

doi: 10.13745/j.esf.2015.04.016

安徽兆吉口热液型铅锌矿区元素迁移量三维地球化学勘查模式

刘艳鹏^{1,2}, 马生明², 朱立新^{1,*}, 曹达旺³, 乐成生³

1. 中国地质科学院, 北京 100037
2. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000
3. 安徽省核工业勘查技术总院, 安徽 芜湖 241005

LIU Yanpeng^{1,2}, MA Shengming², ZHU Lixin^{1,*}, CAO Dawang³, LE Chengsheng³

1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China
3. Anhui Nuclear Exploration Technology Central Institute, Wuhu 241005, China

LIU Yanpeng, MA Shengming, ZHU Lixin, et al. A 3D geochemical prospecting model for elemental mass transfer in Zhaojikou epithermal Pb-Zn deposit, Anhui Province. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(4): 141-151

Abstract: Zhaojikou Pb-Zn deposit is located in Dongzhi County, Anhui Province, the southern area of Anqing-Guichi metallogenic district in the lower and middle Yangtze River Region. The finding of the deposit was a breakthrough in mineral exploration in the southwest Anhui. This paper applied the Isocon diagram to the study of the distribution characteristics of mobile elements, so as to lay the foundation for finding out geochemical exploration indicators and ore-forming environment indexes; we found that Pb, Zn, Cu, Au, Ag, Mo, As, Bi, Sb and S were enriched increasingly from outer wall-rock towards ore body, that SiO₂, Fe₂O₃, MgO, CaO, Na₂O and K₂O were depleted in Qingbaikou system but enriched in the ore body. The mass of controlled deposit system had gained with an average change of abt. 4%, and Qingbaikou System had lost abt. 18%. We tried to make the 3D geochemical maps of elemental mass transfer, which showed that the further prospecting programs should be carried out towards the NE and SW directions. Combined with the geological data, the migration of elements is explained, and the genesis of the deposit is discussed; it is concluded that Zhaojikou Pb-Zn deposit was formed by regional metamorphism, tectonic movement and fluids activities. The studied deposit is only a part of the metallogenic series formed by regional metamorphism, tectonic movement and fluids activities, and the studied area has good potential prospect.

Key words: Zhaojikou; Pb-Zn deposit; element mobility; Isocon Diagram; 3D geochemical exploration; lower and middle of the Yangtze River Region

摘 要:安徽兆吉口铅锌矿床位于长江中下游成矿带安庆—贵池矿集区南侧的东至县杨老尖—龙门尖地区,这一矿床的发现使皖西南地区地质找矿实现重大突破。文中利用 Grant 的 Isocon 图解法,研究活动元素的分布特征和迁移规律,以奠定兆吉口地区的地球化学勘查指标及成矿环境指标的研制基础,发现成矿元素 Pb、Zn、Cu、Au、Ag、Mo 及其伴生元素 As、Bi、Sb 和矿化剂元素 S 等从围岩向矿体部位带入程度增加,常量元素 SiO₂、Fe₂O₃、MgO、CaO、Na₂O、K₂O 等在青白口系带出,于矿体部位带入。矿床系统的质量是净带入的,平均质量变化为 4%;青白口系质量是净带出的,质量变化为-18%。依据元素迁移规律,试制元素迁移量三维地球化学图,认为研究区进一步找矿工作应当沿断裂带向北东和南西方向拓展,结合已有地

收稿日期:2014-11-02;修回日期:2015-01-22

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAB05B00);国土资源部公益性行业专项(201111008)

作者简介:刘艳鹏(1990—),男,博士研究生,地球化学专业。E-mail:liu_ypeng@163.com

* 通讯作者简介:朱立新(1963—),男,博士,研究员,主要从事矿产勘查地球化学方法技术研究。E-mail:msmigge@163.com

质资料,对元素迁移进行了解释,并对矿床成因进行了讨论,认为试验矿床是由区域变质-构造运动-热液作用形成的,试验矿床只是区域变质-构造运动-热液活动共同形成的矿床(系列)的一部分,研究区具有良好的找矿前景。

关键词: 兆吉口;铅锌矿床;迁移规律;Isocon法;三维地球化学勘查;长江中下游

中图分类号: P595 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2015)04-0141-11

长江中下游成矿带是中国最主要的铜铁金多金属成矿带之一,位于扬子板块北缘的长江断裂带内。自晋宁期以来,长期的构造作用、岩浆活动和成矿作用形成了以与燕山期岩浆作用和演化有关的夕卡岩型、斑岩型和热液型矿床为主的内生铜、铁、金、铅、锌成矿系列^[1]。2006年,安徽省核工业勘查技术总院利用地表氧化带中的次生铅锌矿和硫化物作为找矿标识,在位于长江中下游成矿带安庆—贵池矿集区南侧的东至县发现了兆吉口铅锌矿床^①。该矿床的发现被认为是皖西南地区地质找矿的重大突破,目前处于勘探阶段,相关地质研究程度较低,矿床地球化学特征有待查明。

传统上,勘查地球化学中的勘查指标一直是通过元素浓度高低变化的感性认知提出的,并不是基于对元素迁移规律的全面认知,这就导致了以往的地球化学勘查指标局限于成矿元素及其伴生元素如 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、Hg、As 和 Sb 等,未能提供全面的成矿环境、成矿机理等方面的地球化学信息。随着找矿目标从浅表转向深部,在总体找矿思路,已经从由已知到未知的模式对比,转向对成矿系统深部空间的研究^[2]。系统由许多具有一定功能的要素所组成^[3],对成矿系统而言,元素是其最基本的组成要素,因此开展相应地球化学研究需要全面认识成矿系统中元素的地球化学活动性,总结其迁移规律,以此来指导深部找矿。有研究者认为元素的富集贫化是矿床成矿过程中的普遍现象^[4],并在斑岩型、矽卡岩型等矿床中得到支持^[5-7]。从根本上讲,元素富集贫化是成矿过程中元素迁移特征的宏观表现,而且构成有规律的异常结构模式^[6,8],可以为优选找矿靶区和识别分散矿化提供更加充实的信息^[9-11]。然而,自然界的绝大多数地质过程都是在相对开放的体系中发生的^[12],开放体系如果有显著的质量和体积变化,就不能通过直接比较地质作用发生前后岩石的元素含量来认识其化学组成的变化,否则将不能真实地反映体系开放过程中组分的迁移情况,而 Grant 方程很好地解决了这一问题。

本文选择安徽东至兆吉口铅锌矿床为试验矿床,利用 Grant 方程研究典型剖面及 0 m 水平断面

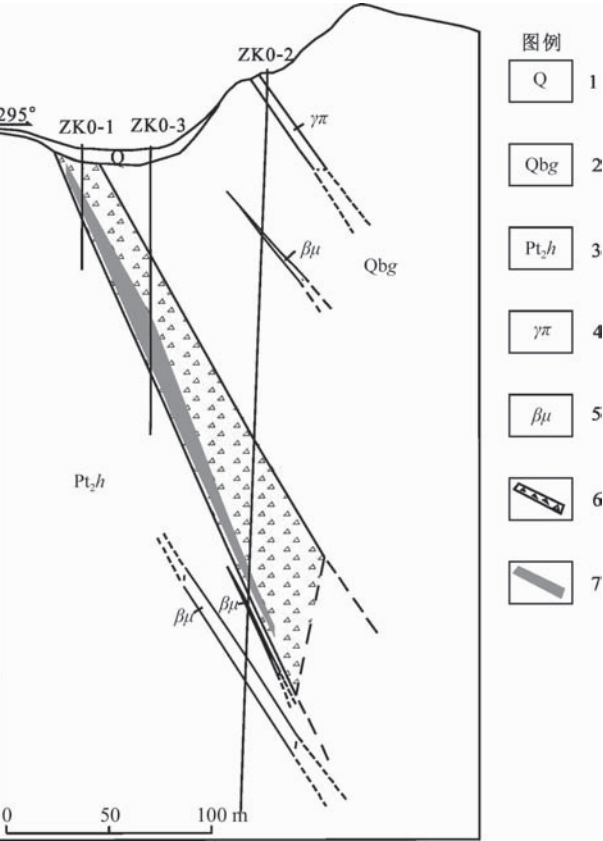
上的系统质量变化和/或元素的迁移规律,试研制元素迁移量三维地球化学勘查图,在此基础上结合已有地质资料,论述元素迁移的原因并据此初步探讨了矿床成矿过程,以期为该地区进一步找矿及研究提供帮助。

1 研究区地质概况

试验矿床处于扬子板块下扬子台坳和江南台隆的过渡部位,位于下扬子台坳石台穹褶断束南西部。区内主要构造方向为 NNE 向,各时代地层均发生了不同程度的褶皱,其中以印支期最为强烈。兆吉村倒转背斜、雷公尖向斜、官港倒转背斜属障公山复背斜西部的次级褶皱构造。断裂构造十分发育,规模较大的断裂构造有东至断裂、龙门尖断裂和许村断裂。

试验矿床位于东至县城 SW200°方向 18 km 处的杨老尖—龙门尖地区。矿床主要产于东至断裂的次级构造中,东至断裂中也有产出,但矿体数量少,平均品位低。矿体呈脉状、透镜状赋存于东至断裂及其南北向的张性次级裂隙破碎带中(图 1)。矿体与两盘的界线清晰,围岩蚀变不发育,据此认为其成矿方式为充填作用。上盘主要为新元古代青白口系历口群葛公镇组(Qbg)地层,下盘主要为中元古代蓟县系溪口群环沙组(Pt₂h)地层,地表为新生代第四系下蜀组(Qpx)覆盖。矿区地层岩性主要为变粉砂岩、变细砂岩和变粉砂质泥岩,具低绿片岩相浅变质特征。破碎带主要有碎裂岩(断层泥)、硅化构造角砾岩、硅化碎裂岩等构造岩(图 2)。矿区正北方向出露面积约 1.5 km² 花岗闪长斑岩,呈近东西向长条状展布。岩脉出露较多,主要以石英闪长玢岩、花岗斑岩、石英闪长斑岩、闪长玢岩、辉绿玢岩和闪斜煌斑岩等中酸性岩脉为主。脉体围岩蚀变主要为高岭土化、绿泥石化、绢云母化,其中辉绿玢岩脉见明显的黄铁矿化蚀变。

① 乐成生. 安徽省东至县兆吉口铅锌矿普查报告. 芜湖:安徽省核工业勘查技术总院,2011.



1—第四系;2—青白口系历口群葛公镇组;3—蓟县系溪口岩群环沙组;4—花岗斑岩;5—辉绿玢岩;6—破碎带;7—矿体。

图2 安徽省兆吉口研究区1线剖面图

Fig.2 Cross-section 1 for Zhaojikou area, Anhui Province

Grant 以此为基础,假设热液活动中存在两个或以上的不活动元素,提出 Isocon 图解法^[14]。

影响矿化蚀变过程中元素质量平衡计算的关键因素有两个:一为不活动元素选择正确与否;二为原岩及其中元素含量的确定。Isocon 图解法在处理大量地球化学开放系统中岩石的质量变化和/或体积变化问题中取得了较好的实际应用效果,且具有简便和直观的特点。因此,本文选择 Isocon 图解法确定不活动元素。试验矿床破碎带中经过构造挤压形成的构造岩的原岩应与矿体上、下两盘岩性一致。矿体上、下两盘岩性简单,均为变粉砂岩、变细砂岩和变粉砂质泥岩,虽然围岩蚀变不发育,但在成矿过程中受到热液作用的影响,其含量已不能代表未受热液影响的原岩含量。基于这种情况,文中采用中国东部砂岩的平均化学组成作为相应元素的原岩含量进行相关计算^[15]。

2.2.1 Grant 方程

Gresens 在考虑岩石成分和体积的关系之后,提

出了体积因子的概念,并导出了 Gresens 方程^[14]。Grant 在 Gresens 方程的基础上,提出了一个更加简便和直观的质量平衡图解分析方法,称为 Isocon 图解法(或等浓度线法),并在世界上得到了广泛应用^[14,16]。

Grant 在 Gresens 方程的基础上,假设热液蚀变过程中存在两种或以上不活动组分,推导出了如下公式:

$$C_i^A = (M^0/M^A)(C_i^O + \Delta C_i^{O-A}) \tag{1}$$

进行相应推导,可得:

$$\mu = (C_j^O/C_j^A - 1) \times 100\% \tag{2}$$

$$\Delta C_i^{O-A} = (C_j^O/C_j^A)C_i^A - C_i^O \tag{3}$$

$$\mu_i = \Delta C_i^{O-A}/C_i^O = [(C_j^O/C_j^A)(C_i^A/C_i^O) - 1] \times 100\% \tag{4}$$

其中,j 为不活动元素,i 为活动元素,j≠i;M⁰、M^A分别为系统发生蚀变前后的总质量;C_i^A、C_i^O分别为蚀变岩和原岩中元素 i 的含量。ΔC_i^{O-A}为元素 i 的迁移量。μ 为系统质量净变化率,用来衡量系统质量的净变化程度。μ_i为元素 i 的质量变化率,用来衡量元素 i 在地质体系开放过程中的迁移程度。

2.2.2 不活动组分别识

热液蚀变过程中不活动组分的存在是 Isocon 图解法进行元素质量平衡计算的前提假设。大量研究表明,在大多数热液蚀变过程中,Al₂O₃、P、REE 和高场强元素常是“不活动组分”,尤其是 Al₂O₃ 和 Ti 组分^[17-20]。本文选择 Ta、Nb、U、Eu、La、Zr、Hf、Al₂O₃、Th、Sc、Ti、Yb 和 Y 作为备选元素,根据 C^O-C^A 平面图结果和相关性分析,选择 Al₂O₃ 作为本项研究中的不活动元素,进行相关计算及论述。

2.3 元素质量迁移规律研究方法

依据试验剖面上地质特征,首先将 1 号勘探线剖面上所涉及的地质体分成青白口系地层、破碎带、矿体和蓟县系地层(试验钻孔控制部分,下同)等 4 个地质单元(图 2),之后,利用 Grant 方程对整个试验剖面所涉及的成矿系统及不同地质单元的系统质量变化、元素质量变化率和迁移量进行计算,根据 4 个地质单元中元素迁移量和质量变化率特征,探讨元素的迁移规律。

3 各地质单元的系统质量变化及元素迁移规律

3.1 系统质量变化

将试验剖面上出现的青白口系地层、破碎带、矿

体及蓟县系地层等地质体作为统一的成矿系统, 利用试验钻孔中样品分析测试数据, 运用 $\mu = (C_j^O / C_j^A - 1) \times 100\%$, 计算出每个采样点控制范围内元素的质量变化率, 然后采用算术平均的方式计算试验剖面上成矿系统及各地质单元内元素质量变化率的平均值。结果显示, 试验剖面上成矿系统的质量变化率为 4%, 各地质单元的质量变化率依次为: 青白口系地层 -18%、破碎带 14%、矿体 23%、蓟县系地层 8%。

试验剖面上成矿系统的平均质量变化率为 4%, 大于零, 表示在试验钻孔所控制的成矿系统中, 在成矿过程中元素质量是净带入的。成矿系统的这一质量变化特点, 是由各地质单元质量变化所决定的。青白口系地层质量变化率为 -18%, 表示青白口系地层元素质量是净带出的; 破碎带、矿体和蓟县系地层等地质单元的质量变化率分别为 14%、23% 和 8%, 均大于零, 表明试验控制的这几个地质单元内元素质量是净带入的, 由此决定了试验剖面上成矿系统的质量变化特点。

系统的质量变化是由元素的带入、带出决定的, 是元素带入、带出的总体反映。试验结果表明, 在试验剖面上及各个地质单元中, 系统质量都发生了变化, 表明各地质单元中元素均发生了一定规模的迁移。对元素质量迁移规律进行系统研究, 可以为揭示地质作用过程中元素的活动性特征、探讨成矿作用机制提供信息, 同时也可以指导成矿预测及找矿。

3.2 元素迁移规律

文中对元素迁移规律的探讨, 利用了元素质量迁移率(μ_i)和元素迁移量(ΔC_i^{O-A})两个参数。元素质量迁移率(μ_i)是衡量元素 i 在地质系统开放过程中迁移程度的参量, 能灵敏地反映原岩中含量极低元素的迁移行为。元素迁移量(ΔC_i^{O-A})是一个绝对量, 能定量直观展现元素在单位质量(文中设定为 1T)地质系统开放过程中元素迁移量的多少。通常情况下, μ_i 和 ΔC_i^{O-A} 显示相似的元素迁移规律性。文中首先依据 μ_i 值判别元素是否发生迁移, 此后利用 ΔC_i^{O-A} 值定量衡量元素迁移的量及其对成矿的贡献。根据以往经验, 设定当 $\mu_i > 10\%$ 时, 认为元素 i 发生了迁移。为了便于总结规律, 将此次研究中的 62 个元素分为常量元素、亲铜元素、钨钼族元素、亲铜分散元素、亲石分散元素、矿化剂和卤族元素、亲铁元素、稀土元素和稀有元素等 9 类^[21-22], 分类探讨元素的迁移规律。

常量元素 SiO_2 在赋矿部位即破碎带、矿体两个地质单元内发生带入, 在青白口系地层和蓟县系地层中带出, 青白口系地层中的带出程度大于蓟县系地层。 Fe^{3+} 在 4 个地质单元中均发生带出, 青白口系地层和蓟县系地层中的带出程度大于赋矿部位。 TFe_2O_3 、 Fe^{2+} 在 4 个地质单元中均带入, 赋矿部位带入程度大于青白口系地层和蓟县系地层。 MgO 在赋矿部位发生带出, 在青白口系地层和蓟县系地层中基本保持不变。 CaO 仅在青白口系地层带出, 带入程度按破碎带—矿体—蓟县系地层依次加强。 Na_2O 仅在矿体部位发生带入, 在其他地质单元中带出, 在破碎带中带出程度最强。 K_2O 在赋矿部位未发生明显变化, 在上、下两盘地层中带出。

亲铜元素 Pb 、 Zn 、 Cu 、 Au 、 As 、 Bi 和 Sb 等成矿元素及其伴生元素在 4 个地质单元中均表现为带入, 但带入程度显著不同。与大多数亲铜元素不同, Ag 在青白口系地层发生带出, 其他地质单元中带入; Hg 在蓟县系地层带出, 在其他地质单元中带入。亲铜元素总体带入程度由青白口系地层—蓟县系地层—破碎带—矿体依次加强, 也就是由矿体向上、下两盘地层中带入程度减弱。

钨钼族元素 Mo 在青白口系地层中发生带出, 在其他地质单元中带入, 带入程度由青白口系地层—蓟县系地层—破碎带—矿体依次加强。

亲铜分散元素 Cd 在矿体上、下两盘带出, 赋矿部位带入。 Ga 仅在青白口系地层中发生带入, 在其他地质单元中基本没有发生质量变化。 In 在 4 个地质单元中均发生带入, 带入程度由青白口系地层—蓟县系地层—破碎带—矿体依次加强。 Tl 在 4 个地质单元中均带出, 带出程度由青白口系地层—矿体—破碎带—蓟县系地层依次加强。 Ge 在矿体上、下两盘基本没有表现出活动性, 在赋矿部位带入。 Se 在青白口系地层发生带出, 在其他地质单元中带入。

亲石分散元素 Ba 在四个地质单元中均带出。 Cs 在蓟县系地层中发生微弱带出, 在矿体部位没有发生明显质量变化, 在青白口系地层和破碎带中带入。 Rb 在蓟县系地层中发生微弱带出, 在青白口系地层中基本不变, 在赋矿部位中带入。 Sr 在青白口系地层中带出, 在其他地质单元中带入。

矿化剂和卤族元素 S 、 F 在青白口系地层中发生带出, 在其他地质单元中带入, 带入程度从蓟县系地层—破碎带—矿体依次加强。 Cl 在 4 个地质单元中均发生带出, 带出程度从青白口系地层—蓟县

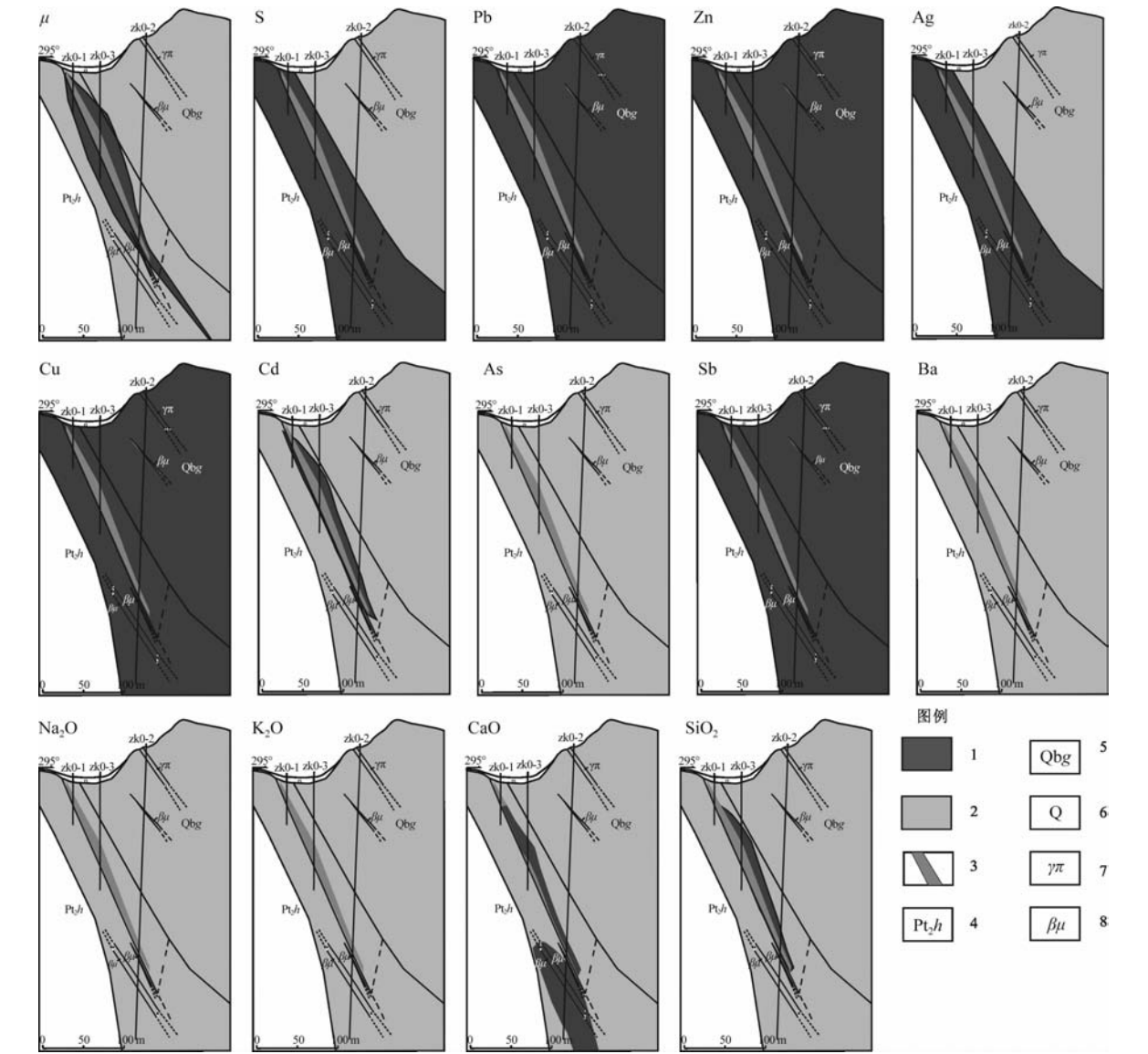
系地层—破碎带—矿体依次减弱。

亲铁元素 Mn、Cr、Sc、V、Ni、Co 在 4 个地质单元中均发生带入,带入程度呈现出由青白口系地层—蓟县系地层—破碎带—矿体依次加强的总趋势。Mn 在破碎带带入程度最高,青白口系地层最低。Ti 基本没有发生明显的质量变化。

稀土元素在青白口系地层中总体带出,轻稀土元素在 4 个地质单元中均发生带出,重稀土元素在青白口系地层中带出,表现出整体弱活动性。

稀有元素 Hf、Nb、Ta、Th、U 在 4 个地质单元中带出,青白口系地层带出程度小于其他地质单元。Li、Zr 在 4 个地质单元内带入,Zr 整体上带入程度一样,Li 在青白口系地层、破碎带和矿体等地质单元带入程度较大。P 在青白口系地层中发生带出,在赋矿部位质量变化不明显,在蓟县系地层中明显带入。Be 在青白口系地层中发生带出,在其他地质单元中基本不变。Te 在矿体部位带入,在其他地质单元中活动性不明显。

综上所述,从总体上讲,常量元素 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 等在青白口系地层中带出,矿体部位带入, TFe_2O_3 、 FeO 在整个研究区内发生带入。亲铜元素 Cu、Au、Ag、Pb、Zn、As、Bi、Sb、钨钼族元素 Mo 和矿化剂元素 S 等从围岩向矿体部位带入程度增加;亲石元素 Ba、Be、Sr、Nb、P 等在青白



1—元素带入区;2—元素带出区;3—矿体;4—蓟县系溪口岩群环沙组;5—青白口系历口群葛公镇组;6—第四系;7—花岗岩;8—辉绿玢岩。

图 3 安徽省兆吉口研究区 1 线剖面迁移量图

Fig. 3 Mass transfer diagrams of cross-section 1 for Zhaojikou area, Anhui Province

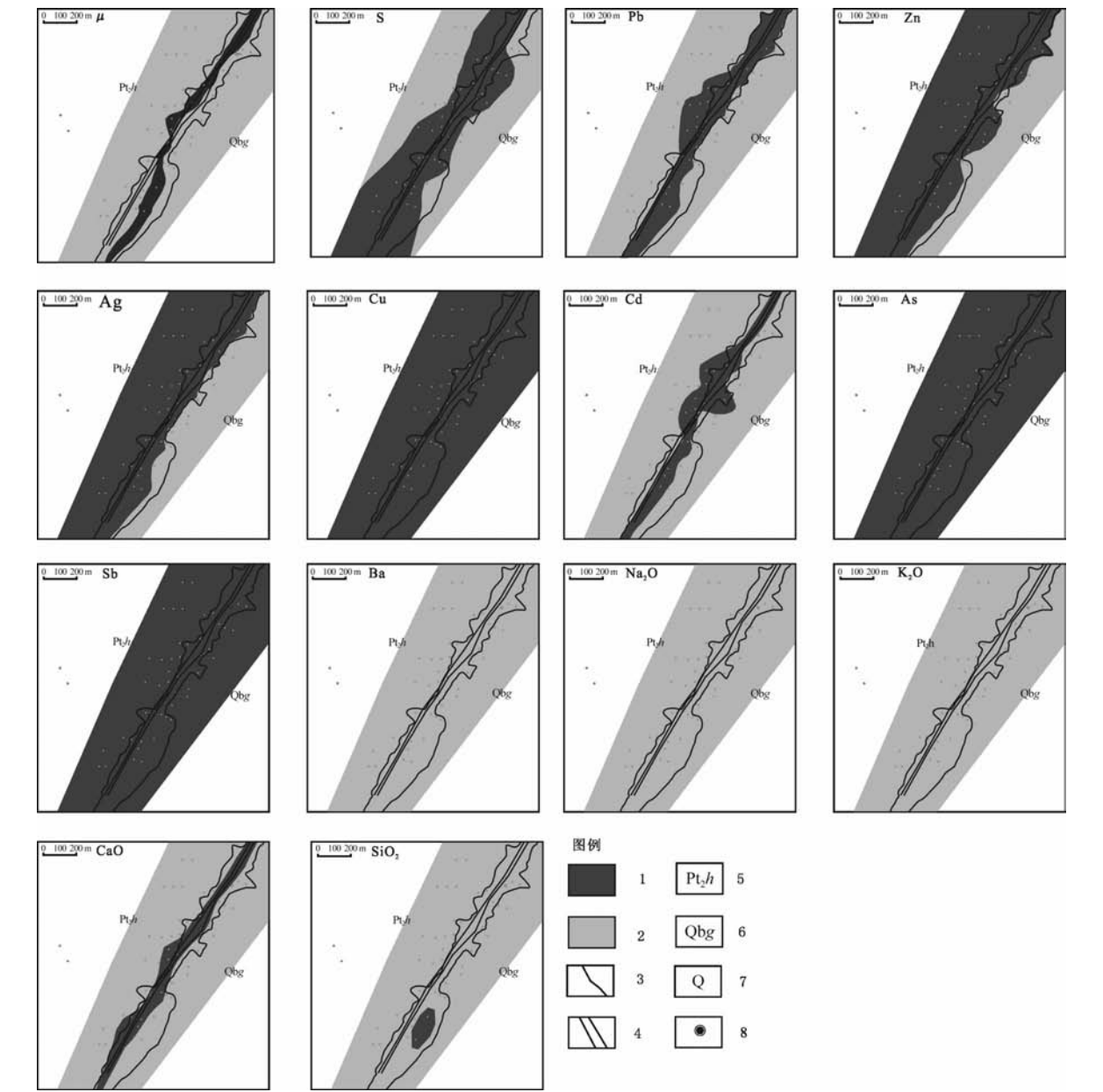
口系地层中带出,在赋矿部位和蓟县系地层中带入;铁族元素 Ti、Mn、Cr、Sc、V、Ni 等在整个研究区内带入;稀土元素在青白口系地层中带出,但带出量较少,总体活动性不强。上述元素迁移规律为该区地球化学勘查指标研制、成矿信息识别及成矿系统边界确定等研究提供了依据。

4 元素迁移量三维勘查模式

依据试验剖面 and 0 m 水平断面的迁移量计算

结果绘制各元素剖面迁移量图和水平断面迁移量图,以展示空间上元素质量迁移规律。现附上系统质量变化 μ ,矿化剂元素 S,成矿元素 Pb、Zn,成矿伴生元素 Ag、Cu、Cd、As、Sb,常量元素 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 SiO_2 ,亲石元素 Ba 等的迁移量图,结果如图 3、图 4。

从图 3 可以看出,在纵向上,系统质量带入区主要分布在赋矿部位即断层及破碎带范围内,系统质量带出区主要分布在距离断层较远的围岩地层中。矿体产出系统质量带入区,S 在近矿部位(指距矿体



1—元素带入区;2—元素带出区;3—地质界线;4—断裂带;5—蓟县系溪口岩群环沙组;6—青白口系历口群葛公镇组;7—第四系;8—钻孔。
图 4 安徽省兆吉口研究区 0 m 水平断面迁移量图
Fig. 4 Mass transfer diagrams of plane cross-section of level 0 m for Zhaojikou area, Anhui Province

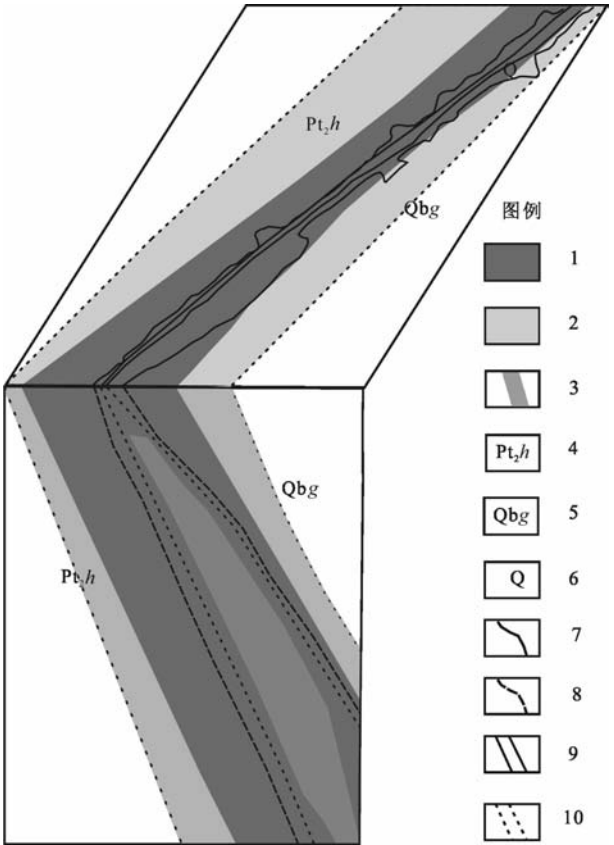
约 10~220 m 范围内)带入,在近矿部位以东的青白口系地层带出,以西的蓟县系地层带入;Pb、Zn、Ag、Cu、Cd、As、Sb 在近矿部位带入,不同的是,Ag 在近矿部位以东的青白口系地层带出;常量元素 Na₂O、K₂O、CaO、SiO₂ 在矿体周围均带出,CaO、SiO₂ 在赋矿部位带入,这与在矿(化)体部位观察到的碳酸盐化和硅化现象吻合,整个系统的 Na₂O、K₂O 带出;Ba 在整个区域带出。

从图 4 中可以看出,在横向上,系统质量带入区同样主要分布在赋矿部位即断裂带范围内,系统质量带出区主要分布在断裂带两旁的围岩地层中,矿体产出在断裂带中的系统质量带入区;S 由距离断裂带较近(约 10~280 m)的地层带入,沿断裂带向北东和南西方向延伸,而由离断裂带较远的东西方向的地层带出;Pb、Zn、Ag、Cu、Cd、As、Sb 在断裂带及其附近带入,向北东和南西方向延伸,带入区的东西方向延伸范围因各元素地球化学活动性不同而不同,总体上表现出随着离断裂带的距离的增大而逐渐变为带出区;常量元素 Na₂O、K₂O、CaO、SiO₂ 在断裂带周围地层中均带出,不同的是 CaO、SiO₂ 在断裂带中带入;Ba 在整个区域带出。

综合图 3、图 4 可以看出, μ 、S、Pb、Zn、Ag、Cu、Cd、As、Sb、Na₂O、K₂O、CaO、SiO₂、Ba 在纵向和横向上的迁移规律表现出较好的一致性, μ 主要在赋矿的断裂带范围内带入,在断裂带两旁的围岩地层中带出;矿化剂、成矿及伴生元素主要在断裂带及其附近带入;表征矿床地质特征的 CaO、SiO₂ 在赋矿部位带入;Na₂O 在整个区域带出,可能反映了成矿地球化学环境的信息。因此,可以认为试验矿床产于断裂带及其次级断裂的质量带入区,向北东和南西方向延伸,东西方向上距离断裂带较远的青白口系地层和蓟县系地层则为质量带出区,据此试研制元素迁移量三维勘查模式图(图 5)。从图 5 可以看出,研究区进一步找矿工作应当沿断裂带向北东方向和南西方向开展。

5 讨论

根据试验剖面上整个成矿系统和各地质单元中元素质量迁移规律研究结果,结合研究区地质特征分析,认为研究区内的地层至少经历了区域变质、构造运动和热液活动等地质作用。为探讨这些地质作用对区内地层及成矿作用的影响,文中利用了稀土



1— μ 、S、成矿及其伴生元素质量带入区;2— μ 、S、成矿及其伴生元素质量带出区;3—矿体;4—蓟县系溪口岩群环沙组;5—青白口系历口群葛城镇组;6—第四系;7—地质界线;8—推测地质界线;9—断裂带;10—推测断层。

图 5 安徽省兆吉口研究区元素迁移量三维勘查图
Fig. 5 A 3D geochemical prospecting module for elemental mass transfer for Zhaojikou area, Anhui Province

元素示踪原理和方法。研究区内各地质单元的稀土元素球粒陨石标准化分配模式结果显示,在 4 个地质单元中,稀土元素分配模式总体均为右倾型,相对富集轻稀土,所不同的是,破碎带、矿体部位和蓟县系地层中表现为 Eu 的正异常,而青白口系地层则表现为 Eu 的负异常。Eu 异常参数可以灵敏地反映地质体系内的地球化学状态,是鉴别物质来源和判定构造环境的重要参数。文中利用 Bhatia 砂岩判别图解对青白口系地层和蓟县系地层的物源区进行了判别^[23],结果显示青白口系地层和蓟县系地层均为被动大陆边缘沉积物。被动大陆边缘的沉积物相对富轻稀土,为 Eu 负异常^[24]。如果单纯从物源角度考虑,青白口系地层和蓟县系地层均应当表现为 Eu 的负异常,但蓟县系地层却表现出 Eu 的正异常,说明蓟县系地层受到了其他地质作用的强烈影响。有研究结果证实,Eu 异常的产生主要取决于 Eu²⁺-Eu³⁺ 平衡。在较高温热液蚀变过程中,Eu 相

对于其他稀土元素可能发生显著分馏^[25], 即使有大量络合作用, Eu^{3+} 在温度不断升高条件下也不能稳定存在^[26]。因此, 在较高温的热流体中 Eu^{3+} 会转变为 Eu^{2+} 形式沉淀导致 Eu 形成正异常。Eu 的这一特性可以解释蓟县系地层中 Eu 出现正异常的原因, 即蓟县系地层在经历了区域变质作用之后, 又经受了热液活动的影响。青白口系地层中 Eu 为负异常, 表明其受热液活动的影响较小, 总体上仍能代表被动大陆边缘沉积物的特点, 破碎带和蓟县系地层则因热液影响形成 Eu 的正异常, 表明其物质组成发生了较大程度的改变。根据以上地质信息推测, 青白口系地层主要受到了区域变质作用-构造运动的影响, 而破碎带、蓟县系地层则除了受到区域变质-构造运动影响以外, 还受到热液活动的影响。由此, 青白口系地层中元素的活动可能反映出区域变质作用-构造运动作用下元素的活动规律, 破碎带—蓟县系地层中元素的活动可能反映出区域变质作用-构造运动-热液活动作用下元素的活动规律。

大量的研究证实, 泥砂质沉积岩发生区域变质作用的过程实际上是一个脱挥发份的过程^[27], 脱水和脱二氧化碳是中下地壳形成大体积变质水的重要过程^[28]。在流体参与的变质过程中, 岩石中除挥发份以外, 还有部分组分也不是恒定的, 而是有明显的质量变化, 即流体参与的变质作用是一个非等化学过程^[29]。世界范围内的许多变质地质体中都可见石英脉、方解石脉等, 它们是与变质作用密切相关的流体作用的直接产物^[30]。研究区变质地层中大量发育的细脉状石英脉和方解石脉, 很大部分应该是区域变质作用的产物。系统质量变化率研究结果表明, 青白口系地层质量是净带出的, 质量变化率为 -18% , 这与人据大量绿片岩相、角闪岩相变泥质岩平均值计算的质量损失量很接近^[31], 其中约 76% 的损失量是 SiO_2 , SiO_2 、 Na_2O 、 K_2O 、 Rb 、 Sr 等有明显的活动性。

有研究表明, Pb 、 As 、 Sb 等成矿及其伴生元素在流体中有明显的活动性^[32], 变质水中溶解有大量硅质、碱金属或碱土金属成分, 可以成为有效的成矿流体^[33]。 SiO_2 和 CaO 等的大量带出, 部分可能形成了变质地层中同期发育的细脉状石英脉和方解石脉, Fe^{3+} 、 Na_2O 、 K_2O 、 MgO 等则构成了脉体的其他常量组分, 或随流体迁移出成矿系统。在区域变质作用下, 随着常量元素的大规律带出, 原生矿物分解形成蚀变矿物, 在这一过程中, 微量元素也将发生相

应的带出作用, 这与青白口系地层中元素质量迁移规律研究结果基本是吻合的。 Ba 、 Sr 、 Be 等亲石元素的带出与 SiO_2 的带出有关, Ag 、 Mo 、 Cd 、 Se , 尤其是矿化剂元素 S 、 F 、 Cl 等的带出, 充分说明成矿及其伴生元素在区域变质作用过程中发生了活化、迁移。 Zn 、 Pb 、 Cu 、 Au 、 As 、 Hg 等成矿元素虽然从计算结果上看表现为“正”值, 指示这些元素应该发生“带入”作用, 但是综合其他元素, 特别是矿化剂元素 S 等的活动性特征分析, 青白口系地层中这些成矿元素很可能也是带出的, 之所以表现为带入, 一是可能距离矿体太近而受到成矿期热液活动的影响; 二是原岩中这些元素的原始含量较高, 即使发生了带出作用后仍表现为带入特点。铁族元素 Mn 、 Cr 、 Sc 、 V 、 Ni 、 Co 等在青白口系地层中表现为带入, 可能是由于其他元素的大量带出导致这些元素含量相对升高, 从而表现出带入的特点。高场强元素 Hf 、 Nb 、 Ta 、 Th 、 U 的带出可能是在流体作用下解吸并随流体发生迁移的结果。 Zr 、 Li 、 Ga 、 P 则是相对升高, 与其他元素的带出有关。稀土元素在变质作用过程中的地球化学行为是一个复杂的问题, 其活动与否受到变质岩石矿物组合、流体组成和流体/岩石比值等多种因素的制约^[34], 在研究区中稀土元素作为元素组整体活动。

破碎带—蓟县系地层与矿石的稀土元素分配模式总体相似, 只是破碎带岩石中 Eu 呈弱的正异常(或无异常), 而矿体和蓟县系地层中 Eu 为强的正异常, Eu 异常强度按破碎带—矿体—蓟县系地层依次增强, 与矿化强度变化规律一致, 表明破碎带—蓟县系地层受后期成矿热液的影响较大。破碎带—蓟县系地层受到后期成矿热液作用影响后, 其质量变化表现为净带入, 表明成矿期热液带入了大量物质, 其中 Pb 、 Zn 、 Cu 、 Au 、 Ag 、 Hg 、 As 、 Bi 、 Sb 、 Mo 、 Cd 等元素的大量带入, 说明成矿期热液汇聚了大量成矿物质。随着富矿流体的迁移和演化, 高温状态下的成矿流体逐渐形成中低温含矿热液, 通过水-岩反应形成硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化等围岩蚀变, 同时由于温度的降低, 在高温阶段进入到流体中的 Pb 、 Zn 等元素, 其硫化物的活度积 \geq 溶度积 (K_{sp}), 便以闪锌矿和方铅矿等硫化物组合形式发生沉淀、成矿。 Au 、 Ag 、 Cu 、 Pb 、 Zn 、 As 、 Cd 、 Co 、 SiO_2 、 FeO 、 CaO 和 Na_2O 等元素在矿体—破碎带部位相应带入, K_2O 和 MgO 则带出。因此, 破碎带—矿体—蓟县系地层中元素的迁移变化, 是由成矿期热

液活动叠加在区域变质作用上形成的。矿体部位的元素迁移变化能在一定程度上代表成矿期热液中元素的活动性。

试验矿床赋存于东至断裂带的次级断裂中,近于构造复合部位,表明东至断裂带及其次生断裂构造在矿床形成之前已经存在或同时形成,是成矿系统“源、运、储、变、保”5要素中的“储”要素^[35]。研究区大量存在的断裂构造及深部断裂可能是成矿流体的运移通道,即“运”要素。后期成矿热液随着深部断裂运移到浅部,与变质水和大气水混合,在有利的构造部位沉淀、富集成矿。试验矿床主要位于东至断裂西部,但断裂带东侧与西侧相比,岩性和构造裂隙并无差异,对于断层泥而言,几乎所有断层泥的渗透率都低于 10^{-18} m^2 ^[36],而砂岩的渗透率则随着裂缝发育的增加而增加^[37],由此分析,可能是东至断裂带中以断层泥为主的低渗透率隔水层阻滞了成矿热液向东运移,东至断裂带的次生断裂和兆吉口倒转褶皱则是重要的储矿构造。

综上所述,认为安徽东至兆吉口铅锌矿床可能是由区域变质-构造运动-热液活动共同形成的,后期成矿热液沿深部断裂运移到浅部,与变质水和大气水混合,在有利的构造部位富集成矿,变质地层和后期热液活动为矿床的形成提供了成矿物质,区内构造运动形成的断层及深部断裂是其运移通道,东至断裂带的次生断裂和兆吉口倒转褶皱充当储矿构造,试验矿床可能是区域变质作用-构造运动-热液活动形成的矿床(系列)的一部分,据此推测,研究区已知矿床外围具有良好找矿前景。

6 结论

根据试验剖面上元素质量迁移规律研究结果,结合研究区地质资料,对安徽东至兆吉口铅锌矿床中元素活动性规律及其对地质找矿的指示作用得到以下认识。

(1)常量元素 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 等在青白口系地层中带出,在矿体部位带入;成矿元素 Cu 、 Au 、 Ag 、 Pb 、 Zn 、 Mo 及其伴生元素 As 、 Bi 、 Sb 、 Se 和矿化剂元素 S 等从矿体上、下盘的围岩向矿体部位带入程度增加;亲石元素 Ba 、 Be 、 Sr 、 Nb 、 P 等在青白口系地层中带出,在赋矿部位和蓟县系地层中带入;铁族元素 Mn 、 Cr 、 Sc 、 V 、 Ni 等在整个试验范围内带入;稀土元素作为一组元素在

青白口系地层中带出。元素质量迁移的上述规律,为探讨兆吉口铅锌矿床的成矿作用机制提供了试验案例,也为研制地球化学勘查指标及方法、开展成矿前景评价和预测奠定了基础。

(2)试验剖面上钻孔控制的成矿系统元素质量是净带入的;青白口系地层中元素质量是净带出的,推测其在区域变质作用过程中,大量成矿物质活化、迁移,对区内矿床的形成起到积极作用。破碎带、矿体和钻孔控制的蓟县系地层等地质单元中,元素质量是净带入的。

(3)各元素在纵向和横向上的迁移规律表现出较好的一致性,且与系统质量变化 μ 的变化规律相一致。矿化剂、成矿及伴生元素主要在断裂带及其附近带入,并向北东和南西方向延伸;表征矿床地质特征的 CaO 、 SiO_2 和可能反映了其成矿环境的信息 Na_2O 等的迁移规律在研究范围内并未结束,研究区依然具备找矿潜力,进一步找矿工作可以沿断裂带向北东和南西方向拓展。

(4)安徽东至兆吉口铅锌矿床可能是由区域变质作用-构造运动-热液活动形成的。区域变质作用过程中元素的活化、迁移,至少为区内矿床的形成提供了部分成矿物质。试验矿床只是该地区由区域变质作用-构造运动-热液活动所形成矿床(系列)的一部分,研究区具有良好的找矿前景。

参考文献

- [1] 常印佛,董树文,黄德志. 论中一下扬子“一盖多底”格局与演化[J]. 火山地质与矿产, 1996(增刊1): 1-15.
- [2] 施俊法,周平,唐金荣,等. 关于金属矿床深部找矿关键技术发展战略的思考[J]. 地质通报, 2009(增刊1): 198-207.
- [3] 孙华山,赵鹏大,张寿庭,等. 系统结构模型在矿产勘查中的应用[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 305-310.
- [4] 马生明,朱立新,刘崇民,等. 斑岩型 $\text{Cu}(\text{Mo})$ 矿床中微量元素富集贫化规律研究[J]. 地球学报, 2009(6): 821-830.
- [5] 梁胜跃,马生明,朱立新,等. 乌努格吐山斑岩型铜钼矿床地球化学异常结构研究[J]. 物探与化探, 2010(2): 127-133, 143.
- [6] 徐明钻,朱立新,马生明,等. 北山地区矽卡岩型铜矿元素表生活活性规律:以辉铜山铜矿为例[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2011(4): 1055-1066.
- [7] 艾金彪,马生明,朱立新,等. 长江中下游马头斑岩型铜钼矿床常量元素、稀土元素特征及迁移规律[J]. 地质学报, 2013(5): 691-702.
- [8] 马生明,朱立新,刘海良,等. 甘肃北山辉铜山铜矿地球化

- 学异常结构研究[J]. 地球学报, 2011(4): 405-412.
- [9] 马生明, 朱立新, 席明杰, 等. 识别分散矿化的地球化学勘查方法探讨: 以内蒙古垦山试验区为例[J]. 地质与勘探, 2011(6): 1124-1132.
- [10] 马生明, 朱立新, 唐世新, 等. 甘肃北山白山堂铜矿外围找矿靶区地球化学评价方法示范[J]. 地球学报, 2013(3): 338-346.
- [11] Ma S M, Zhu L X, Liu C M, et al. Anomaly models of spatial structures for copper-molybdenum ore deposits and their application[J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2013(3): 843-857.
- [12] Sparks R S J. The role of crustal contamination in magma evolution through geological time[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1986, 78(2): 211-223.
- [13] Gresens R L. Composition-volume relationships of metasomatism [J]. Chemical Geology, 1967(2): 47-65.
- [14] Grant J A. The isocon diagram: A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration[J]. Economic Geology, 1986, 81(8): 1976-1982.
- [15] 鄯明才, 迟清华. 中国东部地壳与岩石的化学组成[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 39-40.
- [16] Grant J A. Isocon analysis: A brief review of the method and applications[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2005, 30(17): 997-1004.
- [17] Brauhart C W, Huston D L, Groves D I. Geochemical mass-transfer patterns as indicators of the architecture of a complete volcanic-hosted massive sulfide hydrothermal alteration system, Panorama District, Pilbara, Western Australia[J]. Economic Geology, 2001, 96(5): 1263-1278.
- [18] Ague J J. Extreme channelization of fluid and the problem of element mobility during Barrovian metamorphism[J]. American Mineralogist, 2011, 96(2/3): 333-352.
- [19] 艾金彪, 马生明, 樊连杰. 内蒙古乌努格吐山斑岩型铜钼矿床元素迁移定量探讨[J]. 地球学报, 2013(2): 193-202.
- [20] 艾金彪, 马生明, 朱立新, 等. 安徽马头斑岩型铜钼矿床蚀变带常量元素迁移规律及其定量计算[J]. 矿床地质, 2013(6): 1262-1274.
- [21] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 6-496.
- [22] 牟保磊. 元素地球化学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1999: 1-227.
- [23] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. The Journal of Geology, 1983, 91(6): 611-627.
- [24] 赵振华. 锆地球化学特征的控制因素[J]. 南京大学学报: 地球科学版, 1993(5): 271-280.
- [25] Sverjensky D A. Europium redox equilibria in aqueous solution[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1984, 67(1): 70-78.
- [26] 别风雷, 李胜荣, 孙岱生, 等. 川西岷村黑矿型多金属矿床热液体系稀土元素组成特征[J]. 矿物学报, 2000(3): 233-241.
- [27] 张德会, 金旭东, 毛世德, 等. 成矿热液分类兼论岩浆热液的成矿效率[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 90-102.
- [28] Becker H, Jochum K P, Carlson R W. Trace element fractionation during dehydration of eclogites from high-pressure terranes and the implications for element fluxes in subduction zones[J]. Chemical Geology, 2000, 163(1): 65-99.
- [29] 唐红峰, 刘丛强, 谢国刚. 区域变质作用中岩石的质量迁移和元素活动: 以庐山双桥山群变泥质岩系为例[J]. 地质论评, 2000(3): 245-254.
- [30] 游振东, 钟增球, 周汉文. 区域变质作用中的流体[J]. 地学前缘, 2001, 8(3): 157-164.
- [31] Ague J J. Evidence for major mass transfer and volume strain during regional metamorphism of pelites[J]. Geology, 1991, 19(8): 855-858.
- [32] Bebout G E, Ryan J G, Leeman W P, et al. Fractionation of trace elements by subduction-zone metamorphism: Effect of convergent-margin thermal evolution[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 171(1): 63-81.
- [33] 肖荣阁, 原振雷, 刘敬党, 等. 区域成矿流体的形成与演化[J]. 地学前缘, 2004, 11(2): 461-469.
- [34] Grauch R I. Rare earth elements in metamorphic rocks[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1989, 21(1): 147-167.
- [35] 翟裕生. 试论矿床成因的基本模型[J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 1-8.
- [36] 陈建业, 杨晓松. 地震断层的渗透性[J]. 地学前缘, 2012, 19(4): 30-41.
- [37] 蔡刚. 韦2断块低渗透缝性储层压力敏感性研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2005(1): 49-50, 108.