成矿“末端效应”研究进展

李凌杰[1,2]，韩润生[1,2*]，张艳[1,2]，陈青[3]，吴建标[1,2]，冯志兴[4]

1. 昆明理工大学国土资源工程学院，昆明 650093；
2. 有色金属矿产地质调查中心西南地质调查所，昆明 650093；
3. 云南驰宏锌锗股份有限公司，云南 曲靖 654211；
4. 四川会东大梁矿业有限公司，四川 凉山彝族自治州 615205

第一作者，E-mail：475647746@qq.com

* 通信作者，E-mail：554670042@qq.com

2024-07-11 收稿；2024-12-28 修回；2025-01-02 接受

基金项目：国家自然科学基金项目(42172086; 230988000)；云岭学者项目(2014)；云南省矿产资源预测与评价工程实验室项目(2011)；云南省地质过程与矿产资源创新团队项目(2012)

中图分类号：P611　　文章编号：2096-8523(2025)03-0134-17　　doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240387

摘　要：成矿“末端效应”作为矿田地质力学、矿床学研究的前缘内容，受到越来越多的专家学者关注，其研究内容主要包括成矿构造“末端效应”和成矿流体“末端效应”2 个方面：前者以矿田地质力学构造精细解析为基础，结合构造–(蚀变)岩相学填图技术、构造地球化学填图技术、地球物理探测技术，研究不同构造背景下多尺度控矿构造的“末端效应”及其对矿田、矿床、矿体(群)的控制作用，进而研究控矿构造“末端”的构造类型、力学性质、成矿构造体系及其控岩控矿规律、矿床(体)的定位机理等；后者开展流体包裹体和同位素/微量元素地球化学等研究，不仅可以反映成矿流体特征，同时结合成矿流体“末端”的分带效应研究，可以精细刻画成矿流体“末端”的时空演化过程，揭示构造物理化学条件对成矿作用的制约。从成矿构造和成矿流体两者“末端”的耦合关系角度出发，将矿田构造学、矿床学、流体地球化学、地球物理勘探技术紧密结合，可以深化研究构造“末端效应”的控岩控矿机制及构造–流体耦合成矿的成生联系，为深部找矿预测提供依据。

关键词：研究进展；构造分级控矿规律；成矿构造“末端效应”；成矿流体“末端效应”；矿床学；矿田构造学

成矿系统是指在一定地质时空域中，控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用过程，以及所形成的矿床系列和异常系列构成的整体，它是具有成矿功能的一个自然系统，“源”“运”“储”是成矿系统的三大要素[1]。成矿的“末端效应”的研究主要关注“储”这一关键要素，其主要研究成矿物质在成矿构造的“末端”沉淀时的条件(构造、物理及化学等条件)、过程及沉淀规律等[1-3]。2016 年我国启动了深地资源勘查开采专项研究，成矿“末端效应”研究成为成矿作用过程的重要内容之一。区域地球动力演化、物质和能量为成矿系统的始端[1]，即成矿系统的“源”这一要素；成矿系统的“末端”为成矿物质排泄和沉淀的场所[1-3]，流体的迁移通道(一般为深大断裂)将成矿系统的“末端”与“始端”相连[4-5]，构成完整的成矿系统(图 1)[6-7]。成矿“末端效应”的研究可以揭示成矿系统的“源”，反演成矿系统的“运”的过程[3]。因此，成矿的“末端效应”应定义为在一定的时空域内，受到统一构造应力场作用，构造驱动成矿流体沿流体的运移通道运移，并在构造“末端”的有利空间内沉淀成矿。从时间上看，成矿的“末端”是成矿过程的“最后阶段”，即“储”的过程；从空间上看，成矿的“末端”即是构造的“末端”。各类地质作用的

著录信息：李凌杰，韩润生，张艳，等. 成矿“末端效应”研究进展 [J]. 地质科技通报，2025，44(3)：134-150.
LI Lingjie, HAN Runsheng, ZHANG Yan, et al. Research progress on the "end effect" of ore formation[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(3): 134-150.

© Editorial Office of Bulletin of Geological Science and Technology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.　https://dzkjtb.cug.edu.cn

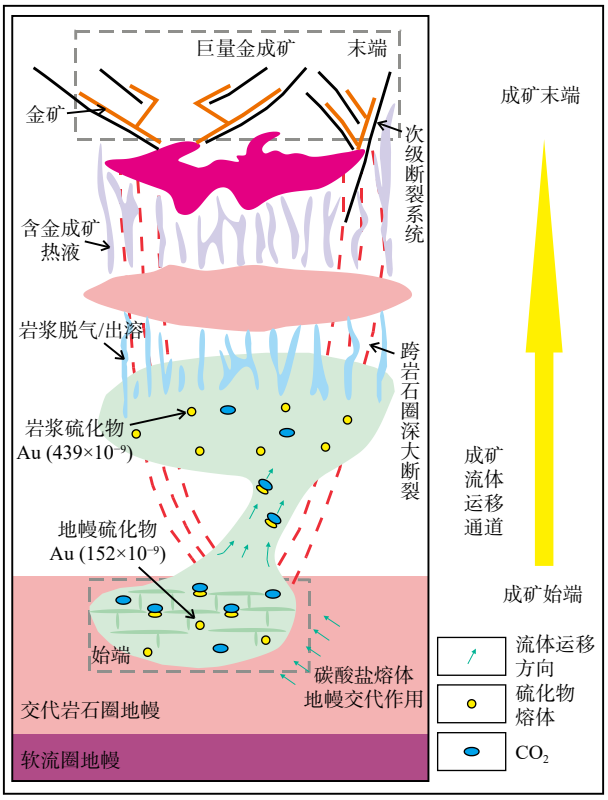


图 1　华北克拉通金成矿系统成矿模式示意图[6-7]

Fig. 1　Mineralization model of the gold mineralization system of the North China Craton

信息均保存在成矿系统的“末端”[1-2]，如矿体、矿物组合、蚀变信息、流体包裹体及地球物理和地球化学探测异常信息等[8-10]。因此，地球物理、地球化学异常特征是成矿的“末端效应”的客观映射。故此，构造、地球物理异常、地球化学异常的研究有助于对成矿“末端”的构造控矿规律、成矿元素富集规律等的理解，将构造与矿床的研究有机地结合，阐明矿床的形成及其演化过程，进而发挥成矿“末端效应”研究在成矿理论和矿产勘查中的重要作用。

近年来，不少矿山资源危机、濒临枯竭，发现和探明深部资源面临重大挑战[10]，成矿“末端效应”作为矿床学与矿田构造学的重要研究内容之一，其研究不仅可以限定成矿物质的运移[3]，而且可以揭示构造控岩控矿机制[11]，为圈定深部成矿有利部位提供依据。故此，笔者从成矿构造的“末端效应”、成矿流体的“末端效应”2 个方面总结成矿系统“末端效应”的研究进展，深化矿床学与矿田构造学综合研究，深入理解成矿“末端效应”的重要意义，为深部找矿提供理论和实践的依据。

1　成矿构造的“末端效应”

构造不仅为成矿流体运移提供通道，还在矿床形成、分布及演化中起到了重要作用[12-14]。根据成矿构造“末端效应”的定义，成矿构造的“末端”为控制矿体构造。然而，成矿构造体系内不同尺度的控矿构造分别控制了矿田、矿床、矿体的分布规律；同一成矿体系内构造“末端”不同类型的控矿构造控制了矿体特征、矿化蚀变分带特征、矿化的空间展布特征[15]。因此，成矿的“末端效应”主要研究成矿构造“末端”的控矿构造类型、成矿构造体系、控矿规律及构造对成矿流体的控制作用，进而揭示构造控岩控矿规律，指导矿产勘查及找矿工作。

1.1　成矿构造“末端效应”研究的内容

1.1.1　成矿构造“末端”的控矿构造类型

构造的“末端”为应力集中区，裂隙发育[16]，全息光弹模拟实验研究[17]4 种典型构造型式（雁裂式、“入”字型构造、旋钮构造、交叉复合构造）的构造应力场与应变能分布、成矿流体运移方向等的关系，表明构造“末端”为应力集中区，是成矿的有利部位。每一种特定的构造型式都是某一特定构造应力场的反映，其具有普遍性、统一性、重现性等特征[15]。

成矿构造“末端”的构造裂隙类型常见的主要包括：①岩浆侵入的外接触带及侵入过程中形成的裂隙。典型矿床类型为矽卡岩型铅锌矿床[18]，该类裂隙分布不均匀，以陡倾为主，在岩体中轴部或接触带附近密度较高，常呈柱状、倒锥状等[19]。②岩浆侵入过程中内部冷却形成的裂隙。典型矿床类型为斑岩型矿床[19-20]，该类裂隙一般位于岩体顶部或边缘，且无明显的定向性。③火山构造。比较典型的矿床有隐爆角砾岩型矿床，该构造常呈筒状、网脉状及圆锥状等[21]。④断裂系统形成的构造型式，常见的有雁裂式、“入”字型构造、旋钮构造、“多”字型构造等。如川滇黔铅锌多金属成矿区，受断褶构造系统控制[10, 22]，由主干断裂与褶皱轴面形成的“入”字型构造型式，如筲箕湾、猪拱塘、长坪子、垭都铅锌矿床的正断–背斜式，猫猫厂、福来厂铅锌矿双向断层–背斜式（棋盘格式）[23]。滇东北矿集区内矿田尺度、矿床尺度和矿体尺度表现出不同的控矿构造型式（图 2），如矿床尺度的毛坪铅锌矿床，NE 向压扭性的毛坪断裂与 NE 向的猫猫山复式倒转背斜形成的“入”字形构造；矿体尺度则为 NE 向压扭性层间断裂斜列式展布，形成了“多”字型构造[24]；⑤沉积岩性/岩相界面，沉积成岩过程的不整合面或不同沉积岩相界面，因其上下地层的岩性存在差异（如白云岩与砂岩、泥岩等），矿体往往赋存于“硅–钙”界面或碳酸盐岩一侧。

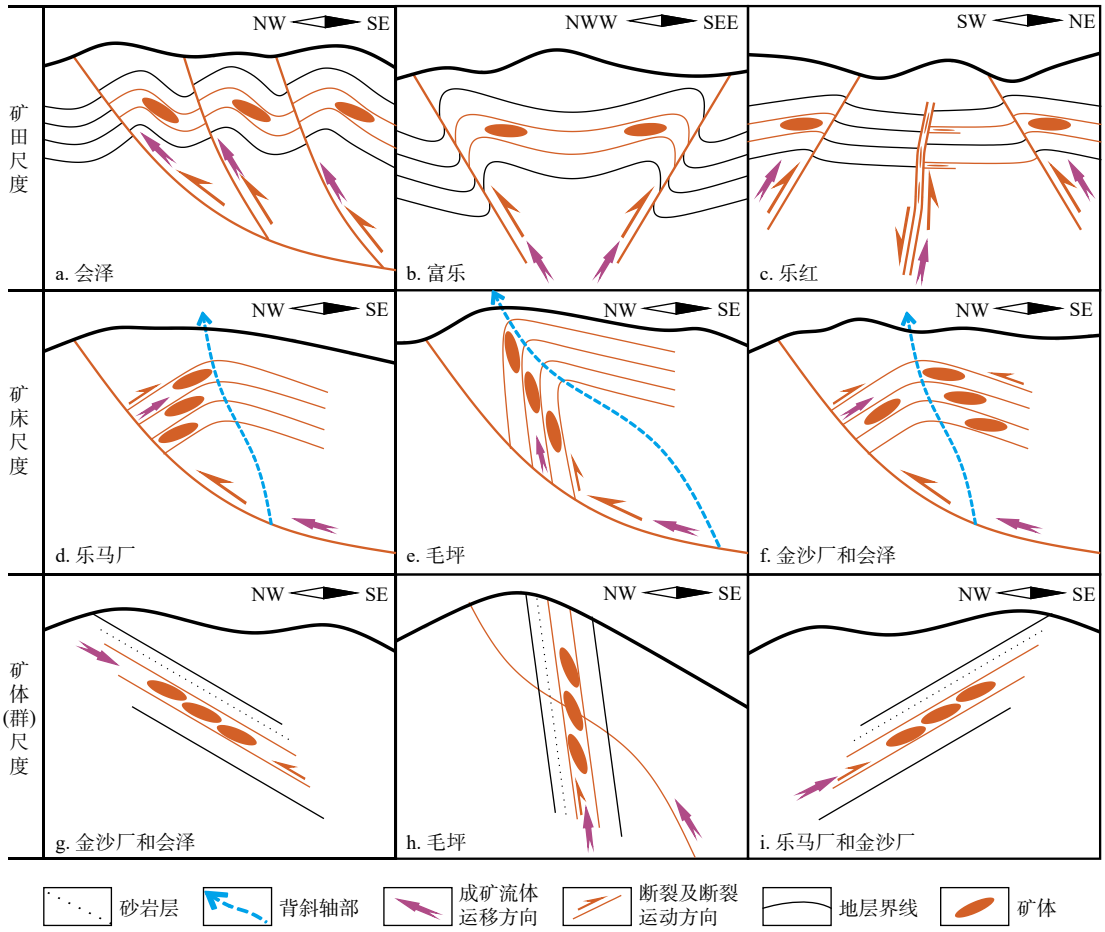


图 2　矿田尺度 (a ~ c)、矿床尺度 (d ~ f) 以及矿体 (群) 尺度 (g ~ i) 构造型式[24]

Fig. 2　Ore-control/ore-forming structure association styles of ore field scale (a-c), deposit scale (d-f) and orebody (group) scale (g-i)

对成矿构造“末端”构造类型的研究不仅可以确定矿体的形态，矿床的空间展布特征，还可以判断成矿条件及矿床成因类型，为找矿勘查提供理论支持。

1.1.2　成矿构造体系

成矿构造体系是指在一定时空域内控制成矿作用和矿田(矿床)分布的构造体系，是构造变形作用、岩浆活动、沉积–成岩作用、变质作用与成矿作用在时间–空间–物质具有成生联系的统一体[15]。成矿构造体系控制了成岩成矿作用的过程，其本质是构造驱动成矿流体和成矿物质的活化、迁移，并在构造的“末端”最终沉淀、富集成矿，即构造动力成岩成矿[25]。因此，成矿构造的“末端效应”必然受成矿构造体系控制。成矿构造体系的研究有助于加强对成矿构造“末端效应”的认识，从而应用到矿产预测工作中，并取到较好的效果[10, 26]。如，韩润生等[10] 基于对川滇黔成矿区的主控断裂和主要矿田(床)构造解析，识别出 5 期构造体系，分别为：早 SN 向构造带→NE 向构造带(成矿期)→NW 向构造带→晚 SN 向构造带→EW 向构造带，矿田(床)为 NW-SE 向应力场作用的产物，进而提出 NE 向构造带是成矿构造体系(图 3)，该构造体系制约了成矿流体的运移和沉淀成矿的全过程，并以此为指导对区域上典型的矿床(会泽铅锌矿床、毛坪铅锌矿床)找矿勘查工作起到了重要指导作用，丰富了碳酸盐岩容矿的非岩浆后生热液型铅锌矿的成矿理论[27]。

1.1.3　成矿构造“末端效应”的控矿规律

(1)分级控矿规律

对于热液矿床，其构造控矿特征常表现出分级控矿特征[11, 28]。不同等级的构造行迹，其发展规模、影响地壳的深度及发展历程的长短等有所不同，一般区域性的一级构造、二级构造均为导矿构造，控制矿田(矿床)的分布[13]；三级、四级构造均为容矿构造，其常决定了矿体的形态、产状、大小及矿体内部结构特点等。如东川–镇雄冲断褶皱带控制了会泽、雨禄、待补等铅锌矿床的铅锌矿田；NE 向的矿山厂–麒麟厂冲断褶皱构造控制了会泽超大型铅锌矿床；矿体受矿山厂–麒麟厂断层上盘的蚀变白云岩内 NE 向层间左行压扭性断裂带直接控制(图 4)[29]。

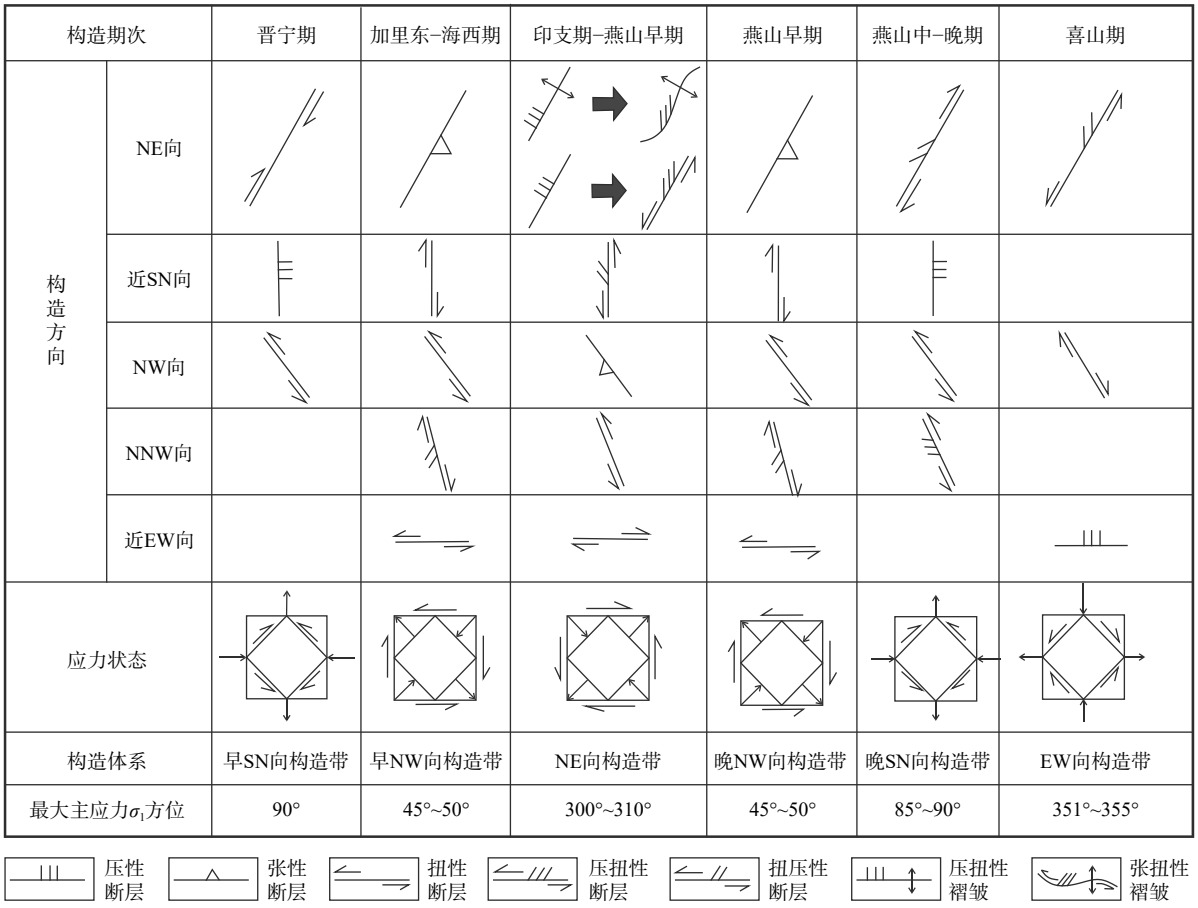


图 3　川滇黔接壤区构造变形期次及其演化图[10]

Fig. 3　Tectonic deformation stages and evolution in Sichuan-Yunnan-Guizhou triangular area

(2)构造“末端”成矿的等间距性

受构造体系控制的成矿系统，构造“末端”并不是所有地段均形成矿体(矿化)，仅在局部地段形成矿体(矿化)，在平面和垂向上常具有等间距性、等深距特征[15]。如南岭多金属成矿带，基底断裂构造的等间距性规律，推测不同规模、类型的矿床具有相应的等间距分布规律[30]；云南毛坪铅锌矿床，矿体(Ⅰ-7→Ⅰ-9、Ⅰ-10、Ⅰ-11→Ⅰ-14、Ⅰ-15 号矿体中心具有约 300 m 等深距分布)具有等深距(图 5)分布特征[24, 31-32]。可见，构造的等间距性和等深距特征控制了矿田、矿床、矿体的等间距和等深距分布特征。造成这种等间距性可能受构造变形的不均一性、构造发展的递进性及深部流体向上运移时上构造层发生间断性层间滑动所致[13]。实际矿产勘查工作中，可以根据构造的等间距(或等深距)控矿特征指导找矿工作。

(3)成矿构造“末端效应”控矿的整体性、阶段性和复合性

成矿构造体系的成生发展与成矿作用过程在时空上具有一致性[15]，因此，成矿构造体系控矿的整体性、阶段性和复合性的规律应为成矿构造“末端效应”控矿的典型规律，可以应用于找矿勘查工作。

①整体性控矿　受成矿构造体系控制，成矿构造的“末端”中不同类型(性质)的构造行迹控矿具有不同的特征，但它们之间却是具有密切联系的统一整体。如矿集区内的毛坪铅锌矿床和乐红铅锌矿床，成矿期 NE 向构造带为成矿构造体系[10]。毛坪铅锌矿床的矿体主要受 NE 向左行压扭性断裂控制[33]，其矿体延伸大于延长、剖面上缓宽陡窄、单个矿体厚度大、品位高且稳定[34]；乐红铅锌矿床矿体受 NW 向扭张性断裂(F_1、F_2 断裂)控制，矿体延长大于延伸、剖面上陡宽缓窄、单个矿体厚度窄、品位低且变化大[35]。可见，应用整体性规律可以较好地在成矿构造“末端”开展找矿预测工作。

②阶段性和复合性控矿　成矿构造体系的阶段性、期次性控制了成矿作用的阶段性、期次性[15]，晚期的成矿构造体系可以对早期成矿构造体系形成的矿床(体)产生破坏或叠加改造控制作用，即复合性控矿。如川西南大梁子铅锌矿床的主控断裂(F_{15})成矿期力学性质表现为右行张扭–张性，是重要的导矿

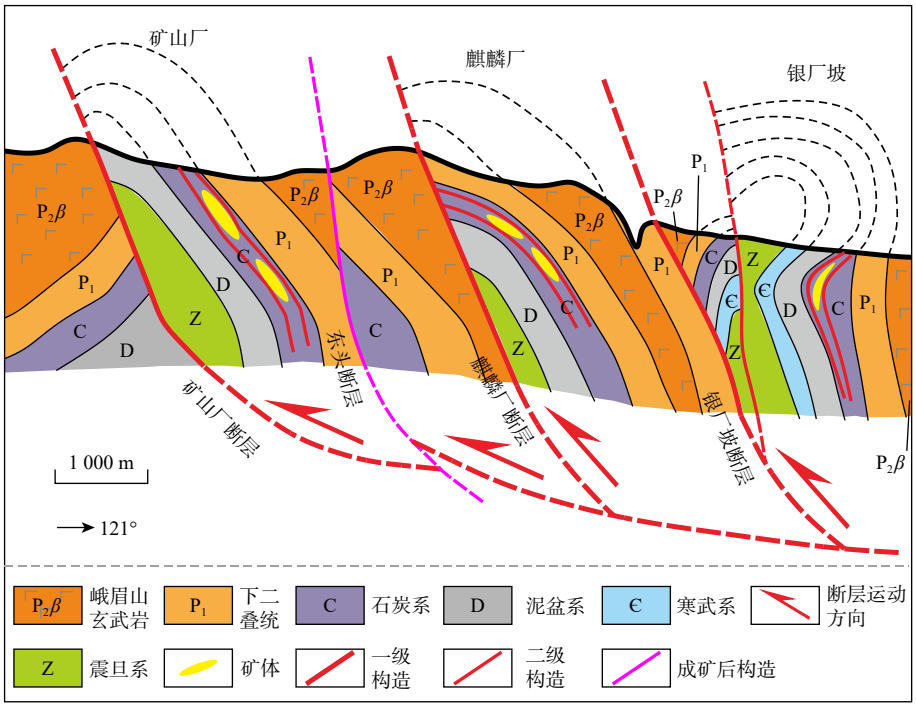


图 4　云南会泽富锗铅锌矿区分级控矿模式图[29]

Fig. 4　Structural graded ore-controlling mode of the Huize Ge-rich Pb-Zn deposit in Yunnan Province

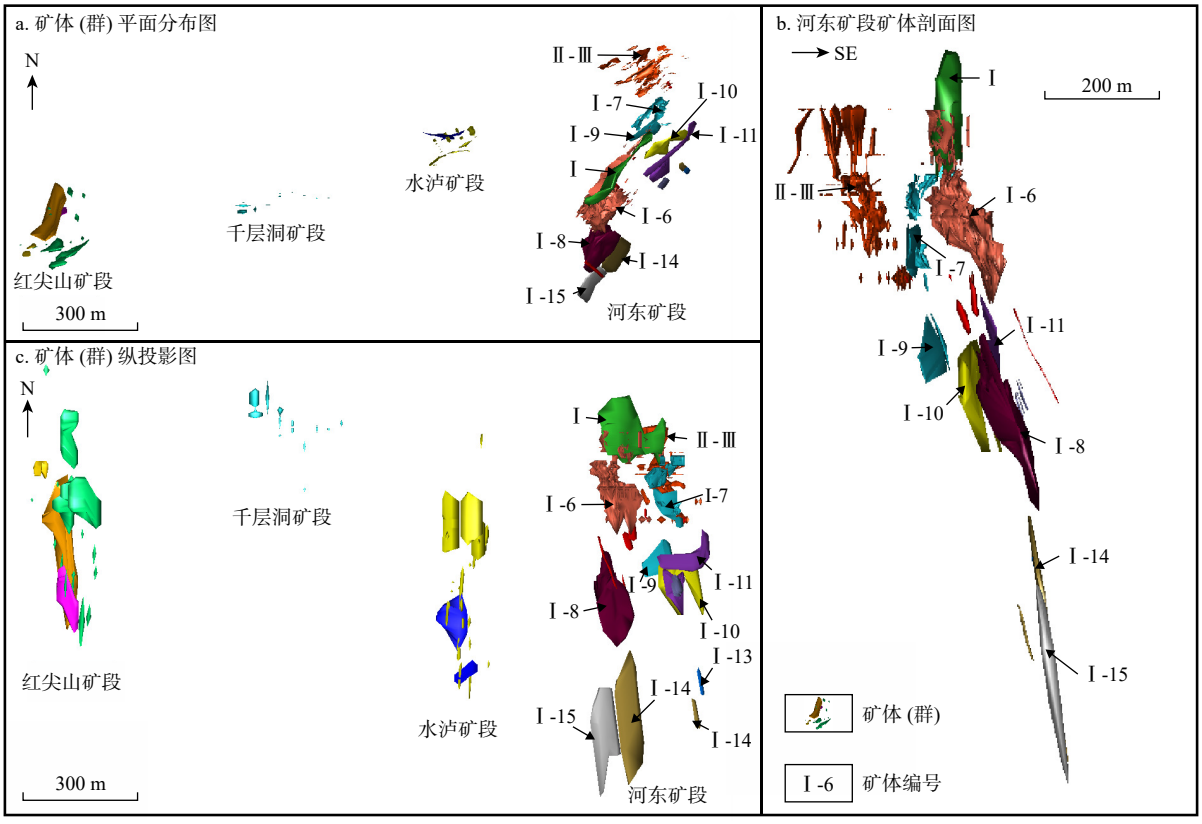


图 5　云南毛坪铅锌矿床矿体 (群) 空间分布图[24, 31]

Fig. 5　Spatial distribution of ore body of the Maoping Pb-Zn deposit in Yunnan Province

(兼容矿)构造,成矿后期力学性质转变为左行扭性–扭压性,主要以重叠、叠加、斜接、直接等形式形成复合断裂构造,表现为复合性控矿的特征(图 6)。

1.1.4　成矿构造“末端”对成矿流体“末端”的控制作用

构造作用引起地壳物质发生变形,产生破裂,形成各种类型的裂隙,为成矿流体运移提供驱动力、通

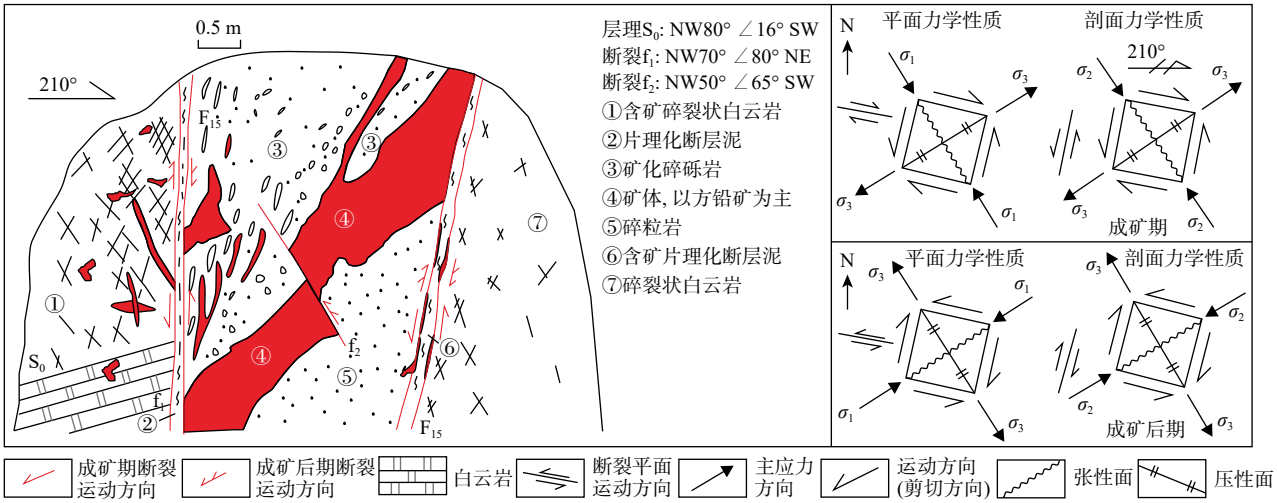


图 6　大梁子铅锌矿床 F_{15} 断裂素描图（σ_1，σ_2，σ_3 分别为最大主应力，中间主应力和最小主应力）

Fig. 6　Sketch drawing of F_{15} fracture in the Daliangzi Pb-Zn deposit

道及储存空间[36-37]。这些内容更多的是强调构造对成矿过程的物理作用，实际上构造作用不仅能引起物理变化，还能引起化学变化[13]，实践研究表明任何构造行迹都伴有物质组分迁移。

成矿流体活动过程中，成矿元素的迁移以渗滤作用和扩散作用 2 种方式为主，构造作用使成矿物质和能量带入，使得成矿“末端”热液体系的平衡遭到破坏，导致成矿作用在“末端”发生[38]。构造物理化学研究，主要关注构造应力对成矿的压力、岩石物理性质、地球化学相平衡及水岩体系的相变参量等因素的影响[13]。吕古贤[39-40]研究认为，构造应力分为差应力和构造附加静水压力(各向等正应力)2 个部分，其中差应力引起岩石的构造变形，而构造附加静水压力不仅影响岩石体积的变化，还能影响化学平衡。

因此，研究成矿构造对成矿流体“末端”的影响，不仅要解析构造，还要加强构造影响地球化学平衡的研究(即构造物理化学研究)。

1.2　成矿构造“末端”研究的技术方法

“四步式”综合找矿方法(图 7)对会泽型铅锌矿床深部和外围找矿预测具有现实意义，对其他热液矿床深部和外围的大比例尺定位预测和评价也具有重要的指导作用[41]，其涵盖了矿田构造、构造–蚀变岩相、构造地球化学、地球物理勘探等的综合研究，是成矿构造“末端”研究根本方法。

1.2.1　矿田（床）构造解析

构造对矿床的形成起重要控制作用，构造的形成演化控制了矿床的形成[13, 36]，矿田(矿床)构造解析作为构造控岩控矿作用研究的方法之一，其研究

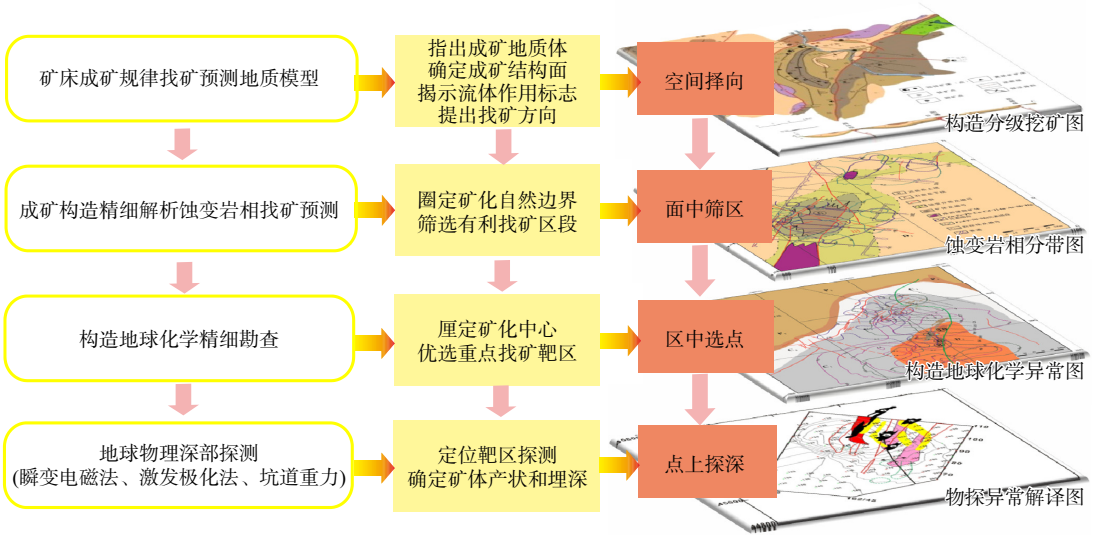


图 7　热液矿床隐伏矿定位预测“四步式”找矿方法简图[41]

Fig. 7　Flowchart of the "Four steps type" exploration method for localization and prediction of concealed orebodies in hydrothermal deposits

有助于深化对成矿“末端效应”的认识。

结构面力学性质鉴定是矿田构造研究的基础和先行步骤，不同力学性质的结构面具有不同的空间形态特征，而且对成矿（成岩）过程中矿液、成矿元素迁移、富集及成矿的物理化学条件等均有重要影响[28]，常见的结构面主要有：地层岩性/岩相界面、硅钙面、地下水前锋面、物理化学界面、侵入接触界面、断裂面、褶皱轴面、串联面、纯剪切面等[42]。

矿田（矿床）构造研究内容主要包括构造的几何学、运动学、力学、物质学、年代学、动力学等[28]。重点研究结构面的运动特征、力学性质等，厘定成矿前构造、成矿期构造、成矿后构造，确定成矿构造体系；分析构造岩类型、构造岩（矿物）组合、构造岩组构特征及构造控岩控矿的组合型式（或样式），结合区域构造（或构造演化史）的研究，确立矿田成矿构造体系，揭示构造控岩控矿机理，进而指导找矿勘查工作。

1.2.2　构造–蚀变岩相学填图

韩润生等[43]提出的构造岩–岩相内涵，意指在构造应力场作用或控制下，能反映不同构造地质环境和物理化学条件的地壳物质组构、组成和构造变形与形成的不同类型构造岩石组合、矿物组合和地球化学元素组合及其分带等特征。方维萱等[44]系统提出了大比例尺构造岩相学填图理论和方法。通过构造–蚀变岩相学研究，可以解析构造–蚀变岩相序列、样式及组合，反演成矿的物理化学条件（温度 T、pH、氧化还原电位 Eh 等），分析构造控矿的构造–蚀变岩相分带规律并建立模型，圈定矿化中心及找矿有利部位，揭示构造控岩控矿深延格局及矿床（矿体）的空间展布规律[11, 29, 41]。

构造–蚀变岩相学填图技术主要应用于大比例尺（1∶200～1∶50000）填图[41]，主要分为 4 步[11]：①控矿构造解析。对矿床内构造进行精细解析，确定构造控岩控矿类型、控矿构造组合样式及成矿构造体系。②热液蚀变测量。确定热液蚀变（岩）类型及其组合，研究蚀变岩内元素变化规律及特征矿物组合，分析蚀变（矿化）体的空间分布规律与构造的关系。该步可以客观反映控矿构造特征。③构造–蚀变岩相分带。根据构造岩类型、矿物组合特征、元素组合特征等划分构造–蚀变岩相分带，并确定其形成环境，建立矿化蚀变在平面和垂向的变化叠加特征，构建构造–蚀变岩相分带模型。④隐伏矿体预测。通过研究构造与蚀变岩相的成生联系，提取“相”指标（构造–矿物组合、元素组合等综合信息），圈定热液矿化中心与找矿靶区。该方法不仅可以指示成矿“末端”蚀变分带特征，还可以客观反映构造控矿的“末端”特征。

1.2.3　构造地球化学

构造地球化学勘查技术在受构造控制的矿床深部及外围找矿与快速勘查评价中得到了广泛应用，并取得了较好的效果[45-46]。韩润生等[47]总结并建立了构造地球化学找矿勘查的技术流程（图 8），并应用在云南会泽铅锌矿床、昭通毛坪铅锌矿床、陕西铜厂矿田等的找矿勘查工作中。如韩润生等[48]通过对会泽铅锌矿床内典型的断裂带内构造岩进行系统取样，通过 R 型因子分析，得出了 F_2 和 F_4 2 个矿化元素组合，并根据其异常梯度及组合规律，推断了矿体倾向和侧伏方向；同时，根据应力分布的韵律性特征，提出 88～100、100～130 勘探线间应出现较好的矿化带，经工程验证，取得了较好的找矿效果。吴鹏等[49]经过对易门凤山铜矿床的构造解析，提出了“阶梯空挡”的控矿规律，并结合构造岩地球化学的 R 型聚类分析，圈定了 5 个铜元素异常区和 3 个元素组合异常区，为该矿床深部找矿工作提供了重要的理论依据。

1.2.4　地球物理勘探

地球物理勘探技术是成矿“末端”结构及找矿预测的有效方法（图 9）。常用方法有放射性勘探、区域重磁勘探、电法勘探、金属矿人工地震勘探、高精度坑道重力全空间域勘探等。本研究以区域重磁方法中的高精度重磁勘探法和高精度坑道重力全空间域勘探法为例进行简述。

（1）高精度重磁勘探法

随着方法和测量仪器的进步，高精度重磁勘探法可发现 0.3～0.5 km^2 的深潜山[50]。高精度重力勘探可以应用于大地构造单元划分、区域断裂识别、侵入岩体空间展布的确定等。如在胶东地区受第四系覆盖严重地区通过高精度重力勘探识别出招平断裂，并结合可控源音频大地电磁测深确定了找矿有利部位[48, 51]；在湖南香花岭矿区根据重力异常推断花岗岩体侵位模型，进而提出了找矿靶区[52]。

高精度磁法勘探法主要原理为根据不同岩石之间、不同岩石和矿石之间存在磁性差异，圈定岩性（矿体）边界[53]。通过高精度磁法勘探可以推断含磁性矿体的空间结构，进而指导找矿。如鞍山式磁铁矿应用该法勘定隐伏矿体[54]。

（2）高精度坑道重力全空间域勘探法

该勘探技术主要针对矿床和围岩密度相差较大的矿床深部开展找矿勘查工作。韩润生等[55]提出了坑道重力全空间域高密度隐伏矿体的大比例尺找矿

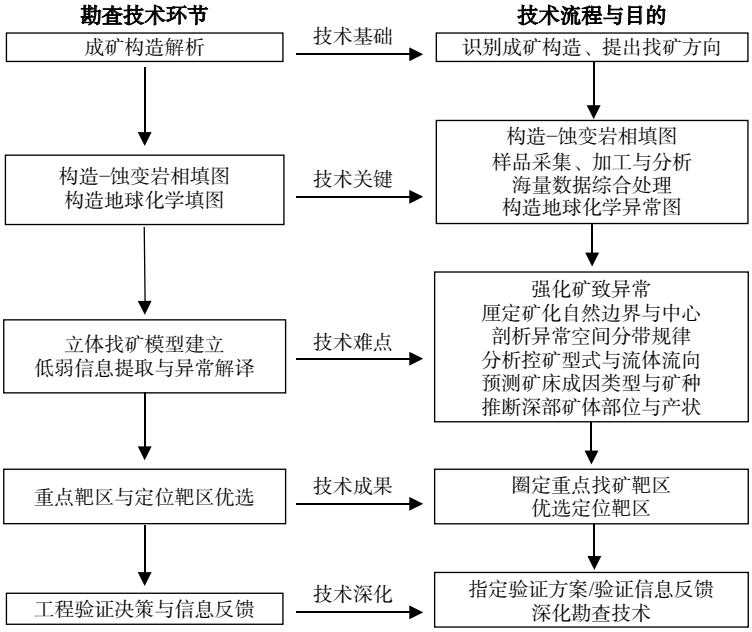


图 8　构造地球化学勘查技术流程框架图[47]

Fig. 8　Flowchart of tectonic geochemical survey technique

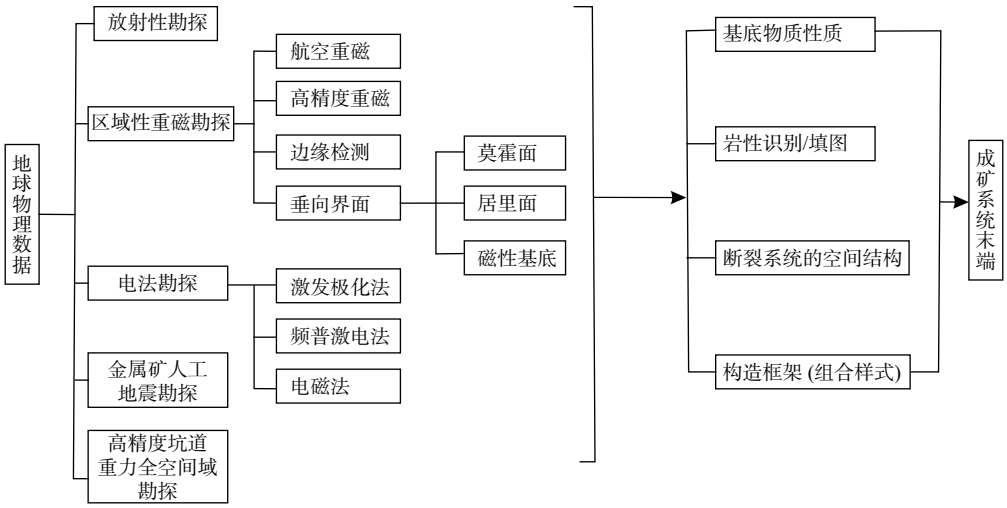


图 9　地球物理构造“末端”探测技术路线图[2]

Fig. 9　Road map of geophysical structures "end" exploration technique

方法。该方法解决了金属矿体在全空间域定位困难和其他物探方法(如电法、磁法)受电磁干扰和异常多解性的影响,从而实现了深部隐伏矿体的精准定位。

成矿构造体系控制成矿构造的“末端”,而地球物理勘探方法可揭示深部地球物理场特征,通过多种适合的地球物理勘探方法协同研究,为深化解析深部成矿构造“末端效应”提供有力证据。

2　成矿流体的“末端效应”

构造应力驱动成矿流体由深部向浅部或成矿有利部位(成矿“末端”)运移,此过程中成矿流体必然在构造“末端”留下痕迹。因此,成矿流体的“末端效应”主要研究成矿流体组成(包括成矿物质、成矿流体)特征、成矿流体对成矿构造“末端”的影响及成矿流体“末端”的分带性等。其研究不仅可以直接反映成矿物质“聚”的过程及其时空分布规律特征,而且可以对“运”的过程有较好的限定[3]。

2.1　成矿流体的研究内容和方法

成矿流体的研究是成矿流体“末端效应”研究的重点内容。主要包括成矿流体性质、成矿流体及成矿物质来源、成矿流体的运移及演化等内容。

2.1.1　成矿流体性质

成矿流体性质主要包括化学成分、物理化学条

件等，成矿流体性质的研究可以更好地理解矿床成因，为找矿工作提供理论依据[56]。流体包裹体记录了成矿流体性质的重要信息，如，李国猛[57]研究了川西南大梁子铅锌矿床存在的 2 种类型包裹体：盐水包裹体属于中低温、中等盐度流体，并结合 K/Na、Ba/Na 及 Rb/Ba 等比值特征，判断该类盐水流体与盆地卤水相似，并受到变质基底影响；有机质包裹体可能与曾经存在的古油藏有关。邓浩铭等[58]研究了黔东南丹寨地区热液脉型铅锌矿床成矿流体性质，发现早期成矿流体为较高温、低盐度、低密度的变质流体，晚期成矿流体为低温、中低盐度、低密度的变质流体与盆地卤水的混合，并非为典型密西西比河谷型（Mississippi valley type，简称 MVT）矿床。

2.1.2　成矿流体及成矿物质来源

成矿流体和成矿物质来源是成矿“末端效应”和矿床学研究的重要内容之一。包裹体的成分（如微量元素、液体成分等）[59-60]及矿石矿物（或脉石矿物）的同位素等[61-62]储存了重要的成矿信息，可以反演成矿流体和成矿物质来源等重要信息。如，NI 等[63]利用该技术对斑岩型钼矿的石英脉进行了详细岩相学研究，划分出了至少 4 个成矿阶段，矿石矿物辉钼矿与第二、第三阶段的石英共生，通过流体包裹体分析认为辉钼矿的形成受含 CO_2 流体的不混溶作用控制，与造山型金矿床流体不混溶行为类似。王静等[64]研究了江南的钨矿带东段长岭尖钨多金属矿床的脉石矿物石英的流体包裹体，认为成矿流体主要为岩浆水，并随着成矿进行，大气降水比例逐渐增高。另外，红外显微镜技术则拓宽了传统方法测试矿物的范围[60, 63-65]，可以完成不透明（或半透明）矿物（如棕黑色、深棕色闪锌矿、黑钨矿等）流体包裹体的测试工作[66-67]，单个流体包裹体激光剥蚀−电感耦合等离子体质谱（laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometer，简称 LA-ICP-MS）分析技术可以直接确定单个包裹体成分组成，可以反映成矿流体演化过程并确定成矿类型等，具有原位、高分辨率、高保真等特点[68]，如，陈应华等[69]对南岭新田岭钨矿床的闪锌矿和石英中单个流体包裹体进行了 LA-ICP-MS 精准分析，发现闪锌矿的流体包裹体内异常富集 Cu、Ag 和 Sn 等金属元素，石英的流体包裹体中富集 Li、B、Na、K、Rb、Sr、Cs 和 Pb 等元素，结合微量元素研究，认为石英的流体包裹体特征能代表成矿流体特征，而闪锌矿内包裹体可能受后期热液改造并不能代表成矿流体。

同位素可分为稳定同位素和放射性同位素 2 种：稳定同位素包括 H、O、S、C、Fe、Cu、Zn、Mo、Sn 等；放射性同位素包括 Rb-Sr、Sm-Nd、U-Th-Pb、Re-Os、Lu-Hf 等同位素体系[56, 70]。ZHU 等[71]通过对川西南地区的大梁子铅锌矿床、天宝山铅锌矿床、乌斯河铅锌矿矿床的 Zn、Pb、S 等同位素测量，确定了这几个矿床的成矿物质来源和矿床成因具有相似性；最近非传统稳定同位素 W、Sn 等被应用于成矿的研究[72]，如 WU 等[73]通过香花岭锡多金属矿床的 Sn 同位素的研究，认为动力学不平衡分馏是导致锡石 Sn 同位素分馏的主要原因，其与锡石的微量元素可以作为岩浆热液过程的指标。

2.1.3　成矿流体的运移及演化

成矿期内不同成矿阶段的流体包裹体和同位素等研究，可以有效限定成矿流体的运移及演化。如，岳素伟等[74]研究了陕西省煎茶岭金矿的 H、O 同位素，认为初始流体为变质流体，晚期有大气降水的混入；基于 C 同位素研究认为，C 主要来自于碳酸岩盐的变质分解；基于 S 同位素认为，S 主要来自围岩地层，进而判断了成矿的动力学过成。ZHANG 等[75]对会泽的麒麟厂和矿山厂的不同中段 Zn 和 S 同位素研究表明（图 10），成矿流体由深部向浅部运移，精确的刻画了成矿流体在成矿“末端”的演化过程。

近年来，随着计算科学的发展，数值模拟被更多地应用于成矿动力学研究，其在成矿流体“末端效应”的研究中也起到了重要作用，可以半定量−定量化模拟成矿过程。常用的模拟方法主要有：①有限元法；②有限差分法；③边界元法等[76]。如肖凡等[77]采用有限元模拟，构建了广东凡口铅锌矿床的力−热−流−化学四场耦合的成矿动力学数值模拟模型，不仅表征了成矿流体流动的过程，还定量化地模拟了金

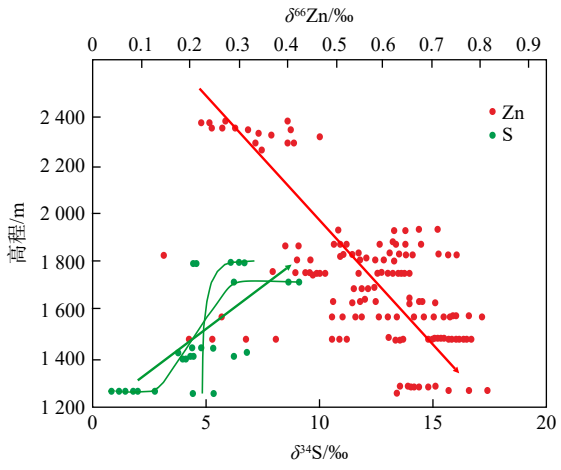


图 10　会泽铅锌矿床不同中段 Zn-S 同位素联合图[75]

Fig. 10　Zn-S isotope correlation diagram of different middle sections of the Huize Pb-Zn deposit

属在成矿“末端”沉淀的过程。

同时，机器学习也可以用于成矿流体的研究，机器学习主要是针对已有的海量地球化学数据，发掘数据之间的联系，以指导矿产勘查[78]。其目前主要应用于矿床成因类型判别、母岩溯源、变质岩原岩判别及大地构造环境判别等[79]。邓依等[80]基于机器学习的主成分分析方法，根据不同成因类型黄铁矿微量元素的研究，建立了矿床成因类型判别图解，取得了较好的效果。

因此，在流体包裹体和同位素的研究基础上，结合数值模拟和机器学习，不仅可以确定成矿流体、成矿元素的来源及矿床成因类型，而且可以揭示成矿流体的成分、物理化学条件，精细刻画成矿流体在成矿“末端”的演化过程。

2.2 成矿流体对成矿构造“末端”的影响

构造影响流体的同时，流体反过来可以影响构造和成矿作用[81-82]：流体可以降低矿物颗粒间的摩擦系数，促使矿物发生溶解而导致岩石物理化学性质发生改变，从而影响变形过程[83-84]，水–岩反应中原矿物溶解和新矿物形成，不仅引起流体成分变化，亦可以影响岩石物性的变化[85-86]，原生矿物的溶解也会增加孔隙的连通性和岩石的渗透率等[87]；流体的运移可以对邻近的岩石产生破坏作用，产生水压断裂、角砾岩带等非应力式构造破坏[88]；另外，成矿流体作为成矿物质及能量的载体，具有媒介和作用剂的双重属性[89]。

2.3 成矿流体“末端”的分带性

构造作为成矿流体运移的通道和成矿物质沉淀、储存的场所[9]，其分带性是构造控矿研究的重要内容之一，构造的分带主要体现在构造要素在时间上和空间上有规律的分布。构造控矿的物质表现主要通过构造地球化学现象反映出来[38]，构造“末端”的分带，必然导致成矿流体“末端”的分带。於崇文等[90]认为热液成矿分带的本质是单一扰动多重响应的结果，这也是多组分耦合的动力学系统的一般规律。因此，成矿流体“末端”的分带（或蚀变分带）是指受构造应力场作用（或控制）下，成矿流体在多孔岩石中流动并与岩石发生水岩作用，受流体的渗滤速度、流体相内的均相反应速度、流体–岩石的多相反应速度、溶解–沉淀速度等因素综合影响，使得矿物及矿物组合、成矿元素等在横向和垂向上发生分带效应。

区域、矿田、矿床（矿体）等不同尺度的“末端”均具有分带性[42]。如，在区域尺度，邓军等[91]在研究吉林省夹皮沟金矿床成矿系统时发现，区域上 Au、Cu 元素具有侧向分带性，而成矿带内 Cu、Au、Bi 具有对称性分布特征；在矿床尺度，宋丹辉等[92]研究黔西北青山铅锌矿床时发现，由矿化中心向外依次发育张裂岩相带–泥化相带–扭裂岩相带–压裂岩相带，其随着矿化减弱，成矿环境由氧化性→还原性渐变，温度逐渐降低，具有明显的分带特征（图 11），为寻找深部隐伏矿体提供了证据；李波[93]研究松梁铅锌矿床①号矿体构造原生晕时发现其轴向具有分带序列，并推测了该矿体在深部具有较好的延伸。此外，基于成矿流体“末端”的分带性还可以推断成矿流体的运移方向，进而预测隐伏矿体[94]。

成矿流体“末端”的分带性除了受构造的分带性控制外，还受到成矿的物理化学条件（压力 P、温度 T、pH、Eh 等）、成矿元素在成矿流体中的地球化学行为（离子电位、化合物的溶度积等）、成矿作用的期次性、成矿物质来源、赋矿围岩等因素综合影响。因此，成矿流体“末端”分带性的研究不仅可以反映构造“末端”分带性，而且可以反映成矿流体的运移方向，进而为深部找矿勘查提供理论指导。

3 成矿“末端效应”的研究展望

随着成矿“末端效应”学术思想的提出[95]，其作为矿床学、矿田地质力学研究前缘内容，受到越来越多的学者关注。成矿“末端效应”的研究不仅有助于深化成矿理论的认识，而且助力于隐伏矿预测。该研究应关注以下 4 个方面。

（1）基于地质力学理论与方法，深入研究不同构造背景下多尺度构造的“末端效应”特征及其对矿田、矿床（体）的控制作用，主要包括控矿构造“末端”的构造类型、力学性质、成矿构造体系及其控岩控矿规律、矿床（体）的定位机理等。

（2）原位分析、流体包裹体等技术手段可有效刻画成矿流体“末端”的时空演化过程，揭示构造物理化学条件对成矿作用的制约，深化构造地球化学、构造物理化学研究内容。

（3）成矿构造与成矿流体两者“末端”的耦合研究，可以深化研究不同成矿系统构造与流体相互作用及其控岩控矿机制，揭示构造–流体–成矿的成生联系，为隐伏矿床（体）预测提供重要依据。

（4）将矿床学、流体地球化学研究与矿田构造解析、构造–蚀变岩相学填图技术及地球物理勘探方法紧密结合，是揭示成矿“末端效应”的控岩控矿作用和矿床成矿作用本质的有效途径。

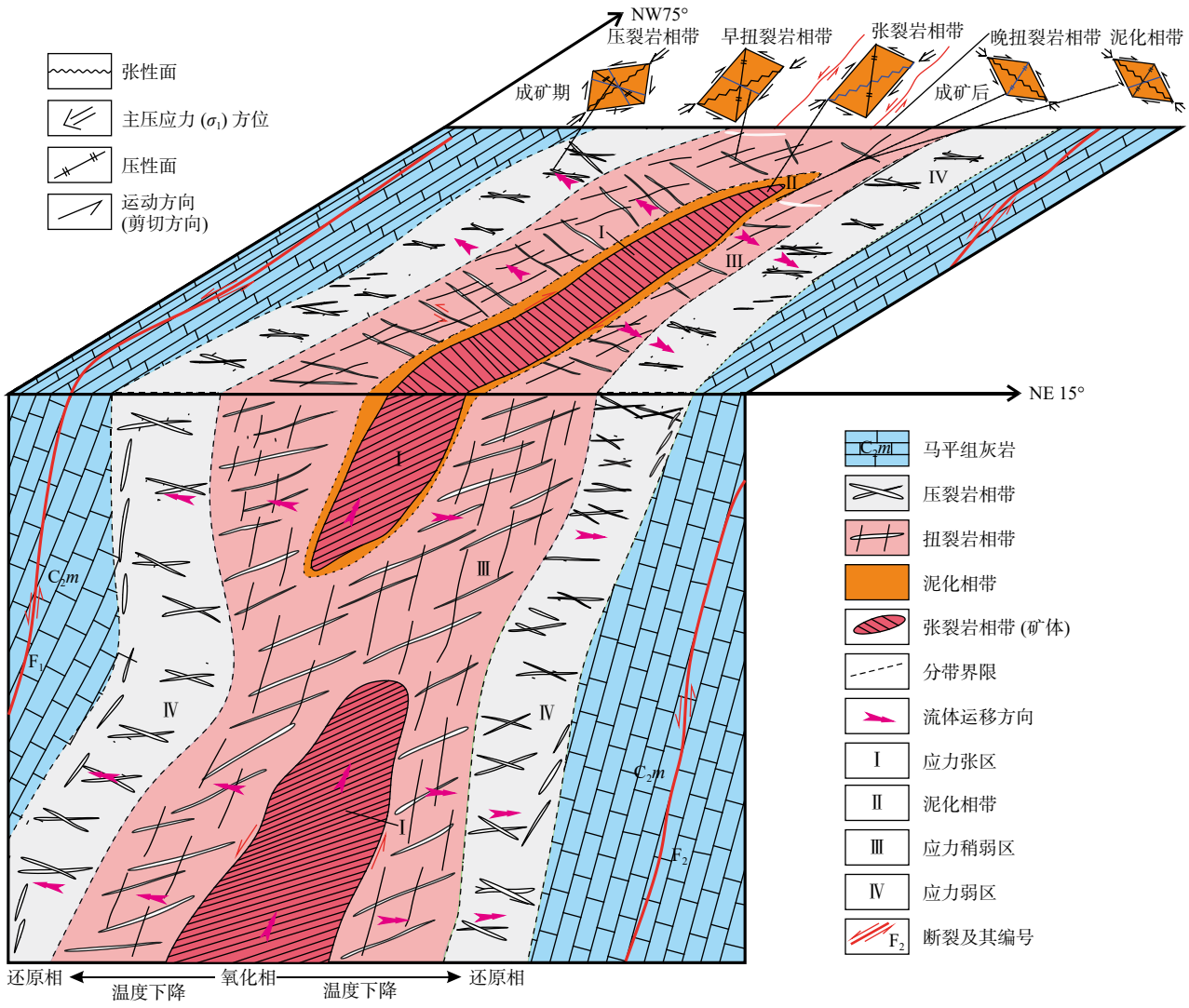


图 11　黔西北青山铅锌矿床构造岩–岩相分带模式图[92]

Fig. 11　Tectonite-lithofacies zoning model of the Qingshan Pb-Zn deposit, northwestern Guizhou Province

(5)加强数值模拟和机器学习在成矿构造与成矿流体两者“末端”的耦合研究中的应用，将“末端效应”研究实现半定量–定量化，从而提高成矿预测精度。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献：

[1] 吕庆田, 孟贵祥, 严加永, 等. 长江中下游成矿带铁–铜成矿系统结构的地球物理探测：综合分析 [J]. 地学前缘, 2020, 27(2)：232-253.
LÜ Q T, MENG G X, YAN J Y, et al. The geophysical exploration of Mesozoic iron-copper mineral system in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Metallogenic Belt: A synthesis[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(2): 232-253. (in Chinese with English abstract)

[2] 周文月, 严加永, 陈昌昕. 多尺度地球物理与成矿系统探测：现状与进展 [J]. 地球物理学进展, 2021, 36(3)：1208-1225.
ZHOU W Y, YAN J Y, CHEN C X. Multiscale geophysics and mineral system detection: Status and progress[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(3): 1208-1225. (in Chinese with English abstract)

[3] 范宏瑞, 蓝廷广, 李兴辉, 等. 胶东金成矿系统的末端效应 [J]. 中国科学(地球科学), 2021, 51(9)：1504-1523.
FAN H R, LAN T G, LI X H, et al. Conditions and processes leading to large-scale gold deposition in the Jiaodong province, eastern China[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2021, 51(9): 1504-1523. (in Chinese with English abstract)

[4] RIDLEY J R, DIAMOND L W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models[M]. Denver, United States: Society of Economic Geologists, 2000: 141-162.

[5] 张德全, 王富春, 佘宏全, 等. 柴北缘–东昆仑地区造山型金矿床的三级控矿构造系统 [J]. 中国地质, 2007, 34(1)：92-100.
ZHANG D Q, WANG F C, SHE H Q, et al. Three-order ore-controlling structural system of orogenic gold depositsin the northern Qaidam margin-East Kunlun region[J]. Geology in China, 2007,

34(1): 92-100. (in Chinese with English abstract)

[6] BLANKS D E, HOLWELL D A, FIORENTINI M L, et al. Fluxing of mantle carbon as a physical agent for metallogenic fertilization of the crust[J]. Nature Communications, 2020, 11: 4342.

[7] 刘晓阳. 华北克拉通东部金成矿系统深部岩浆过程: 来自地幔包体和中基性脉岩矿物学及包裹体微区证据 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2022.
LIU X Y. Deep magmatic process of the Early Cretaceous gold metallogenic system in the eastern North China Craton: Evidence from in-situ geochemical analyses of minerals and melt inclusions from mantle xenoliths and intermediate-basic dykes[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2022.(in Chinese with English abstract)

[8] 翟裕生. 论成矿系统 [J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 13-27.
ZHAI Y S. On the metallogenic system[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1): 13-27. (in Chinese with English abstract)

[9] 翟裕生. 地球系统科学与成矿学研究 [J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 1-10.
ZHAI Y S. Earth system sciences and the study on metallogenesis[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 1-10. (in Chinese with English abstract)

[10] 韩润生, 吴鹏, 张艳, 等. 西南特提斯川滇黔成矿区富锗铅锌矿床成矿理论研究新进展 [J]. 地质学报, 2022, 96(2): 554-573.
HAN R S, WU P, ZHANG Y, et al. New research progress in metallogenic theory for rich Zn-Pb-(Ag-Ge) deposits in the Sichuan-Yunnan-Guizhou Triangle (SYGT) area, southwestern Tethys[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(2): 554-573. (in Chinese with English abstract)

[11] 韩润生, 赵冻. 初论岩浆热液成矿系统控岩控矿构造深延格局研究方法 [J]. 地学前缘, 2022, 29(5): 420-437.
HAN R S, ZHAO D. Research methods for the deep extension pattern of rock/ore-controlling structures of magmatic-hydrothermal ore deposits: A preliminary study[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(5): 420-437. (in Chinese with English abstract)

[12] 李四光. 地质力学概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1973.
LI S G. Introduction to geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 1973. (in Chinese)

[13] 吴淦国. 矿田构造与成矿预测 [J]. 地质力学学报, 1998, 4(2): 1-4.
WU G G. Ore field structure and metallogenic prognosis[J]. Journal of Geomechanics, 1998, 4(2): 1-4. (in Chinese with English abstract)

[14] 吴淦国, 吕承训. 矿田构造的研究历史、现状与发展 [J]. 地质通报, 2011, 30(4): 461-468.
WU G G, LÜ C X. Research history, present situation and development of ore field structure study[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(4): 461-468. (in Chinese with English abstract)

[15] 韩润生, 刘飞, 张艳. 论热液成矿系统中构造体系控矿作用 [J]. 地学前缘, 2025, 32(2): 371-389.
HAN R S, LIU F, ZHANG Y. Discussion on ore-controlling roles of structural system in hydrothermal metallogenic system[J]. Earth Science Frontiers, 2025, 32(2): 371-389. (in Chinese with English abstract)

[16] 吴青鹏, 杨占龙, 郭精义, 等. 背斜型构造储层裂缝预测方法探讨: 以 JLS 地区须二段储层为例 [J]. 天然气地球科学, 2006, 17(5): 719-722.
WU Q P, YANG Z L, GUO J Y, et al. Approach of method of antiform reservoir fracture prediction: Taking the reservoir of the 2nd Member of the Xujiahe Formation in JLS area as an example[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(5): 719-722. (in Chinese with English abstract)

[17] 王成金, 王义强. 构造应力场控矿原理及控矿规律的实验研究 [J]. 地质力学学报, 1995, 1(2): 28-34.
WANG C J, WANG Y Q. Experimental study of the prinaple and rega-larity governing tectonic stress control of ore deposits[J]. Journal of Geomechanics, 1995, 1(2): 28-34. (in Chinese with English abstract)

[18] 何小林, 严济池, 赵文. 江西宝山矽卡岩型钨多金属矿接触带构造控矿特征及找矿意义 [J]. 矿产与地质, 2023, 37(1): 17-25.
HE X L, YAN J C, ZHAO W. Ore controlling characteristics and prospecting significance of the contact zone of Baoshan skarn type tungsten polymetallic deposit in Jiangxi[J]. Mineral Resources and Geology, 2023, 37(1): 17-25. (in Chinese with English abstract)

[19] 赵茂春, 余先川, 张翼飞, 等. 斑岩型矿床容矿裂隙成因的几种概念模型及其意义 [J]. 矿床地质, 2020, 39(1): 19-41.
ZHAO M C, YU X C, ZHANG Y F, et al. Conceptual model for genesis of mineralized fissures in porphyry deposits and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2020, 39(1): 19-41. (in Chinese with English abstract)

[20] 李文昌, 刘学龙. 云南普朗斑岩型铜矿田构造岩相成矿规律与控矿特征 [J]. 地学前缘, 2015, 22(4): 53-66.
LI W C, LIU X L. The metallogenic regularity related to the tectonic and petrographic features of Pulang porphyry copper orefield, Yunnan, and its ore-controlling characteristics[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(4): 53-66. (in Chinese with English abstract)

[21] 郝金月. 西藏斯弄多银多金属矿床隐爆角砾岩特征及成因研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
HAO J Y. Characteristics and genesis of cryptoexplosive breccias in Sinongduo Ag polymetallic deposit, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)

[22] 杨博, 韩润生, 吴建标, 等. 川西南大梁子铅锌矿床构造分级控矿规律与控矿构造组合样式 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 144-157.
YANG B, HAN R S, WU J B, et al. Structural graded ore-controlling rule and ore-controlling structural combination pattern of Daliangzi lead-zinc deposit in southwestern Sichuan[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(1): 144-157. (in Chinese with English abstract)

[23] 韩润生, 胡煜昭, 王学琨, 等. 滇东北富锗银铅锌多金属矿集区矿床模型 [J]. 地质学报, 2012, 86(2): 280-294.
HAN R S, HU Y Z, WANG X K, et al. Mineralization model of rich Ge-Ag-bearing Zn-Pb polymetallic deposit concentrated district in northeastern Yunnan, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 280-294. (in Chinese with English abstract)

[24] HAN R S, WU J B, ZHANG Y, et al. Oblique distribution patterns and the underlying mechanical model of orebody groups con-

trolled by structures at different scales[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 4591.

[25] 杨开庆. 动力成岩成矿理论的研究内容和方向 [J]. 中国地质科学院地质力学研究所文集, 1986(1): 1-15.
YANG K Q. Reasurch subjects and orientation on the theory of tectono-petrogenesis and tectono-metallogenesis[J]. Collection of articles from the Institute of Geological Mechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, 1986(1): 1-15. (in Chinese with English abstract)

[26] 刘飞, 王雷, 韩润生, 等. 滇西北北衙斑岩型金多金属矿田构造体系及其控矿作用 [J]. 地学前缘, 2017, 24(6): 208-224.
LIU F, WANG L, HAN R S, et al. Ore-field structural system and its ore-controlling processes of the Beiya porphyry gold polymetallic deposit in northwestern Yunnan, China[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(6): 208-224. (in Chinese with English abstract)

[27] 韩润生, 王明志, 金中国, 等. 黔西北铅锌多金属矿集区成矿构造体系及其控矿机制 [J]. 地质学报, 2020, 94(3): 850-868.
HAN R S, WANG M Z, JIN Z G, et al. Ore-controlling mechanism of NE-trending ore-forming structural system at Zn-Pb polymetallic ore concentration area in northwestern Guizhou[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(3): 850-868. (in Chinese with English abstract)

[28] 孙家骢, 韩润生. 矿田地质力学理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
SUN J C, HAN R S. Theory and method of geomechanics in ore field[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)

[29] 韩润生, 王峰, 胡煜昭, 等. 会泽型(HZT)富锗银铅锌矿床成矿构造动力学研究及年代学约束 [J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(4): 758-771.
HAN R S, WANG F, HU Y Z, et al. Metallogenic tectonic dynamics and chronology constrains on the Huize-type(HZT) germanium-rich silver-zinc-lead deposits[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(4): 758-771. (in Chinese with English abstract)

[30] 刘淑文, 薛春纪, 魏宽义, 等. 南秦岭前寒武纪基底构造运动形式与矿床分布规律研究 [J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 109-113.
LIU S W, XUE C J, WEI K Y, et al. Tectonic movement model of Precambrian basement and distribution of deposits in southern Qinling[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2005, 33(3): 109-113. (in Chinese with English abstract)

[31] WU J B, HAN R S, ZHANG Y, et al. The fault-fold structure ore control mechanism of hydrothermal deposits: A case study of the Maoping super-large rich-Ge lead-zinc deposit in northeastern Yunnan, China[J]. Ore Geology Reviews, 2024, 168: 106039.

[32] 成功, 石增龙, 韩润生, 等. 滇东北毛坪富锗铅锌矿床"多层位"赋矿规律及其控制机理 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2023, 42(1): 167-179.
CHENG G, SHI Z L, HAN R S, et al. The "multi-horizon" ore-hosting regularity and ore-controlling mechanism of the Maoping Ge-rich lead-zinc deposit in the northeastern Yunnan, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2023, 42(1): 167-179. (in Chinese with English abstract)

[33] 吴建标, 韩润生, 周高明, 等. 滇东北毛坪富锗铅锌矿床构造控矿作用及深部找矿方向 [J]. 大地构造与成矿学, 2023, 47(5): 984-1001.
WU J B, HAN R S, ZHOU G M, et al. Structural ore-controlling and deep prospecting direction of the maoping lead-zinc deposit in northeastern Yunnan, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2023, 47(5): 984-1001. (in Chinese with English abstract)

[34] 王磊, 韩润生, 张艳, 等. 滇东北毛坪铅锌矿床矿体空间结构及深部矿体预测 [J]. 矿床地质, 2022, 41(2): 207-224.
WANG L, HAN R S, ZHANG Y, et al. Spatial structure of orebodies and prediction of deep orebodies of Maoping lead-zinc deposit, northeastern Yunnan Province[J]. Mineral Deposits, 2022, 41(2): 207-224. (in Chinese with English abstract)

[35] 赵冻, 韩润生, 任涛, 等. 滇东北乐红大型铅锌矿床流体包裹体地球化学 [J]. 矿床地质, 2018, 37(5): 1018-1036.
ZHAO D, HAN R S, REN T, et al. Characteristics of fluid inclusions geochemistry of Lehong large-sized Pb-Zn ore deposit, northeastern Yunnan Province[J]. Mineral Deposits, 2018, 37(5): 1018-1036. (in Chinese with English abstract)

[36] 翟裕生, 邓军, 彭润民, 等. 成矿系统论 [M]. 北京: 地质出版社, 2011.
ZHAI Y S, DENG J, PENG R M, et al. Metallogenic systems[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011. (in Chinese)

[37] 涂光炽. 构造与地球化学 [J]. 大地构造与成矿学, 1984, 8(1): 1-5.
TU G C. Tectonics and geochemistry[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1984, 8(1): 1-5. (in Chinese with English abstract)

[38] 韩润生. 构造地球化学近十年主要进展 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(2): 198-203.
HAN R S. Main study progress for ten years of tectono-geochemistry[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(2): 198-203. (in Chinese with English abstract)

[39] 吕古贤. 不同构造变形带中"静水压力"的差别 [J]. 中国地质科学院院报, 1993, 14(1): 39-47.
LÜ G X. On the differences of hydrostatic pressure in zones with different deformation properties[J]. Acta Geoscientica Sinica, 1993, 14(1): 39-47. (in Chinese with English abstract)

[40] 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.
LÜ G X. Research on tectonic dynamo-petrogenesis and metallogenesis and tectonophysicochemistry[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 962-980. (in Chinese with English abstract)

[41] 韩润生, 吴鹏, 王峰, 等. 论热液矿床深部大比例尺"四步式"找矿方法: 以川滇黔接壤区毛坪富锗铅锌矿为例 [J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(2): 246-257.
HAN R S, WU P, WANG F, et al. "Four steps type" ore-prospecting method for deeply concealed hydrothermal ore deposits: A case study of the Maoping Zn-Pb-(Ag-Ge) deposit in southwestern China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2019, 43(2): 246-257. (in Chinese with English abstract)

[42] 叶天竺, 吕志成, 庞振山, 等. 勘查区找矿预测理论和方法(总论)[M]. 北京: 地质出版社, 2015.
YE T Z, LÜ Z C, PANG Z S, et al. Theory and methods of prospecting and prediction in exploration areas (general)[M]. Beijing:

Geological Publishing House, 2015.（in Chinese）

[43] 韩润生, 王雷, 方维萱, 等. 初论云南易门地区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.
HAN R S, WANG L, FANG W X, et al. The preliminary discussion on diapir structure-lithofacies zonation model for the Fengshan copper deposit, Yimen area, Yunnan, China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(4): 495-504.（in Chinese with English abstract）

[44] 方维萱, 王寿成, 贾润幸, 等. 大比例尺构造岩相学填图理论创新、技术研发与发展方向 [J]. 矿产勘查, 2021, 12(7): 1488-1518.
FANG W X, WANG S C, JIA R X, et al. Theoretical innovation, technology research and development, and frontiers on large-scale mapping of tectonic lithofacies[J]. Mineral Exploration, 2021, 12(7): 1488-1518.（in Chinese with English abstract）

[45] 韩润生. 隐伏矿定位预测的矿田(床)构造地球化学方法 [J]. 地质通报, 2005, 24(增刊 1): 978-984.
HAN R S. Orefield/deposit tectono-geochemical method for the localization and prognosis of concealed orebodies[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(S1): 978-984.（in Chinese with English abstract）

[46] 孙岩, 徐士进, 刘德良, 等. 断裂构造地球化学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
SUN Y, XU S J, LIU D L, et al. An introduction of tectono-geochemistry in fault zones[M]. Beijing: Science Press, 1998.（in Chinese）

[47] 韩润生, 陈进, 黄智龙, 等. 构造成矿动力学及隐伏矿定位预测: 以云南会泽超大型铅锌(银、锗)矿床为例 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
HAN R S, CHEN J, HUANG Z L, et al. Dynamics of tectonic ore-forming processes and localization-prognosis of concealed orebodies: As exemplified by the Huize super-large Zn-Pb-(Ag-Ge) district, Yunnan[M]. Beijing: Science Press, 2006.（in Chinese）

[48] 韩润生, 陈进, 高德荣, 等. 构造地球化学在隐伏矿定位预测中的应用 [J]. 地质与勘探, 2003, 39(6): 25-28.
HAN R S, CHEN J, GAO D R, et al. Application of tectono-geochemical ore-finding method in orientation prognosis of concealed ores[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(6): 25-28.（in Chinese with English abstract）

[49] 吴鹏, 韩润生, 冉崇英, 等. 云南易门凤山铜矿床“阶梯空当”定位矿体及其构造地球化学异常证据 [J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(4): 879-884.
WU P, HAN R S, RAN C Y, et al. "Stepladder blank" orientation prognosis of ore bodies and tectono-geochemical anomaly evidence in the Fengshan copper deposit, Yimen area, Yunnan[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(4): 879-884.（in Chinese with English abstract）

[50] 刘云祥, 司华陆, 乔海燕, 等. 中国油气重磁勘探技术进步与展望 [J]. 物探与化探, 2023, 47(3): 563-574.
LIU Y X, SI H L, QIAO H Y, et al. Progress and prospect of gravity and magnetic techniques for hydrocarbon exploration in China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 563-574.（in Chinese with English abstract）

[51] 牛兴国, 许志河, 孙丰月, 等. 胶东招平断裂南段山后金矿区深部地球物理特征及找矿效果 [J]. 黄金, 2022, 43(6): 12-16.
NIU X G, XU Z H, SUN F Y, et al. Geophysical characteristics and prospecting effect deep in Shanhou gold district, south part of Zhaoping fault, Jiaodong Peninsula[J]. Gold, 2022, 43(6): 12-16.（in Chinese with English abstract）

[52] 刘鹏飞, 刘天佑, 陈国雄. 南岭花岗岩重力场特征与找矿意义 [J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(1): 1-6.
LIU P F, LIU T Y, CHEN G X. Characteristics of Nanling granite gravity field and significance of prospecting[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(1): 1-6.（in Chinese with English abstract）

[53] 娄德波, 宋国玺, 李楠, 等. 磁法在我国矿产预测中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2008, 23(1): 249-256.
LOU D B, SONG G X, LI N, et al. The application of magnetic method in national mineral prediction[J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(1): 249-256.（in Chinese with English abstract）

[54] 杨磊, 付荣钦, 侯同舟, 等. 高精度磁法在冀东变质岩区某铁矿区勘查中的应用 [J]. 矿产勘查, 2022, 13(12): 1804-1810.
YANG L, FU R Q, HOU T Z, et al. Application of high-precision magnetic method in exploration of an iron deposit in metamorphic rock in eastern Hebei Province[J]. Mineral Exploration, 2022, 13(12): 1804-1810.（in Chinese with English abstract）

[55] 韩润生, 李文尧, 王峰. 一种坑道重力全空间域定位探测高密度隐伏矿体的方法: CN104155699B[P]. 2017-02-22.
HAN R S, LI W Y, WANG F, et al. A method for detecting high-density hidden ore bodies using gravity full space domain positioning in tunnels: CN104155699B[P]. 2017-02-22.（in Chinese）

[56] 顾雪祥, 李葆华, 章永梅, 等. 矿床学研究方法及应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2019.
GU X X, LI B H, ZHANG Y M, et al. Research method and application of mineral deposit science[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2019.（in Chinese）

[57] 李国猛. 川滇黔地区大梁子 MVT 型 Pb-Zn(Cd)矿床成矿机制研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2023.
LI G M. Metallogenic mechanism of the daliangzi MVT Pb-Zn(Cd) deposit in Sichuan-Yunnan-Guizhou metallogenic province, SW China[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2023.（in Chinese with English abstract）

[58] 邓浩铭, 唐永永, 叶霖, 等. 黔东南丹寨地区热液脉型铅锌矿床成矿流体性质及来源 [J]. 矿物学报, 2025, 45(1): 39-54.
DENG H M, TANG Y Y, YE L, et al. Properties and origins of the ore-forming fluids of hydrothermal vein-type Pb-Zn deposits in the Danzhai area in the southeastern Guizhou, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2025, 45(1): 39-54.（in Chinese with English abstract）

[59] 倪培, 范宏瑞, 潘君屹, 等. 流体包裹体研究进展与展望(2011-2020)[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(4): 802-818.
NI P, FAN H R, PAN J Y, et al. Progress and prospect of fluid inclusion research in the past decade in China (2011-2020)[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(4): 802-818.（in Chinese with English abstract）

[60] 严子清, 石文杰, 张鹏涛, 等. 胶东大尹格庄金矿成矿流体时空演化及矿床成因: 来自流体包裹体、成矿元素和 H-O-S-Pb 同位素

证据 [J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 156-174.
YAN Z Q, SHI W J, ZHANG P T, et al. Ore genesis and vertical variations of ore-forming fluids in the Dayingezhuang gold deposit, Jiaodong Peninsula: Constraints from fluid inclusions, ore forming elements, and H-O-S-Pb isotopes[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 156-174. (in Chinese with English abstract)

[61] 李晓东, 张艳, 韩润生, 等. 流体包裹体研究进展及其在矿床学中的应用 [J]. 地质论评, 2022, 68(6): 2305-2318.
LI X D, ZHANG Y, HAN R S, et al. Research progress of fluid inclusions and its application in ore deposit[J]. Geological Review, 2022, 68(6): 2305-2318. (in Chinese with English abstract)

[62] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
ZHENG Y F, CHEN J F. Isotopic geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)

[63] NI P, PAN J Y, WANG G G, et al. A CO_2-rich porphyry ore-forming fluid system constrained from a combined cathodoluminescence imaging and fluid inclusion studies of quartz veins from the Tongcun Mo deposit, South China[J]. Ore Geology Reviews, 2017, 81: 856-870.

[64] 王静, 张达玉, 张飞, 等. 江南钨矿带东段长岭尖钨多金属矿床成矿年代、成矿流体特征及成因分析 [J/OL]. 地质论评: 1-20[2024-11-25]. https: //link. cnki. net/doi/10.16509/j. georeview. 2024.10.055.
WANG J, ZHANG D Y, ZHANG F, et al. Metallogenic age, ore-forming fluid characteristics and genesis analysis of Changlingjian tungsten polymetallic deposit in the east of Jiangnan tungsten belt[J/OL]. Geological Review: 1-20[2024-11-25]. https: //link.cnki.net/doi/10.16509/j.georeview.2024.10.055.

[65] CAMPBELL A R, HACKBARTH C J, PLUMLEE G S, et al. Internal features of ore minerals seen with the infrared microscope[J]. Economic Geology, 1984, 79(6): 1387-1392.

[66] NI P, ZHU X, WANG R C, et al. Constraining ultrahigh-pressure (UHP) metamorphism and titanium ore formation from an infrared microthermometric study of fluid inclusions in rutile from Donghai UHP eclogites, eastern China[J]. 2008, 120(9/10): 1296-1304.

[67] WEI W F, HU R Z, BI X W, et al. Infrared microthermometric and stable isotopic study of fluid inclusions in wolframite at the Xihuashan tungsten deposit, Jiangxi Province, China[J]. Mineralium Deposita, 2012, 47(6): 589-605.

[68] 韩润生, 李波, 倪培, 等. 闪锌矿流体包裹体显微红外测温及其矿床成因意义: 以云南会泽超大型富锗银铅锌矿床为例 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 91-104.
HAN R S, LI B, NI P, et al. Infrared micro-thermometry of fluid inclusions in sphalerite and geological significance of Huize super-large Zn-Pb-(Ge-Ag) deposit, Yunnan Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(1): 91-104. (in Chinese with English abstract)

[69] 陈应华, 蓝廷广, 唐燕文, 等. 闪锌矿中单个流体包裹体成分 LA-ICP-MS 分析及其指示意义: 以南岭新田岭钨矿床为例 [J]. 矿床地质, 2023, 42(5): 859-876.
CHEN Y H, LAN T G, TANG Y W, et al. LA-ICP-MS analysis of single fluid inclusions in sphalerite and its implications: A case study from Xintianling tungsten deposit in Nanling region, South China[J]. Mineral Deposits, 2023, 42(5): 859-876. (in Chinese with English abstract)

[70] 李建威, 赵新福, 邓晓东, 等. 新中国成立以来中国矿床学研究若干重要进展 [J]. 中国科学(地球科学), 2019, 49(11): 1720-1771.
LI J W, ZHAO X F, DENG X D, et al. An overview of the advance on the study of China's ore deposits during the last seventy years (in Chinese)[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2019, 49(11): 1720-1771. (in Chinese with English abstract)

[71] ZHU C W, WANG J, ZHANG J W, et al. Isotope geochemistry of Zn, Pb and S in the Ediacaran strata hosted Zn-Pb deposits in Southwest China[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 117: 103274.

[72] LUO Z Y, LI H, GHADERI M, et al. A review of W and Sn isotopes and insights into their emerging applications in ore deposit geology[J]. International Geology Review, 2025, 67(3): 381-404.

[73] WU J H, LI H, MATHUR R, et al. Compositional variation and Sn isotope fractionation of cassiterite during magmatic-hydrothermal processes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2023, 613: 118186.

[74] 岳素伟, 林振文, 邓小华, 等. 陕西省煎茶岭金矿 C、H、O、S、Pb 同位素地球化学示踪 [J]. 大地构造与成矿学, 2013, 37(4): 653-670.
YUE S W, LIN Z W, DENG X H, et al. C, H, O, S, Pb isotopic geochemistry of the Jianchaling gold deposit, Shaanxi Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(4): 653-670. (in Chinese with English abstract)

[75] ZHANG Y, HAN R S, LEI W, et al. Zn-S isotopic fractionation effect during the evolution process of ore-forming fluids: A case study of the ultra-large Huize rich Ge-bearing Pb-Zn deposit[J]. Applied Geochemistry, 2022, 140: 105240.

[76] 陈伟林, 肖凡. 成矿动力学数值计算模拟研究进展: 理论、方法与技术 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(3): 234-249.
CHEN W L, XIAO F. Advances in numerical modeling of metallogenic dynamics: A review of theories, methods and technologies[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(3): 234-249. (in Chinese with English abstract)

[77] 肖凡, 陈信宇. 基于数值模拟与勘查数据协同驱动的矿产定量预测: 以凡口铅锌矿为例 [J/OL]. 大地构造与成矿学: 1-23[2024-07-29]. https: //link. cnki. net/doi/10.16539/j. ddgzyckx. 2024.01. 123.
XIAO F, CHEN X Y. Numerical modeling and exploration data coupled driven mineral prospectivity mapping: A case study from Fankou Pb-Zn deposit[J/OL]. Geotectonica et Metallogenia: 1-23 [2024-07-29]. https: //link.cnki.net/doi/10.16539/j.ddgzyckx.2024.01.123. (in Chinese with English abstract)

[78] 周永章, 黎培兴, 王树功, 等. 矿床大数据及智能矿床模型研究背景与进展 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(2): 327-331.
ZHOU Y Z, LI P X, WANG S G, et al. Research progress on big data and intelligent modelling of mineral deposits[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(2): 327-331. (in Chinese with English abstract)

[79] 谢玉芝, 汪洋. 机器学习在岩矿地球化学研究中的应用: 综述与

思考 [J]. 地质论评, 2023, 69(4): 1465-1474.
XIE Y Z, WANG Y. A review on the machine learning approach to rock and mineral geochemistry research[J]. Geological Review, 2023, 69(4): 1465-1474. (in Chinese with English abstract)

[80] 邓依, 张静, 钟日晨, 等. 基于机器学习的主成分分析方法在金矿类型判别中的应用: 以黄铁矿元素地球化学特征为例 [J]. 岩石学报, 2024, 40(6): 1801-1816.
DENG Y, ZHANG J, ZHONG R C, et al. Application of principal component analysis method based on machine learning to gold deposit type discrimination: A case study of the geochemical characteristics of pyrite[J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(6): 1801-1816. (in Chinese with English abstract)

[81] NEUZIL C E. Hydromechanical coupling in geologic processes[J]. Hydrogeology Journal, 2003, 11(1): 41-83.

[82] RUTQVIST J, STEPHANSSON O. The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering[J]. Hydrogeology Journal, 2003, 11(1): 7-40.

[83] WINTSCH R P, CHRISTOFFERSEN R, KRONENBERG A K. Fluid-rock reaction weakening of fault zones[J]. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 1995, 100(B7): 13021-13032.

[84] TOBIN H, VANNUCCHI P, MESCHEDE M. Structure, inferred mechanical properties, and implications for fluid transport in the décollement zone, Costa Rica convergent margin[J]. Geology, 2001, 29(10): 907-910.

[85] WAWRZYNIEC T, SELVERSTONE J, AXEN G J. Correlations between fluid composition and deep-seated structural style in the footwall of the Simplon low-angle normal fault, Switzerland[J]. Geology, 1999, 27(8): 715-718.

[86] LIU W H, SPINKS S C, GLENN M, et al. How carbonate dissolution facilitates sediment-hosted Zn-Pb mineralization[J]. Geology, 2021, 49(11): 1363-1368.

[87] SAUSSE J, JACQUOT E, FRITZ B, et al. Evolution of crack permeability during fluid-rock interaction: Example of the Brézouard granite (Vosges, France)[J]. Tectonophysics, 2001, 336(1/2/3/4): 199-214.

[88] 熊义辉. 构造−流体−成矿系统自组织临界性模拟研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2019.
XIONG Y H. Studying of the self-organized criticality of tectonic-fluid-mineralization[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2019. (in Chinese with English abstract)

[89] 陈衍景, 张静, 张复新, 等. 西秦岭地区卡林: 类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式 [J]. 地质论评, 2004, 50(2): 134-152.
CHEN Y J, ZHANG J, ZHANG F X, et al. Carlin and carlin-like gold deposits in western Qinling Mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model[J]. Geological Review, 2004, 50(2): 134-152. (in Chinese with English abstract)

[90] 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等. 成矿作用动力学 [M]. 北京: 地质出版社, 1998.
YU C W, CENG K, BAO Z Y, et al. Dynamics of ore-forming processes[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. (in Chinese)

[91] 邓军, 孙忠实, 杨立强, 等. 吉林夹皮沟金矿带构造地球化学特征分析 [J]. 高校地质学报, 2000, 6(3): 405-411.
DENG J, SUN Z S, YANG L Q, et al. Tectono-geochemical analysis of Jiapigou gold belt, Jilin Province[J]. Geological Journal of China Universitiesf, 2000, 6(3): 405-411. (in Chinese with English abstract)

[92] 宋丹辉, 韩润生, 王明志, 等. 黔西北青山铅锌矿床主要控矿断裂构造岩−岩相分带模式 [J]. 地质力学学报, 2020, 26(3): 376-390.
SONG D H, HAN R S, WANG M Z, et al. Model of tectonite-lithofacies zoning in ore-controlling faults of the Qingshan lead-zinc deposit in northwestern Guizhou[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(3): 376-390. (in Chinese with English abstract)

[93] 李波. 滇东北地区会泽、松梁铅锌矿床流体地球化学与构造地球化学研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
LI B. The study of fluid inclusions geochemistry and tectonic geochemistry of lead-zinc deposits: Taking Huize and Songliang lead-zinc deposits for examples, in the northeast of Yunnan Province, China[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)

[94] 万新, 韩润生, 李波, 等. 黔西北乐开铅锌矿床构造地球化学研究及深部找矿预测 [J]. 中国地质, 2022, 49(6): 1875-1892.
WAN X, HAN R S, LI B, et al. Tectono-geochemistry and deep prospecting prediction in the Lekai lead-zinc deposit, northwestern Guizhou Province, China[J]. Geology in China, 2022, 49(6): 1875-1892. (in Chinese with English abstract)

[95] 董树文, 马立成, 刘刚, 等. 论长江中下游成矿动力学 [J]. 地质学报, 2011, 85(5): 612-625.
DONG S W, MA L C, LIU G, et al. On dynamics of the metallogenic belt of middle-lower reaches of Yangtze River, eastern China[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(5): 612-625. (in Chinese with English abstract)

Summary for“成矿‘末端效应’研究进展”

Research progress on the "end effect" of ore formation

LI Lingjie[1,2], HAN Runsheng[1,2*], ZHANG Yan[1,2], CHEN Qing[3], WU Jianbiao[1,2], FENG Zhixing[4]

1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Southwest Institute of Geological Survey, Geological Survey Center for Non-ferrous Metals Resources, Kunming 650093, China;
3. Yunnan Chihong Zn & Ge Co., Ltd., Qujing Yunnan 654211, China;
4. Sichuan Huidong Daliang Mining Co., Ltd., Liangshan Yi Autonomous Prefecture Sichuan 615205, China

First author, E-mail: 475647746@qq.com

* Corresponding author, E-mail: 554670042@qq.com

Abstract: [**Objective/Significance**] The "end effect" of ore formation, a crucial topic in deposit geology and field geomechanics, has increasingly drawn attention from researchers and scholars. [**Analysis/Discussion/Progress**] The study of the "end effect" in ore formation primarily includes two aspects: The "end effect" of ore-forming structures and the "end effect" of ore-forming fluids. For ore-forming structures, research focuses on the multi-scale "end effect" of ore-controlling structures in different tectonic settings, and their roles in controlling ore fields and ore deposits. This includes studying the structural types, mechanical properties, and rock- and ore-controlling mechanisms at the "ends" of deposit-level ore-controlling structures, the trapping effect of ore-forming fluids, and the location mechanism of ore deposits. These aspects are examined through structural geomechanical analysis of ore fields, combined with structural alteration lithofacies mapping and geophysical probing techniques. For ore-forming fluids, the characteristics can be explored through fluid inclusion studies and isotope/trace element geochemistry. The temporal and spatial evolution of the "end" of ore-forming fluids is studied by the zoning effect, helping reveal how the physicochemical conditions of structures limit the ore-forming process. [**Conclusion/Prospect**] By investigating the coupling relationship between the "ends" of ore-forming structures and ore-forming fluids, a comprehensive study of the rock and ore-controlling mechanisms under the "end effect" can be conducted. This, combined with fluid geochemistry, structural analysis of ore fields, and geophysical prospecting techniques, will provide a solid foundation for deep ore prospecting predictions.

Key words: research progress; structural graded ore-controlling rule; "end effect" of ore-forming structure; "end effect" of ore forming fluld; ore deposit; ore field tectonics

Received: 2024-07-11; Revised: 2024-12-28; Accepted: 2025-01-02

doi: 10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240387