和分布规律深入研究,有助于识别构造生排烃中心位置,寻找构造生排烃中心和成岩成矿成藏中心。

沉积盆地内构造-热事件场形成了构造动-热转换的增温型古地热场。这类增温型古地热场来源于构造动力转化和热力作用场。主要发育在沉积盆地内 5 个强烈的构造变形带中。①前陆冲断褶皱带型。盆内前陆冲断褶皱带内、逆冲断裂和断层相关褶皱带内,发育构造动-热转换的增温型古地热场。②对冲式冲断褶皱带型。盆缘对冲式厚皮型逆冲推覆构造系统具有较大规模的构造动-热转换的增温型古地热场,一般多为盆缘前锋带位置。③盆地基底冲断褶皱带型。在沉积盆地基底内盲冲型厚皮型逆冲推覆构造系统前锋带为增温型古地热场发育部位,也是沉积盆地内热水沉积岩相系

发育的构造动力学条件。④盆内反转构造带型。在走滑拉分断陷盆地两侧的盆缘边界同生断裂带,不但是构造动-热转换的增温型古地热场发育有利部位,而且在盆地正反转构造过程中,构造动-热转换的增温型古地热场具有递进式两阶段增温的构造-热事件过程。⑤盆内岩浆叠加构造型。为盆地岩浆叠加侵入构造的远端相,在沉积盆地内形成构造-热转换的增温型古地热场,多表现为斑点状黑云母千枚岩、斑点状菱铁矿-铁白云石钙屑千枚岩等,为盆内隐伏岩浆叠加期构造岩相学标志,一般与沉积盆地内构造-热事件难以区别,需要深入研究。

4 盆内岩浆叠加期、构造-岩浆-热事件与岩浆叠加成岩相系

4.1 盆内岩浆叠加成岩作用

(1)在大陆裂谷盆地和陆内裂陷盆地形成演化过程中,岩浆作用活动强烈,以火山喷发-岩浆侵入作用为主导,从沉积盆地与火山-岩浆作用相互关系,将构造-岩浆-热事件划分为:①前成盆期构造-岩浆-热事件;②主成盆期构造-岩浆-热事件;③盆地地壳沉降期构造-岩浆-热事件;④盆地改造期构造-岩浆-热事件;⑤盆内岩浆叠加期构造-岩浆-热事件。采用构造岩相学填图圈定岩浆侵入构造系统和岩浆叠加侵入构造系统,进行构造-岩浆-热事件和找矿预测^[20-27]。盆内岩浆叠加期一般形成于具有深部岩浆作用参与的盆山转换带内,深部岩浆参与的盆山原转换过程也是盆山原和盆山镶嵌构造区深部岩浆热流体焊接作用,经过深部岩浆热流体焊接作用的盆山原和盆山镶嵌构造区,则具有较好的区域地壳稳定性。

(2)盆内岩浆侵入叠加热事件指沉积盆地发生构造反转后,在盆地萎缩封闭过程或盆地封闭后盆地改造过程中,在盆内岩浆叠加期形成的构造-岩浆-热事件叠加成岩作用事件。盆内岩浆叠加成岩作用表现在4个方面:①从侵入岩体内部热能向盆地地层的热能扩散作用,如接触热变质作用在侵入岩体周边岩石中形成的角岩-角岩化相系。②在侵入岩体边部-正接触带-外接触带,接触交代作用形成矽卡岩-矽卡岩化相系和变质矽卡岩相。③在岩浆侵入过程中形成岩浆侵入构造系统,导致先存构造和地层发生叠加变形,形成同岩浆侵入期变形构

造型相和构造组合。④盆内岩浆侵入叠加热事件对于金属成矿和烃类流体成藏具有重大作用^[20-27, 44, 73]。如在智利科皮亚波 GV-仙多明戈(Santo Domingo) IOCG 成矿带位于侏罗纪-早白垩世弧后盆地内,在晚白垩世弧后盆地发生构造反转作用,导致弧后盆地萎缩封闭和构造变形;向东迁移的深成岩浆弧,形成盆内岩浆叠加期花岗岩闪长岩和闪长岩侵入岩体。构造-岩浆-热事件中心在闪长岩岩株、岩浆热液角砾岩相和断裂交汇部位,形成热液蚀变岩相系及蚀变分带。①在侏罗纪-早白垩世青磐岩化蚀变安山质火山角砾岩-熔岩层中,青磐岩化蚀变相为早期区域性蚀变岩相,以似层状钠长石-阳起石-绿泥石-碳酸盐化-楣石化蚀变等为主。②晚白垩世高温相蚀变带(蚀变成岩中心部位)围绕晚白垩世闪长岩岩株分布。在安山质火山角砾岩-熔岩接触部位,以钠长石-阳起石-透闪石化蚀变相为主,形成了黄铜矿-磁铁矿型矿石。它们常为岩浆热液角砾岩筒型 IOCG 成矿体系的根部相(高温热液蚀变相),岩浆热液角砾岩筒为成矿热物质和热能量供给源区,以钾钠硅酸盐蚀变相和磁铁矿-铁阳起石蚀变相为主要特征。在闪长岩岩株与似层状结晶灰岩-生物碎屑灰岩接触带,石榴子石矽卡岩、辉石石榴子石矽卡岩、钠长石绿帘石矽卡岩等钙质矽卡岩呈似层状和网脉状分布。似层状 IOCG 成矿体系分布在区域矽卡岩化相带内,主要为黄铜矿-(赤铁矿化)磁铁矿型矿石;随着远离闪长岩岩株,赤铁矿化强度不断增加。③在晚白垩世中高温相蚀变带内,以钠长石-阳起石-绿泥石-铁白云石化蚀变为主,形成黄铜矿磁赤铁矿型矿石。随着远离闪长岩岩株,磁赤铁矿含量显著增加。沿断裂带发育含矿岩浆热液角砾岩相,以石英-钾长石化-绿泥石化蚀变相为主,发育赤铁矿-电气石-石英-钾长石化热液角砾岩相。④在晚白垩世中温相蚀变带内,以钾长石-绿泥石-铁白云石化蚀变为主,形成斑铜矿-黄铜矿镜铁矿型矿石。沿断裂带发育含辉铜矿-斑铜矿-镜铁矿硅化热液角砾岩筒和网脉状相。网脉状-脉状型铜金矿体分布在含矿热液角砾岩筒外缘和尖灭部位。水解硅酸盐化蚀变相以黑云母-绢云母-绿泥石化为主,局部为石英绢云母蚀变相和绿泥石石英绢云母蚀变岩,分布在闪长岩-花岗闪长岩呈岩床状尖灭于层状火山岩-火山沉积岩层部位,它们为 IOCG 成矿体系

中似层状铜银矿体(Manto-type)根部相标志。⑤在晚白垩世低温相带内,以绿泥石-铁碳酸盐化-石英蚀变为主,以脉状和脉带状铜银金富集成矿为主,发育辉铜矿铁镜矿型矿石。⑥IOCG成矿体系远端相为含铜铅锌金银硫化物铁锰碳酸盐化蚀变相+粘土化蚀变脉带相,主要沿断裂-节理-裂隙带分布,主要为铁锰碳酸盐-粘土化蚀变岩型金银多金属矿石。

(3)从盆内岩浆叠加期岩浆来源看(表1;图版I-j~1),因岩浆来源、成分不同等综合因素,具有4类构造-岩浆-热事件:①构造-壳源岩浆-叠加热事件与岩浆叠加成岩相系以中酸性侵入岩为主要特征,形成沉积盆地的构造变形变质、热物质叠加和成岩成矿、驱动烃源岩大规模生排烃和运移事件。②构造-幔源岩浆-叠加热事件与岩浆叠加成岩相系以幔源岩浆为热物质和热能供给源,如碱玄岩和苦橄质岩类次火山岩相、碱性辉长岩-碱性辉绿辉长岩等侵入岩相,有利于形成大规模烃类流体和富CO₂型非烃类流体排泄事件。③构造-幔壳混源-热事件与岩浆叠加成岩相系,以含辉长岩类包体的花岗岩和花岗闪长岩类为特色,暗示具有较大规模的幔壳混源热流体作用。④构造-碱性岩浆-热事件与岩浆叠加成岩相系,以碱性斑岩带和同岩浆侵入期陆内拉分断陷盆地内拉分陷盆地内碱性斑岩带。

(4)构造岩相学专题填图与预测功能^[20-27]。①与盆内构造-岩浆-热事件有关的多种地质综合作用,形成了沉积-热变质成岩相系。构造-岩浆流体-热事件形成前岩浆侵入期、同岩浆侵入期和后岩浆侵入期的岩浆叠加成岩相系,与构造-岩浆-热事件有关的构造-热流体改造成岩相系。②盆内岩浆叠加期的构造-流体-热事件形成递进增温型古地热场,具有增温-峰值-降温型热演化结构。在同构造-岩浆-热事件期,形成沉积岩构造变形(如碎裂岩化相、糜棱岩化相、热液角砾岩化相等)、构造-热能-流体-热事件多重耦合结构和水岩作用。以盆内岩浆侵入叠加成岩区为中心,形成构造-流体-热事件中心。它们对于沉积盆地内构造生排烃中心和成矿流体中心具有显著控制作用。盆内岩浆叠加期相关相系和分带规律、沉积-热变质-岩浆流体叠加成岩强度和分布规律等研究和构造岩相学专题填图,有助于恢复和圈定构造-岩浆-热事件形

成的隐伏生排烃和成矿流体中心,寻找构造-岩浆-热事件形成的深部生排烃中心和隐伏的成岩成矿成藏中心。③盆内构造-岩浆-热事件叠加成岩作用和相类型划分和填图,按照沉积-热变质成岩作用强度和分布规律,有助于识别构造-岩浆-热事件形成的隐伏生排烃中心位置,寻找构造-岩浆-热事件形成的生排烃中心和成岩成矿成藏中心,寻找深部(3000 m)大型-超大型金属矿床。

(5)在盆内岩浆叠加期构造-岩浆-热事件与岩浆叠加成岩相系研究方面,需要采用构造岩相学填图新方法和地球化学岩相学识别技术相结合^[20-27],以岩浆侵入构造系统和岩浆叠加侵入构造系统相关的构造岩相学填图新方法为主,尤其是热液角砾岩构造系统与构造岩相学填图方法,对于成岩成矿系统解剖研究和找矿预测,具有较大的实用价值和理论创新作用。有针对性开展地球化学岩相学专题填图^[25-29],采用同位素地球化学定年方法,进行地球化学同位素示踪研究,综合确定构造-岩浆-热事件形成时间-空间-物质多维拓扑学结构和相体演化结构,以揭示岩浆体系热演化结构和成岩温度相、岩浆体系成岩压力-成岩深度演化结构和成岩压力相、岩相地球化学特征、脉岩群构造岩相学和地球化学岩相等,为恢复岩浆源区与地球动力学机制提供地球化学岩相学依据。

4.2 构造-岩浆-热事件与古地热场结构类型

从盆地改造期构造-热事件成岩作用驱动因素角度看,按照构造热转换和热动力来源不同,热力驱动的构造-热事件改造成岩作用,划分为3种相系类型为增温型古地热场(热力作用场)、岩浆-火山作用有关增热型古地热场、垂向热物质驱动构造-热事件场。

(1)火山喷发-岩浆侵入有关的增热型古地热场。以同构造期火山喷发-岩浆侵入在裂谷盆地内较发育。盆内火山喷发-岩浆侵入事件可形成区域性构造-岩浆-热事件。①在区域角度不整合面附近,发育“孔隙-溶洞-裂隙”复合成矿成藏构造系统,有利于油气资源和金属矿产形成大规模储集,如塔里木叠合盆地内优质油气储集相体层和不整合型油气输导通道^[74]。在云南东川地区,新太古界小溜口岩组顶面与中元古界因民组底界之间,发育区域角度不整合面(1800±50 Ma)、古风化壳和古土壤、底砾岩、古岩溶构造系统等,为东川地区角度不

整合面型 IOCG 矿床和铜金银钴矿床新找矿预测层位,具有寻找隐伏 IOCG 矿、铜金银钴矿、铀-稀土矿等的巨大潜力。②小溜口岩组顶面角度不整合面之上,宏观上以因民组底部沉积石英质底砾岩为角度不整合面传统标志,但以同期异相结构发育为显著构造岩相学组合标志,由因民组底部沉积石英质底砾岩(河流相)与火山熔积角砾岩(火山熔积相)、硅化钠化蚀变火山角砾岩(火山渗滤热液角砾岩相)、铬伊利石粘土化蚀变泥质白云岩(古土壤-古风化壳相)、网脉状黄铁矿蚀变泥质白云岩(岩溶裂隙相)、熔结坍塌构造岩块(火山地震陡岸坍塌相)、复合热液岩溶角砾岩(火山热液充填-洞穴堆积角砾岩相)等,均为同期异相层位。该同期异相结构层位为东川地区独立构造岩相填图单元($x-y$, $2.50\sim 1.80\pm 0.5$ Ga)重要构造岩相学物质组成。该独立构造岩相填图单元($x-y$)为成矿流体运移构造通道和优质储矿构造岩相体层,发育古岩溶角砾岩、岩浆热液角砾岩、火山热水角砾岩、含黄铜矿巨晶状铁白云石岩(岩溶洞穴热水沉积相),这些构造岩相体记录了岩浆侵入-火山作用有关的增热型古地温场。③在独立构造岩相填图单元($x-y$)内,复合热液角砾岩相系以钠化蚀变碱玄岩为古火山热场中心相标志,沿走向相变结构为钠化蚀变碱玄岩(蚀变火山岩相)→钠质热液角砾岩相(火山热水同生蚀变岩相)→黄铜矿硅化铁白云石(火山热水同生蚀变岩相)→含黄铜矿巨晶状铁白云石岩(岩溶洞穴热水沉积相)→巨晶状铁白云石方解石岩(低温岩溶洞穴堆晶岩)。它们的侧向相序结构和相变规律揭示了增温型古地温场,以钠化蚀变碱玄岩为古热源场中心相。④小溜口岩组古风化壳(古土壤-古岩溶面-褪色化蚀变带)位于区域角度不整合面之下。构造岩相学侧向相变结构为铬伊利石蚀变粘土岩(古土壤-古风化壳残积相)→含网脉状铬伊利石化蚀变白云岩+网脉状黄铁矿化蚀变白云岩(古岩溶裂隙相带)→古洞穴和溶洞内含黄铁矿绿泥石蚀变岩+黄铁矿化蚀变碱玄岩(古喀斯特洞穴相),这种构造岩相学侧向相序结构和相变规律,揭示了以黄铁矿化蚀变碱玄岩为成岩成矿中心的增热型古地温场结构。⑤古风化壳和底砾岩/碱玄质火山角砾岩为成矿流体的似层状孔隙型通道,也是火山热水渗滤循环对流体系底流体层,古风化壳以古土壤、粘土质风化壳等组成了良好的底封闭层。

以碱玄质火山角砾岩、碱玄岩、碱性辉长岩株(次火山岩侵入相)为古地热场内高热能中心相和热源供给中心,在其周缘熔积火山角砾岩-熔结火山集块岩内,形成环带状和带状钠化硅化蚀变火山角砾岩(火山热液渗滤交代角砾岩相)。⑥古喀斯特(洞穴-溶洞)-古岩溶裂隙带-古风化壳等古构造面和构造组合,为火山渗滤对流循环体系和成矿流体的裂隙-隙洞型构造通道,也是铜金银钴矿床的优质储集相体层。⑦小溜口岩组顶面半风化白云岩、风化-岩溶裂隙系统、溶蚀孔洞和洞穴系统,不但是火山热液渗滤对流循环体系的构造岩相学组成部分,也是成矿流体运移构造通道和卸载成矿物质的储矿构造,具有“孔-洞-缝”和“节理-溶洞-断裂-洞穴”储矿相体层结构,它们也是火山作喷发-岩浆侵入有关的增热型古地温场内优质储集相体层。总之,在中元古代火山喷发-岩浆侵入有关的增热型古地温场中,在新太古界小溜口岩组顶面古岩溶构造系统和中元古界因民组底部区域性角度不整合面构造系统,它们为优质储集相体层。因民组黑云母热液角砾岩筒和赤铁矿硅化钾长石热液角砾岩筒等热液角砾岩构造系统,根植于火山喷发-岩浆侵入杂岩体内部。小溜口岩组内发育底劈穹隆式火山机构,由碱性复式辉绿辉长岩株(脉群)、碱玄质火山熔岩和碱玄质火山角砾岩等组成。因此认为,在东川深部具有寻找隐伏 IOCG 矿、铜金银钴矿、铀-稀土矿等巨大潜力。

(2)垂向热物质驱动的构造-热事件场。①垂向热物质驱动可形成于裂谷盆地不同阶段,以较大规模碱性玄武岩岩浆底侵和局部火山喷发为特征,形成较广泛的区域性构造-热事件。②在陆内走滑断裂带内,可形成碱性斑岩侵入-火山喷发事件有关的垂向热物质驱动的构造-热事件场。③在俯冲板块上方,可形成碱性碳酸岩-碱性热流体大规模侵位事件,侵位事件与沉积盆地构造反转过程一致。

(3)与隐伏侵入岩体有关的构造-热转换的增温型古地温场。这类增温型古地温场来源于与隐伏岩浆侵入构造系统远端相有关的构造动力转化和热力作用场。①在不断接近隐伏岩浆侵入构造系统边缘相,因岩浆侵入构造供给了热能量和构造动力,以碎裂岩化相和热变质相带为主,具有显著面状和立体状的增温型古地温场,以弱角岩化相→中角岩化相→强角岩化相→强角岩化相+矽卡

岩化相、碎裂状大理岩化碳酸盐岩→碎裂状大理岩相→碎裂状大理岩相+穿层脉带状夕卡岩相+穿层脉带状长英质脉岩等垂向构造岩相学分带特征和规律,可直接圈定该类增温型古地热场。②在断裂交会处和断裂带内 S-L 透镜体内,发育电气石热液角砾岩、黑云母热液角砾岩、硅化电气石热液角砾岩等,能够揭示岩浆热液隐爆中心和运移构造通道。③在盆内岩浆叠加期,隐伏岩浆侵入构造系统远端相以带状构造动力变质和热变质作用为主,发育脉带型蚀变带和断裂-裂隙带,以线形黑云母网脉状、线形电气石化蚀变带等为主,能够清晰地揭示与隐伏侵入岩体有关的隐伏增温型古地热场。

4.3 盆内岩浆叠加期构造-壳源岩浆-热事件与岩浆叠加成岩相系

在盆内岩浆叠加期内,构造-壳源岩浆-叠加热事件以中酸性侵入岩为特征,不但形成沉积盆地构造变形变质,而且叠加热物质作用和成岩成矿,驱动烃源岩大规模生排烃和运移。如在云南个旧锡铜钨铍多金属矿集区内,中三叠世弧后裂谷盆地在燕山期形成了壳源中酸性岩浆侵入与叠加成岩成矿作用,盆内岩浆叠加期形成了显著垂向成矿分带和构造岩相学分带。①在花岗岩岩株顶部内接触带发育电气石云英岩化蚀变相和硅化电气石化蚀变相,以 Be-Nb-Ta 富集成矿为主。②在花岗岩与中三叠统个旧组白云岩和白云质灰岩正接触带,形成似层状和不规则状辉石石榴子石矽卡岩等为主组成的钙质矽卡岩相,以锡多金属成矿为主。与个旧组碱性苦橄岩、碱玄岩-碱性玄武岩正接触带,形成透闪石金云母矽卡岩、萤石金云母矽卡岩等组成金云母型矽卡岩相为主,以锡铜钨铍多金属成矿为主,金云母型矽卡岩中铍铷与铜同体富集成矿,属新类型铍铷矿床。③在远离花岗岩侵入岩体的个旧组内,形成切层储矿蚀变构造岩相带,切层断裂带内发育脉状矽卡岩、电气石长英岩脉、石英电气石脉带。在个旧组碱性苦橄岩-碱玄岩-碱性玄武岩内,形成含铍铷铜似层状变金云母型矽卡岩相,由金云母岩、阳起石金云母岩、金云母透闪石阳起石岩等组成。④在层间网脉状锡多金属矿层内,层间滑动构造带和断裂-裂隙带发育,切层锡石-硫化物-石英脉带和锡石-硫化物-电气石石英脉带,与切层和顺层分布的锡石-硫化物-锰铁碳酸盐脉带相伴产出。⑤在含锡石碎裂状白云岩中,沿碎裂

状白云岩内微裂隙和节理,发育锡石赤铁矿细脉和锡石锰方解石铁锰白云石细网脉。

据玻利维亚地质服务局和美国地质调查局资料^[75]:①在玻利维亚阿尔普蒂那高原西北侧,渐新统一中新统阿尔罗阿群(Abaroa Fr.)以沉积砾岩与下伏的始新统贝伦格拉群(Berenguela Fr.)砂岩呈角度不整合接触。阿尔罗阿群以陆相碎屑岩、火山碎屑岩、安山-玄武质火山熔岩为主,在橄榄玄武岩和辉石安山岩中发育巨斑晶状斜长石,角闪黑云英安岩较发育。②在拉巴斯市西班牙金银矿区一带,渐新统一中新统阿尔罗阿群(Abaroa Fr.)以沉积碎屑岩、英安质火山碎屑岩(火山碎屑流相)、英安斑岩岩脉和英安斑岩岩穹(次火山侵入岩相)为主。以英安斑岩为主的次火山岩侵入岩相较发育。围绕富石英的英安斑岩侵入岩体,发育弥漫状黄铁矿-石英-绢云母化蚀变相,外围以青磐岩化蚀变相为主,发育在阿尔罗阿群安山岩-安山质火山沉积岩中。③在圣迪尼尔墨(San Geronimo)高硫化型金银矿区发育酸性地球化学相,石英-明矾石化蚀变相带呈 NE 向展布,受 NE 向断裂带控制较为明显;在石英-明矾石蚀变相带内发育多孔状硅化-玉髓蚀变相带,为富 SiO₂ 型酸性成岩成矿流体以渗滤交代作用方式,指示了高硫化型浅成低温热液金银成矿系统,经历了显著构造抬升和侵蚀作用,暗示深部存在隐伏斑岩铜金成矿系统。④石英-明矾石蚀变相和多孔状硅化-玉髓蚀变相 2 类酸性地球化学相,叠加在早期黄铁矿-石英-绢云母蚀变相上,与高岭石-叶腊石粘土化蚀变相和热液角砾岩化相相伴,为新近纪(10.3±0.3 Ma, K-Ar 法)浅成低温热液型金银矿床。与智利 Maricunga 斑岩型-浅成低温热液金银铜成矿带具有相似的成矿地质特征。

4.4 盆内岩浆叠加期构造-幔源岩浆-热事件与岩浆叠加成岩相系

许多金属矿床集中区和油气藏内发育各类脉岩群,如托云中—新生代沉积盆地和塔里木叠合盆地,与二叠纪地幔柱有关的盆内岩浆叠加期,形成强烈的构造-岩浆-热事件和盆内岩浆叠加期相关的岩浆叠加成岩事件。通过构造岩相学和地球化学岩相学研究,有助于揭示幔源物质参与金属成矿、油气资源成矿成藏、天然气成藏系统等,探索金属-天青石-铀-煤-油气资源同盆富集和成矿成藏机理。岩浆结晶热演化史研究在于揭示岩浆体系

结晶分异演化过程、上升侵位机制和结晶分异过程中热结构和热演化史,有助于建立岩浆体系和构造-岩浆-热事件与沉积盆地在物质-时间-空间上耦合结构,揭示盆地岩浆侵入构造系统形成动力学机制、岩浆源区、岩浆热液成岩成矿成藏系统。萨热克巴依晚白垩世—古近纪构造-岩浆-热事件,萨热克铜多金属矿床形成了岩浆热液叠加成矿、幔源热点和穿层侵入的变超基性岩-变基性岩岩脉群,其中,响岩质碱玄岩-响岩质碧玄岩系列为“同期多层位富集成矿”的构造岩相学分异机制,为晚白垩世—古近纪幔源热点和构造-岩浆侵入事件所形成。在砂砾岩型铜多金属-煤-铀成矿亚系统内部,表现为物质-时间-空间上与构造-岩浆侵入事件密切相关。

(1) 萨热克南超基性岩-基性岩浆热演化结构恢复。对萨热克南变超基性岩-变基性岩岩脉群进行构造岩相学和矿物地球化学岩相学研究揭示,碱性超基性岩浆经历了 4 期和 6 个阶段岩浆结晶分异-热演化过程,①幔源区岩浆形成期,以锆石-金红石-钙质斜长石进行热结构和形成温度恢复,锆石 Ti 温度计恢复锆石结晶温度 $651 \sim 2566^{\circ}\text{C}$, 平均 950°C ; 根据金红石 Zr 含量温度计公式进行温度估算,金红石形成温度分别为 1091°C 和 400°C 。高温系列长石形成温度为 $886 \sim 1907^{\circ}\text{C}$, 平均 1211°C 。推测岩浆源区形成温度在 $1091 \sim 1211^{\circ}\text{C}$ 以上,为高温高压条件下锆石-金红石-钙质斜长石-辉石相。②地幔流体交代作用期以角闪石矿物地球化学岩相学揭示岩浆形成的温度-压力相信息,因不同种属角闪石的矿物地球化学岩相学特征,记录了深部岩浆上升侵位过程温度-压力相信息,角闪石种属从铁浅闪石→浅闪石→镁钙闪石,形成温度在 $545 \sim 796^{\circ}\text{C}$, 形成压力在 $7.94 \sim 4.70 \text{ kbar}$, 减压增温熔融过程的岩浆侵位机制为地球化学岩相学的相分异动力学机制,推测为萨热克南断裂带切割深度达岩石圈地幔,这种幔型断裂切割了岩石圈地幔后,导致并触发了减压熔融机制形成,在地幔流体交代作用下和减压熔融机制下,热膨胀导致岩浆体系内部体积增加并提供了岩浆体系上升侵位动力源,岩浆体系从大陆深部 29.4 km 处,缓慢上升侵位到 17.4 km 。③壳幔混源岩浆作用期以黑云母和长石矿物地球化学岩相学研究,揭示岩浆体系的温度-压力相成岩结构特征,本区黑云母为镁质黑云母-铁质

黑云母,以岩浆原生黑云母为主,为壳源区-壳幔混源区黑云母,形成温度 $651 \sim 775^{\circ}\text{C}$, 形成压力 $2.01 \sim 0.58 \text{ kbar}$; 黑云母成岩深度为 $7.42 \sim 2.15 \text{ km}$ 。长石-斜长石共生矿物对形成温度 $336 \sim 421^{\circ}\text{C}$ (平均 370°C), 为低温系列长石。从 $29.4 \rightarrow 17.4 \text{ km}$ 缓慢上升、 $17.4 \rightarrow 7.4 \text{ km}$ 快速上升、从 $7.4 \rightarrow 2.15 \text{ km}$ 缓慢上升三阶段“气球膨胀”模式上升侵位,地球化学动力学环境为降压增温(减压熔融),拉分走滑深大断裂带为主要上升通道。④岩浆热液自蚀变期。碳酸盐相蚀变成岩温度为 235°C , 绿泥石化蚀变成岩温度在 $143 \sim 80.0^{\circ}\text{C}$ 。岩浆热液自蚀变期以降温过程为主,大气降水和地下水参与了成岩过程,蚀变岩为降温蚀变序列,即白云石化蚀变相→绿泥石化蚀变相→伊利石蚀变相+蒙脱石化蚀变相。

(2) 盆内岩浆叠加期与成晕成岩和成矿成藏作用特征。以萨热克砂砾岩型铜多金属矿床南矿带变超基性岩-变基性岩脉群的构造岩相学和地球化学岩相学为例:①在物质组成上,与萨热克砂砾岩型铜多金属矿床北矿带相比,在矿体工业组分特征等物质组成上,萨热克南矿带 $28 \sim 60$ 勘探线具有显著不同的特征,钻孔勘探在深部的上侏罗统库孜苏组 and 穿层侵入的变超基性岩-变基性岩岩脉群附近,圈定了独立铜矿体(萨热克铜矿床主开采对象)、独立铜锌矿体、独立铅锌矿床和独立铜铅锌矿体,它们在空间上呈异体多层共生结构。②在物质组成-空间分布规律上,在萨热克南矿带,北向南倾的逆冲推覆构造系统前锋带下盘,克孜勒苏群中发育断层相关褶皱和断层传播褶皱,克孜勒苏群第三岩性段蚀变硅质细砾岩中分布砂砾岩型铅锌矿层,与穿层侵入的变超基性岩-变基性岩岩脉群和褪色化蚀变相密切相关。克孜勒苏群第二岩性段褪色化蚀变岩屑砂岩内,形成砂岩型铜矿层,受褪色化蚀变相带和断层传播褶皱复合控制,砂岩型铜矿层呈宽缓背斜形态。而在萨热克北矿带地表未见变超基性岩-变基性岩岩脉群和克孜勒苏群内发育砂砾岩型铅锌矿体和砂岩型铜矿层。在矿体尺度上,从上侏罗统库孜苏组→下白垩统克孜勒苏,形成了显著垂向不同组分工业矿体的垂向分带序列。③在空间结构上,萨热克砂砾岩型铜多金属矿床南矿带的变超基性岩-变基性岩岩脉群,经过围绕隐伏鼻状构造周边在 $30 \sim 60$ 勘探线,揭示变超基性岩-变基性岩岩脉群在产出空间位置差异,在萨热

克砂砾岩型铜多金属矿床在成矿物质组成上表现为矿体和矿石尺度上具有显著工业组分差异。④在物质来源-空间分布规律上,这些岩脉群岩石系列为变碱性变超基性岩-变碱性基性系列,原岩类型为碱性辉长岩、似长石辉长岩和碱性二长辉长岩,从碱性辉长岩向似长石辉长岩和碱性二长辉长岩 2 个演化方向。原始岩浆系列恢复为碱性苦橄岩-碱性苦橄质岩-粗面苦橄质玄武岩系列和响岩质碱玄岩-响岩质碧玄岩系列,岩浆源区来源于交代富集型地幔和软流圈地幔。显然,就萨热克砂砾岩型铜多金属矿床而言,南矿带具有显著的幔源物质,形成了叠加成矿作用,与铅同位素示踪具有相似结论。

4.5 盆内岩浆叠加期构造-幔壳混源-热事件与岩浆叠加成岩相系

在鄂尔多斯铀-煤-石油天然气同盆共存富集成矿成藏区内,早白垩世构造-岩浆-热事件较显著^[76-78]:①在北部杭锦旗黑石头沟下白垩统中发育碱性橄榄玄武岩(126.2 ± 0.4 Ma, Ar-Ar 法年龄),与幔源岩浆底侵-分异作用等构造-岩浆-热事件^[76]有关。②东部紫金山地区粗面安山岩、粗面斑岩、响岩质碱玄岩、响岩等组成碱性侵入岩体,粗面斑岩(132.0 ± 2.1 Ma, 锆石 U-Pb 年龄, $n=10$, MSWD=1.6)、粗面安山岩(125.0 ± 6.7 Ma, 锆石 U-Pb 年龄, $n=6$, MSWD=0.079)等紫金山碱性复式侵入岩体,具有富碱、较富铁、贫镁和钙, SiO_2 不饱和等地球化学特征,为早白垩世软流圈上涌侵位有关的构造-岩浆-热事件^[76]。早白垩世构造-岩浆-热事件为鄂尔多斯油气、煤和铀矿床同盆共存富集成矿成藏期和重要岩浆热异常场有关的成岩事件^[79-81],形成了热液酸性蚀变岩相和有机酸成岩相,对于古生代烃源岩系具有重要的生排烃作用。早白垩世为天然气大规模生成期,三叠系延长统主要生油期也为早白垩世,石炭系-二叠系、三叠系及侏罗系煤系烃源岩,在早白垩世达到最高热演化程度,此外早白垩世也是金属铀矿的重要成矿期。总之,在盆内岩浆叠加期,形成碱性火山岩和复式碱性侵入岩体,发育热液酸性蚀变相和有机酸成岩相。

盆内岩浆叠加期在新疆萨热克巴依-托云等地区发育,以盆内变碱性超基性岩-变碱性基性岩脉群侵位和盆内构造-岩浆-热事件生排烃作用为特色。①在萨热克南矿带隐伏鼻状隆起周边呈放

射状的变碱性基性岩-变碱性超基性岩脉群,它们穿切了侏罗系煤系烃源岩,最高侵入层位为下白垩统克孜勒苏群第三岩性段,盆内岩浆叠加期晚白垩世-古近纪构造-岩浆-热事件,具有小规模的面带型结构。②在萨热克砂砾岩型铜多金属矿床内,盆内岩浆叠加期形成了脉带状辉铜矿沥青化蚀变相,沿断裂破碎带分布,岩浆热液叠加成矿年龄(58.6 ± 2.0 Ma, 辉铜矿 Re-Os 等时线年龄)^[82],与碱性玄武岩-碱性橄榄玄武岩-响岩($58.8 \pm 1.1 \sim 54.1 \pm 1.9$ Ma)^[83]等碱性岩套侵入年龄一致。

5 表生成岩相系与盆地表生变化期

按时间序列,盆内表生成岩相系主要类型有古表生成岩相系、同构造抬升期表生成岩相系、盆地表生变化期表生成岩相系、尾间湖盆表生成岩成矿相系(表 1;图 1、图版 I-m~o)。

5.1 古表生成岩相系

古表生成岩相系以盆地内角度不整合面和古风化壳最典型,以古土壤层、古粘土化风化层和古半风化层内古表生成岩相最发育。古风化壳剖面结构是现今成土过程和地质历史时期的表生地球化学岩相学物质记录,记录了丰富的岩石圈表面、水圈、生物圈、大气圈等地球多圈层耦合和相互作用结果。①近代风化壳类型和地球化学岩相学结构研究,能够揭示生物圈-土壤层-成土母岩之间的相互作用。在古风化壳类型研究上,地球化学岩相学类型和结构特征有利于揭示古气候环境,对不同海拔高度古风化壳地球化学岩相学结构研究,可揭示造山带和高原隆升历史和构造隆升事件序列。对古风化壳研究具有重要科学价值。②在云南东川新太古界小溜口岩组顶面发育古风化壳和古岩溶面($2.52 \sim 1.85$ Ga),为中国地质历史时期最早古的风化壳和古岩溶面,发育古土壤层,现今为粘土化蚀变相层。③云贵高原中二叠世茅口期古风化壳具有多样性结构,包括高岭石型风化壳(含铜粘土矿物型)、铝土矿型风化壳(铝土矿-含铜铝土型)、富锰灰色风化壳(锰矿)、铁质风化壳(绿豆岩型风化壳)、红土型风化壳(红土型金矿)、富 REE 型风化壳、热水岩溶风化壳,对这些古风化壳多样性结构进行的认识,可深化对峨眉山幔柱与地球表生系统耦合关系研究。对红色风化壳与红土化事件物质组成和事件序列研究,有助于建立地球化

学高氧化态的酸性相系统。在贵州晴隆锑-萤石-硫铁矿矿田内,古表生成岩相系现今为高岭石蚀变相和高岭石绿泥石蚀变相,富集 Ti-REE-Sc 等战略性关键矿产。在云南宣威地区玄武岩古风化壳中富集 Ti-Nb-REE^[84]。④在东天山博格达南缘二叠系中发育 4 类古土壤,富有机质土壤发育于土壤剖面近顶部,属于潮湿古环境产物;泥质土壤主要发育于淋滤带和淋滤带底部泥质沉淀带,形成于长期淋滤和较潮湿古环境;铁质土壤以富含铁质结核为特征,是长期淋滤和潮湿古环境的标志;钙质土壤以富含钙质结核为特征,是干旱-半干旱古环境的标志^[85],古风化壳和表生成岩相系也是良好的油气储层^[86]。

5.2 同构造抬升期表生成岩相系

同构造抬升期表生成岩相系在盆地改造期和盆内岩浆叠加期较发育,因沉积盆地发生显著构造抬升作用后,有利于形成表生成岩相系,它们形成于沉积盆地变形改造过程和盆内岩浆叠加过程中,如智利古近纪斑岩型铜成矿系统形成于侏罗纪—白垩纪弧后盆地构造反转期之后,在新近纪岛弧造山带隆升过程中,斑岩型铜矿床发生抬升并遭受剥蚀,在新近纪形成铜次生富集带(毯状席状辉铜矿矿体)和“异地型”砂砾岩型铜矿床。表生富集成矿作用已形成具有工业意义的铜矿床。智利异地式硅酸盐铜矿化和氧化物铜矿化形成于干旱环境,在智利丘迪卡马塔(Chuquicamata)斑岩铜矿床原生铜矿成矿年龄为 31~36 Ma,以次生明矾石化紧密共生的“异地型”砂砾岩型铜矿床形成年龄为 15~20 Ma(明矾石 K-Ar 法)^[87],铜富集在渐新世—晚中新世山麓冲积扇砾岩和凝灰质砾岩层中,与安第斯造山带不断抬升、极端干旱气候和先存斑岩铜矿床遭受剥蚀迁移后提供丰富成矿物源等密切相关。

5.3 盆地表生变化期表生成岩相系

在盆地表生变化期内,表生成岩相系在热带—亚热带、干旱荒漠气候等特殊景观区较发育。塔西中—新生代砂砾岩型铜铅锌矿床内,地表发育表生成岩相系和表生富集成矿作用,表生裂隙密度在地表裂隙密度大,向深部裂隙密度减小。①在砂岩型铜矿床和砂砾岩型铜矿床地表露头,铜盐-氯铜矿-副氯铜矿-赤铜矿等为地表盐晕壳的标志矿物组合,久辉铜矿-蓝辉铜矿-孔雀石-蓝铜矿为地表浅部表生富集成矿带标志矿物组合,铜蓝-黑铜矿-辉铜矿-斑铜矿等矿物组合为表生富集成矿作用底界

面,为地球化学氧化-还原界面底界限;形成于构造抬升期(8.8 ± 1 Ma~ 6.6 ± 1 Ma,磷灰石裂变径迹法)和西域期(小于 6.6 ± 1 Ma)^[82]。②乌拉根砂砾岩型铅锌-天青石矿从上到下垂向地球化学岩相学结构为高氧化态强酸性相(含钠铁铅锌硫酸盐相带)→高氧化态弱酸性相(铅锌碳酸盐相带)→酸-碱耦合反应相(锌碳酸盐相+铅锌硫化物相带);杨叶砂岩型铜矿内氯铜矿-副氯铜矿-天青石组合,指示了地球化学高氧化态酸性相;这两类矿床为同盆共存+异位成矿相体结构,与山前冲断褶皱带在中新世—上新世多期次冲断抬升事件(11.39 Ma、10.5 Ma、8.54 Ma、7.43 Ma、3.89 Ma、3.17 Ma,磷灰石裂变径迹法)^[82]吻合。③在煤矿区内,含煤屑废弃物为盐碱化土壤治理的长效物质。对活性碱与潜性碱(CO_3^{2-})、碱积障、碱性土、卤土与适生植物根际效应进行研究,可有效地揭示极端干旱荒漠生态地球化学效应。

5.4 尾间湖盆表生成岩成矿相系

在陆内盆山原镶嵌构造区内干旱荒漠生态系统中,局部发育较多水体和湿地,有利于荒漠绿洲持续发展和脆弱生态系统恢复。山间尾间湖盆内,盆地表生成岩成矿作用形成了卤水型含锂硼硝石矿床和盐岩型矿床,如玻利维亚乌尤尼新生代弧后高原盆地和智利新生代弧前山间盆地内含锂硝石矿床。在智利弧前山间盆地内(中央盆地)硼硝石矿床主要有冲积型、基岩型和盐壳型三类,在盆地边缘与山麓缓坡和低山丘陵处易形成较大规模硼硝石矿床。冲积型硼硝石矿床形成于山麓冲洪积扇前缘盐沼带,从上到下有 4 个分带。①山麓沉积物+胶结坚硬的砾石层和生硝盐壳,干盐湖表层上分布厚约 1.0 m 的含硝酸盐粉砂质盐壳。②厚 1~5 m 胶结坚实的生硝层,以钠硝石为主,共生有钠硝矾、钾硝石、水硝碱镁矾、石盐等。③中等坚硬的砂砾-岩屑层。④弱固结-粉状富石膏-硬石膏砂砾-岩屑层,无水芒硝、白钠镁矾和水硝碱镁矾。

6 结 论

综上所述,采用构造岩相学与地球化学岩相学研究思路,以成岩事件序列为主线,将沉积盆地内成岩相系划分为:①成盆期埋深压实物理-化学成岩作用和成岩相系,它们为盆内早期成岩作用所形成。②盆地改造期构造-热事件成岩作用与构造改

造成岩相系,分布在盆地内构造变形带、盆山原和盆山转换构造带内,该成岩相系适用于寻找构造成岩中心和构造生排烃事件中心。③岩浆叠加成岩相系形成于盆内岩浆叠加期,是盆内构造-岩浆-热事件成岩作用形成的产物。该成岩相系对于寻找隐伏成相成晕-成矿成藏中心和生排烃中心有指示意义。④在盆地地表变化期表生成岩相系中,形成铜盐类和含锂硝盐富集成矿。

参考文献

- [1] 中华人民共和国石油天然气行业标准.碎屑岩成岩阶段划分规范(SY/T5477—2003)[S].国家经济贸易委员会,2003.
- [2] 中华人民共和国石油天然气行业标准.碳酸盐岩成岩阶段划分规范(SY/T 5478—92)[S].中华人民共和国能源部,1993.
- [3] 邹才能,陶士振,周慧,等.成岩相的形成、分类与定量评价方法[J].石油勘探与开发,2008,35(5): 526-540.
- [4] 李忠,刘嘉庆.沉积盆地成岩作用的动力机制与时空分布研究若干问题及趋向[J].沉积学报,2009,27(5): 837-848.
- [5] 张金亮,张鹏辉,谢俊,等.碎屑岩储集层成岩作用研究进展与展望[J].地球科学进展,2013,28(9): 957-967.
- [6] 何江,冯春强,马岚,等.风化壳古岩溶型碳酸盐岩储层成岩作用与成岩相[J].石油实验地质,2015,37(1): 8-16.
- [7] 冉天,谭先锋,王佳,等.陆相碎屑岩成岩作用系统研究进展及发展趋势[J].地质找矿论丛,2017,32(3): 409-420.
- [8] 刘池洋,赵红格,赵俊峰,等.能源盆地沉积学及其前沿科学问题[J].沉积学报,2017,35(5): 1032-1043.
- [9] 方维萱.论沉积盆地内成岩相类型划分、动力学机制与找矿预测[J].矿床地质,2018,增刊: 245-247.
- [10] 李荣西,段立志,陈宝赞,等.东胜砂岩型铀矿氧化-酸性流体与还原碱性热液流体过度界面蚀变带成矿作用研究[J].大地构造与成矿学,2011,35(4): 524-531.
- [11] 韩凤彬,陈正乐,陈柏林,等.新疆喀什凹陷巴什布拉克铀矿流体包裹体及有机地球化学特征[J].中国地质,2012,39(4): 985-998.
- [12] 董新丰,薛春纪,李志丹,等.新疆喀什凹陷乌拉根铅锌矿床有机质特征及其地质意义[J].地学前缘,2013,20(1): 129-145.
- [13] 刘家铎,王峻,王易斌,等.塔里木盆地喀什北地区白垩系层序岩相古地理特征[J].地球科学与环境学报,2013,35(1): 1-14.
- [14] 王丹,吴柏林,寸小妮,等.柴达木盆地多种能源矿产同盆共存及其地质意义[J].地球科学与环境学报,2015,37(3): 55-57.
- [15] 方维萱,贾润幸,郭玉乾,等.塔西地区富烃类还原性盆地流体与砂砾岩型铜铅锌-铀矿床成矿机制[J].地球科学与环境学报,2016,38(6): 727-752.
- [16] 方维萱,贾润幸,王磊.塔西陆内红层盆地中盆地流体类型、砂砾岩型铜铅锌-铀矿床的大规模褪色围岩蚀变与金属成矿[J].地球科学与环境学报,2017,39(5): 585-619.
- [17] 方维萱,王磊,贾润幸.塔西地区中-新生代盆-山-原镶嵌构造区:砂砾岩型铜铅锌-天青石-铀-煤成矿系统[J].地球科学与环境学报,2018,40(6): 663-705.
- [18] 王伟,李文渊,高满新,等.塔里木地块西北缘萨热克砂岩型铜矿床构造-流体演化对成矿的制约[J].地质通报,2018,37(7): 1315-1324.
- [19] 於崇文.地质系统的复杂性(上册和下册)[M].北京:地质出版社,2003:3-1133.
- [20] 方维萱,杨新雨,柳玉龙,等.岩相学填图技术在云南东川白锡腊铁铜矿段深部应用试验与找矿预测[J].矿物学报,2012,32(1): 101-114.
- [21] 方维萱.论热液角砾岩构造系统及研究内容、研究方法和岩相学填图应用[J].大地构造与成矿学,2016,40(2): 237-265.
- [22] 方维萱.岩浆侵入构造系统 I: 构造岩相学填图技术研发与找矿预测效果[J].大地构造与成矿学,2019,43(3): 473-506.
- [23] 方维萱,杜玉龙,李建旭,著.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,2018:1-381.
- [24] 方维萱.地球化学岩相学类型及其在沉积盆地分析中应用[J].现代地质,2012,26(5): 996-1007.
- [25] 方维萱.地球化学岩相学的研究内容、方法与应用实例[J].矿物学报,2017,37(5): 509-526.
- [26] 方维萱.论铁氧化物铜金型(IOCG)矿床地球化学岩相学填图新技术研发[J].地球科学进展,2012,27(10): 1178-1184.
- [27] 方维萱,王磊,鲁佳,等.新疆萨热克铜矿床绿泥石化蚀变相与构造-岩浆-古地热事件的热通量恢复[J].矿物学报,2017,37(5): 661-675.
- [28] 蒙义峰,徐文艺,杨竹森,等.流体地质填图——一种新的地质调查方法[J].地质通报,2002,21(3): 181-182.
- [29] 王涛,计文化,胡建民,等.专题地质填图及有关问题讨论[J].地质通报,2016,35(5): 633-641.
- [30] 李荣西,王涛,刘海青.地质流体与流体地质填图[J].地质通报,2018,37(2/3): 325-336.
- [31] 韩文华,方维萱,张贵山,等.新疆萨热克砂砾岩型铜矿区碎裂岩化相特征[J].地球科学与环境学报,2017,39(3): 1-9.
- [32] 耿兴忠,陈懋弘,刘旭,等.构造-蚀变填图在贵州泥堡金矿床的初步实践[J].地质通报,2018,37(2/3): 254-261.
- [33] 刘卫彬,张世奇,李世臻,等.东濮凹陷沙三段储层微裂缝发育特征及意义[J].地质通报,2018,37(2/3): 496-502.
- [34] 罗静兰,邵红梅,杨艳芳,等.松辽盆地深层火山岩储层的埋藏-烃类充注-成岩时空演化过程[J].地学前缘,2013,20(5): 175-187.
- [35] 方维萱.论扬子地块西缘元古宙铁氧化物铜金型矿床与大地构造演化[J].大地构造与成矿学,2014,38(4): 733-757.
- [36] 方维萱,胡瑞忠,苏文超,等.大河边-新晃超大型重晶石矿床地球化学特征及形成的地质背景[J].岩石学报,2002,18(2): 247-256.
- [37] 方维萱,张国伟,胡瑞忠,等.秦岭造山带泥盆系热水沉积岩相应应用研究及实例[J].沉积学报,2001,19(1): 48-54.
- [38] 方维萱,刘方杰,胡瑞忠,等.风太泥盆纪拉分盆地中硅质白云岩-硅质岩特征及成岩成矿方式[J].岩石学报,2000,16(4): 700-710.
- [39] 方维萱,张国伟,胡瑞忠,等.陕西二台子铜金矿钠长石碳酸(角砾)岩类特征及形成构造背景分析[J].岩石学报,2000,16(3): 392-400.
- [40] 郝国强,王玖玲,胡社荣,等.峰峰矿区煤变质作用对煤层气中氮气含量的影响[J].中国煤层气,2013,11(1): 14-16.
- [41] 王冲,郑敏,王华,等.柴油在氮气存在条件下还原铜渣中磁性铁的模拟[J].化工进展,2014,33(5): 1101-1107.
- [42] 李平,陈天虎,杨燕,等.氮气保护下热处理胶状黄铁矿的矿物特性演化[J].硅酸盐学报,2013,41(11): 1564-1570.
- [43] 李谨,李志生,王东良,等.塔里木盆地含氮天然气地球化学特征及氮气来源[J].石油学报,2013,34(增刊): 102-111.

- [44] 杜乐天, 欧光习. 盆地形成及成矿与地幔流体间的成因联系[J]. 地质前缘, 2007, 14(2): 218-200.
- [45] 杜乐天. 幔汁——HACONS 流体的重大意义[J]. 大地构造与成矿学, 1989, 31: 91-99.
- [46] 郑大中, 郑若锋. 论氢化物是成矿的重要迁移形式[J]. 盐湖研究, 2004, 12(4): 9-16.
- [47] 黄瑞芳, 孙卫东, 丁兴, 等. 橄榄岩蛇纹石化过程中氢气和烷烃的形成[J]. 岩石学报, 2015, 31(7): 1901-1907.
- [48] 黄瑞芳, 孙卫东, 丁兴, 等. 基性和超基性岩蛇纹石化的机理及成矿潜力[J]. 岩石学报, 2013, 29(12): 4336-4348.
- [49] 张雪彤, 张荣华, 胡书敏. 橄榄岩-卤水反应实验生成富烷氢流体[J]. 中国地质, 2017, 44(5): 1027-1028.
- [50] 杨雷, 金之钧. 深部流体中氢的油气成藏效应初探[J]. 地质前缘, 2001, 8(4): 337-341.
- [51] 李玉宏, 魏仙样, 卢进才, 等. 内蒙古自治区商都盆地新生界氢气成因[J]. 天然气工业, 2007, 27(9): 28-30.
- [52] 杜乐天, 张景康, 欧光习. 石油天然气藏幔汁加氢和碱交代成因的再认识[J]. 地质论评, 2015, 61(5): 1008-2010.
- [53] 梁汉东. 煤岩自然释放氢气与瓦斯突出关系初探[J]. 煤炭学报, 2001, 26(6): 637-642.
- [54] 周强, 江洪清, 梁汉东. 沁水盆地南部煤层气中氢气释放规律研究[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(6): 871-873.
- [55] 琚宜文, 李清光, 颜志丰, 等. 煤层气成因类型及其地球化学研究进展[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 806-815.
- [56] 吴柏林, 魏安军, 胡亮, 等. 油气的耗散作用及其成岩成矿效应: 进展、认识与展望[J]. 地质论评, 2014, 60(6): 1119-1211.
- [57] 刘池洋, 马艳萍, 吴柏林, 等. 油气的耗散——油气地质研究和资源评价的弱点和难点[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(4): 517-526.
- [58] 马艳萍, 刘池洋, 王建强. 盆地后期改造中油气运散的效应——鄂尔多斯盆地东北部中生界漂白砂岩的形成[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 233-243.
- [59] 董林森, 刘立, 朱德丰, 等. 海拉尔盆地贝尔凹陷火山碎屑岩自生碳酸盐矿物分布及对储层物性的影响[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(3): 253-260.
- [60] 孙先达, 李宜强, 崔永强, 等. 海拉尔-塔木察格盆地凝灰质储层次生孔隙及碱交代作用[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(5): 32-44.
- [61] 沈光政, 王殿斌, 张民. 海拉尔盆地柯绿泥石和钠板石的组合特征及其石油地质意义[J]. 电子显微学报, 2006, 25(增刊): 311.
- [62] 邹华耀, 郝芳, 张伯桥, 等. 库车山前逆冲带超压流体主排放通道对油气成藏的控制[J]. 石油学报, 2005, 26(2): 11-20.
- [63] 杨海军, 张荣虎, 杨宪彰, 等. 超深层致密砂岩构造裂缝特征及其对储层的改造作用——以塔里木盆地库车坳陷克深气田白垩系为例[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(7): 942-950.
- [64] 王珂, 张惠良, 张荣虎, 等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝定量表征与分布预测——以塔里木盆地库车坳陷克深 5 气藏为例[J]. 地球科学与环境学报, 2017, 39(5): 652-668.
- [65] 汪新, 唐鹏程, 谢会文, 等. 库车坳陷西段新生代盐构造特征及演化[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 57-65.
- [66] 余一欣, 汤良杰, 杨文静, 等. 库车坳陷盐相关构造与有利油气勘探领域[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(4): 404-411.
- [67] 程海艳. 库车褶皱冲断带西段盐底辟成因机制[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(4): 1134-1141.
- [68] 赵孟军, 鲁雪松, 卓勤功, 等. 库车前陆盆地油气成藏特征与分布规律[J]. 石油学报, 2015, 36(4): 395-404.
- [69] 韩润生, 王雷, 方维萱, 等. 初论易门凤山铜矿床刺穿构造岩-岩相分带模式[J]. 地质通报, 2011, 30(4): 495-504.
- [70] 王雷, 韩润生, 胡一多, 等. 易门凤山铜矿床两类刺穿构造岩石地球化学特征及形成机制[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(4): 822-832.
- [71] 方维萱, 黄转莹, 刘方杰. 八卦庙超大型金矿床构造-矿物-地球化学[J]. 矿物学报, 2000, 20(2): 121-127.
- [72] 方维萱, 黄转莹. 陕西凤太拉分盆地构造变形样式与动力学及金-多金属成矿[J]. 中国地质, 2012, 39(5): 1211-1228.
- [73] 张旗, 金维浚, 王金荣, 等. 岩浆热场对油气成藏的影响[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(4): 1525-1541.
- [74] 高长海, 查明. 不整合运移通道类型及输导油气特征[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1113-1120.
- [75] Flores B O F, Hardyman R F, Jimenez C H N, et al. Mapa Geologico Del Area Berenguela Hojas Santiago De Machaca-Charana-Thola Kkollu (Escala 1 : 100000) [M]. Servicio Geologico De Bolivia, Proyecto Bid-USGS Geobol, 1994: 1-34.
- [76] 万丛礼, 付金华, 张军. 鄂尔多斯西缘前陆盆地构造热事件与油气运移[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(2): 43-47.
- [77] 邹和平, 张珂, 李刚. 鄂尔多斯地块早白垩世构造-热事件: 杭锦旗玄武岩的 Ar-Ar 年代学证据[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(3): 360-364.
- [78] 杨兴科, 晁会霞, 张哲, 等. 鄂尔多斯盆地东部紫金山岩体特征与形成的动力学环境——盆地热力-岩浆活动的深部作用典型实例剖析[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(2): 269-281.
- [79] 任战利, 张盛, 高胜利, 等. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义[J]. 中国科学(D 辑), 2007, 37(增刊): 23-32.
- [80] 李荣西, 段立志, 张少妮, 等. 鄂尔多斯盆地低渗透油气藏形成研究现状与展望[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(4): 364-372.
- [81] 覃小丽, 李荣西, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地东部上古生界储层热液蚀变作用[J]. 天然气地质, 2017, 28(1): 43-50.
- [82] 方维萱, 王磊, 王寿成, 等. 塔西砂砾岩型铜铅锌矿床成矿规律与找矿预测[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 1-424.
- [83] 李建清, 韩宝福, 朱美妃, 等. 西天山托云盆地及周边中生代岩浆活动的岩石地球化学与年代学研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1324-1340.
- [84] 刘殿蕊. 云南宣威地区峨眉山玄武岩风化壳中发现铌、稀土矿[J]. 中国地质, 2020, 47(2): 540-541.
- [85] 冯乔, 杨晚, 柳益群. 博格达南缘二叠系古土壤类型及其在层序地层研究中的应用[J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 725-729.
- [86] 侯连华, 王京红, 邹才能, 等. 火山岩风化体储层控制因素研究——以三塘湖盆地石炭系卡拉岗组为例[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 557-568.
- [87] Sillitoe R H, McKee E H. Age of supergene oxidation and enrichment in the Chilean porphyry copper province[J]. Economic Geology, 1996, 91: 164-179.