

doi: 10.12029/gc20190105

王嘉玮, 朱裕生. 2019. 界面成矿探讨[J]. 中国地质, 46(1): 77–86.

Wang Jiawei, Zhu Yusheng. 2019. A discussion on marginal metallogenesis[J]. Geology in China, 46(1): 77–86(in Chinese with English abstract).

界面成矿探讨

王嘉玮, 朱裕生

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要:“地质界面”是地壳内各类地质单元的边界,它明确了地质体之间的相互关系,通常也是形成矿床的有利地质空间和载体;“成矿界面”是指地质界面上发生成矿作用的地质记录,记载有成矿作用发生的“地质界面”称它为“成矿界面”;讨论“地质界面”上发生成矿作用过程、成矿物质富集条件和矿床形成后保存过程的这一系列完整内容的成矿学理论,称为“界面成矿”理论。在前人研究基础上,匹配相应成矿作用种类,“成矿界面”可以概括分成 9 个成矿界面组;每类“成矿界面”上发生的成矿作用,都标定了矿床形成的地质位置,均对找矿有指示性意义;界面成矿理论是矿产预测和矿床勘查成矿学的重要依据,是总结成矿规律的基本内容之一,并且可以作为支撑境内外实施科学找矿的有效理论依据。

关键词:地质界面;成矿界面;界面成矿理论;科学找矿

中图分类号:P612 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2019)01-0077-10

A discussion on marginal metallogenesis

WANG Jiawei, ZHU Yusheng

(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: “Geological interface” is the boundary of various geological units in the earth's crust. It clarifies the contact relationship between geological bodies, and usually also a geological space where the deposit is formed. “Metallogenic interface” refers to the place where mineralization occurs and geological interface with the deposit. “Marginal metallogenesis” clarifies the occurrence of mineralization at the metallogenic interface and its evolution process, ore-forming material enrichment and post-mineralization preservation process. According to the differences in geological and metallogenic processes, the metallogenic interface can be divided into 9 groups. Metallogenic interfaces are the most easily recognizable and direct indications for prospecting, and constitute one of the theoretical bases of scientific prospecting, and summarize the law of mineralization.

Key words: geological interface; metallogenic interface; marginal metallogenesis theory; scientific prospecting

About the first author: WANG Jiawei, male, born in 1989, master, majors in mineral deposits and engages in research on theory

收稿日期:2018-04-18;改回日期:2019-01-03

基金项目:中国地质调查局项目(DD20160101)资助。

作者简介:王嘉玮,男,1989年生,硕士,从事矿床地质学、区域成矿学、矿产资源潜力评价理论与实践研究;E-mail:wangjiawei0824@163.com。

通讯作者:朱裕生,男,1937年生,研究员,主要从事区域成矿学、矿产勘查、矿产区划、矿产预测理论及方法、矿产资源潜力评价等方面的理论研究;E-mail:zhuyushengchy@163.com。

and practice of mineral resource potential assessment. E-mail: wangjiawei0824@163.com.

About the corresponding author: ZHU Yusheng, male, born in 1937, majors in regional metallogensis, engages in research on theory of mineral resource potential assessment. E-mail: zhuyushengchy@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. DD20160101).

1 地质界面

地质界面是地质学中描述地质体的术语,一旦与矿床特征、成矿作用、成矿单元结合在一起,它的地质内涵就会发生本质变化。在近代成矿学理论和矿产预测领域中,将地质界面扩充为“成矿界面”,继而提升为“界面成矿”理论。界面成矿是总结成矿规律的内容,指示未发现矿床地质定位的理论依据。在区域成矿学和找矿预测工作中,国内外研究学者公认它是有效的找矿标志。本文系统总结了对地质界面、成矿界面、界面成矿的新认识,扩充和丰富了境内外成矿规律的内容,进一步提高了科学找矿的理论水平,可为实现境内外地质找矿的重大突破提供成矿学理论新依据。

“地质界面”是指断层面、节理面、不整合面、侵入接触面、不同岩层的交接面等(赵鹏大,1991),是判定构造-岩浆旋回和划定地质单元的依据。地壳内存在种类繁多、错综复杂的地质单元,它们的边界就是地质界面。在地质学中常使用“地质界面”判定沉积岩的地层序列、划分变质岩的岩相、区别岩浆岩侵入体的相带以及确定构造应力作用场的转换面等。而地质单元的复杂多样性,又指示了地质界面的多样性。П.А.舍赫特曼等(1979)从地质成矿单元的成因和地质界面的形成过程出发,将“地质界面”分为物质异相界面(如不同岩类的岩性分界面,沉积岩类不同岩相的分界面,侵入岩体的岩相界面,变质岩类不同变质相之间的界面等)和非物质异相界面(如成矿过程中成矿元素沉淀富集的物理化学条件变化的众多转换面等)两类。孙启祯(1999)在论述地质界面成矿相关理论的见解时,把地质界面分为:沉积间断面、地层不整合面、脆性与塑性岩石交接面、化学性质活泼与化学性质稳定岩石的接触面。朱裕生等(2007)在阐述矿产预测理论时认为:地质界面是一种地质“相带”转换为另一种地质“相带”的交界面,具有特定的成矿功能,在成矿作用发生、发展、演化过程中,是成矿流体储

存、成矿物质富集和形成矿床的有利空间。叶天竺等(2014)在论述成矿作用有利条件时,提出岩性、构造和物理化学三种界面,并将地质界面和成矿作用联系起来,认为地质界面是形成矿床的有利空间。矿产勘查实践证明,“地质界面”始终是找矿的关键标志、预测的靶点和矿床定位的地质空间,对未发现矿床的地质位置具有明确的指示作用。在矿产预测工作中已将地质界面列为有效的找矿标志和关键的预测要素。当前在境内地质找矿难度加大、境外地质勘查工作相对难以开展并且将大型、超大型矿床和隐伏(盲)矿床视为找矿对象的情况下,地质界面和界面成矿理论的提出为新时代的地质找矿工作提供了成矿学资料依据和理论支撑。

2 成矿界面

地质界面概念提出后,从已知矿床特征指明每类矿床产于特定的地质位置上(陈毓川,1993;朱裕生,2006),如图1的热液型金矿床赋存在两组断裂交叉的次级断裂带的断裂构造界面上,与花岗斑岩(充填于主断裂界面上)有成因联系,属岩浆热液型金矿床;广东高明富湾银金矿床的矿体产于下石炭统梓门桥组与上三叠统小平组的不整合界面上(图2),属中低温热液矿床(黄崇轲,2002);新疆东天山黄山东铜镍矿床(图3)赋存在角闪辉长岩相与角闪橄榄辉长岩相底部的两类岩相界面上(刘德权等,2005),图4的吉尔吉斯斯坦海达尔坦汞铋矿床产于多类地质界面上,属于低温热液型矿床(B.N.斯达拉斯金,2014)。由此可推断,各矿种各类矿床产出的地质位置都存在自身特定的地质界面,将它们汇集总结后,概括为“成矿界面”。

“成矿界面”是指赋存地质界面上发生过成矿作用,并形成矿床的地质界面(叶天竺,2014)。成矿界面是物理化学条件突变的地质空间,成矿流体必然停积而发生矿质沉淀、富集和成矿,主要表现为岩性、温度、压力、pH、Eh等方面的突变性,其力学性质及岩石的物理性质、化学成分是控制矿体形

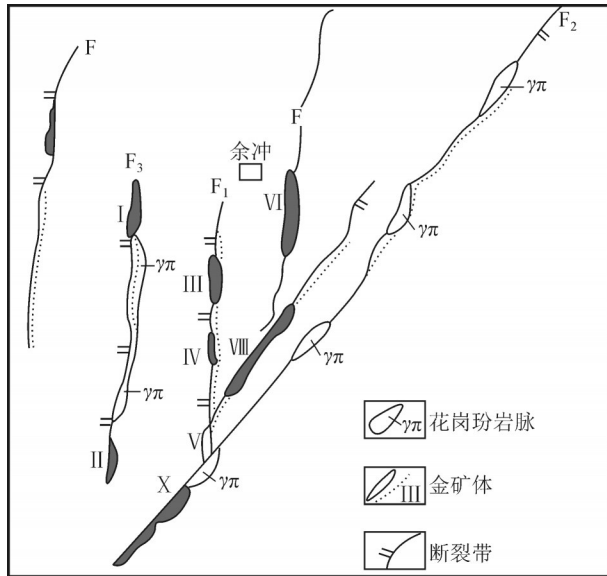


图1 河南余冲金矿区同构造断裂系统-成矿流体渗滤成矿作用成矿界面图
(据罗铭玖等, 1992)

Fig. 1 Metallogenic interface of the same tectonic fault system- ore-forming fluid infiltration and mineralization in the Yuchong gold deposit, Henan Province
(after Luo Mingjiu et al., 1992)

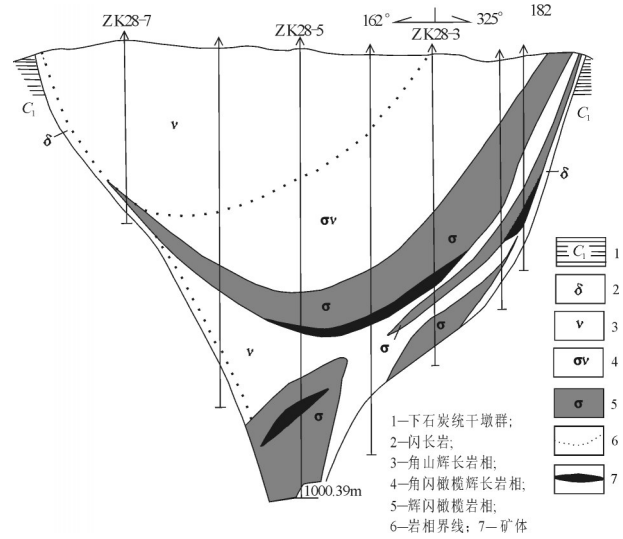


图3 黄山东矿床28号勘探线剖面
(据刘德权等, 2005)

Fig. 3 Geological section along No. 28 exploration line of Huangshan east deposit
(after Liu Dequan et al., 2005)

为矿床预测的关键要素。例如陈毓川等在总结阿尔泰成矿省成矿规律时,提出阿舍勒铜锌块状硫化物矿床的顶板是石英角斑质岩,矿体与它呈整合接触;底板属细碧角斑岩,与矿体为不整合接触,矿体赋存的地质位置指明阿舍勒铜锌块状硫化物矿床的成矿作用发生在两个海底火山喷发旋回的间歇期形成的地质界面(两类岩性界面和不整合面)上(陈毓川等, 2002),表述了块状硫化物矿床赋存在特定的成矿界面上。

已知矿床成矿界面的事实已纳入总结成矿区和成矿规律的关键内容,在矿床深部勘查和隐伏矿床找矿工作中,成矿界面指示了未发现矿床的地质位置和可能的矿化类别(即成矿作用类别),是提高矿产勘查效益的成矿学理论依据之一。

3 界面成矿

“界面成矿”是指地质界面上可能和必然发生的成矿作用,它概括了“地质界面”上发生成矿作用的过程、成矿物质富集的地质条件和矿床形成后的保存过程等一系列完整内容。成矿作用发生在地质作用后期,沉积成矿作用发生在不同岩性界面上,与火山喷发、岩浆侵入及其相关的岩浆热液成矿作用发生在火山熔体喷发以后或岩体侵位以后,

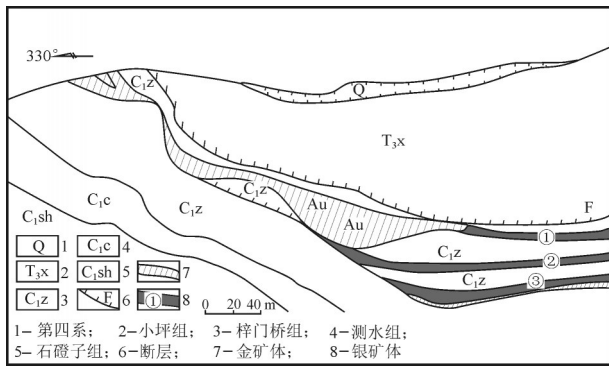


图2 构造运动应力-改造沉积间断面界面成矿作用图示
(据黄崇轲等, 1997)

Fig. 2 Tectonic movement stress-illustration of marginal metallogenesis
(after Huang Chongke et al., 1997)

态、产状、规模、矿石组构,甚至矿石成分的重要因素(叶天竺等, 2014)。自进入21世纪开展国土资源大调查开始以来,地质找矿由地表矿转入隐伏矿床和难识别矿床勘查的新情势,科学找矿的途径已进入全面探索阶段,特别是成矿规律的总结研究不断深化,已将矿床产于各类地质界面上的普通事实列

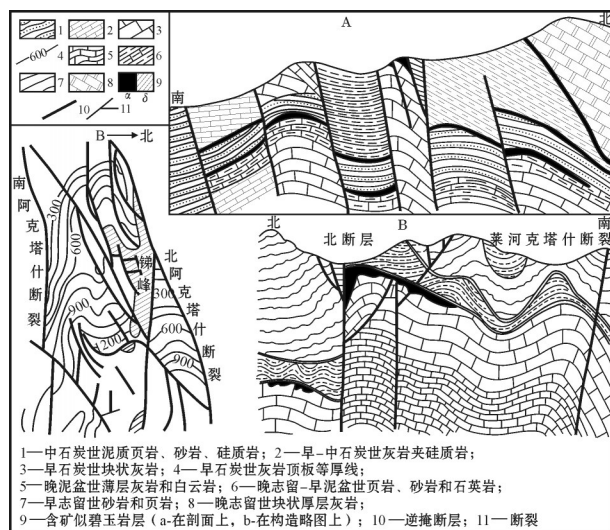


图4 吉尔吉斯斯坦海达尔坦汞锑矿床成矿界面图
海达尔坎汞—锑矿床地质剖面(A)、构造略图(B)、卡达姆斋锑矿床地
质剖面(B)

(据 B. И. 斯达拉拉斯金(俄), 2014)

Fig. 4 Metallogenic interface map of the Haidartan mercury-
antimony deposit in Kyrgyzstan

Geological section of the Haidarkan mercury-antimony deposit (A),
Construction sketch (B), Geological section of the Kadammam deposit
(B) (after V. I. Starostin. 2014)

即便是岩浆成矿作用,出现在岩浆演化过程的硅酸盐熔体与矿浆分离以后(朱裕生,2007)。变质成矿作用一般发生在变质过程的岩石重结晶以后,与变质流体有关,有的变质矿产可以在变质作用过程中矿物重结晶形成矿床。成矿作用在地质作用影响的范围内发生,地质作用与成矿作用紧密相关,两者的强度、规模、形成机制和表现形式差异大,发生顺序有先后,它们互为因果。地质作用在先,地质作用造就的地质体控制成矿作用发生的范围。成矿作用是指成矿物质迁移、富集、沉淀(有些成矿物质可溶解),由流体态转化为固态(重结晶是固态的转换),形成矿物。成矿物质的转换要靠成矿物质到达凝集的有效空间,即物质异相界面。由于物理化学条件发生突变,即非物质异相界面(温度、压力、酸碱度、氧化还原电位和溶质浓度等),致使流体态变成矿床固体的自然态,形成矿床。这些转换作用也将地质界面转化为成矿界面。必须强调的是,在成矿界面上发生的成矿作用称为界面成矿。

在成矿界面上发生的成矿作用和形成的矿床

受多种地质因素控制,物质异相界面控制成矿作用发生的空间、范围、矿床形态和深度等矿床基本参数。物质异相界面控制下,成矿物质(流体、熔体或固态的)内部的物理化学条件(温度、压力、pH、Eh等)条件发生变化,引起成矿物质达到饱和或熔体达到冷却点,成矿物质才能形成矿物。无论成矿物质从哪里来,都一定会在物质异相界面聚集。地质界面无疑是成矿物质的停留、富集、成矿、保存的有利空间。前人明确指出,成矿作用分5类(陈毓川等,2015):岩浆成矿作用,沉积成矿作用(在水中沉积成矿),变质成矿作用,表生成矿作用及与岩浆、变质作用无关的流体成矿作用。在地质构造演化过程中,或地质作用诱发下,5种成矿作用在地质界面上都可能发生,在已知矿床特征描述中,成矿界面上存在5种成矿作用。地质界面的类别不同,成矿作用种类不一,框定了界面成矿的内涵。矿床类型中常见的中酸性岩浆侵入与碳酸盐岩地层接触时,发生了侵入接触交代成矿作用,形成矽卡岩型接触交代型矿床,接触面成为含矿气水溶液交代成矿的转换面(赵一鸣,2004)。根据离子交换研究(B.N.斯达拉拉斯金,2014)认为: Al_2O_3 、 SiO_2 来自侵入体(硫、氧、碳同位素证实,它们来自深部地幔,Ca来自围岩),由于交代作用的发生,形成矽卡岩型矿床(图5)。地质界面性质不同,发生的成矿作用亦不同,也必然形成不同类型的矿床。像镁铁质、超镁铁质岩浆侵入后发生岩浆熔离作用,在特定的岩相界面上形成岩浆熔离铜镍矿床(图3);铁镁质岩浆侵入后发生重力分异作用在超基性岩体底部形成条带状钒钛磁铁矿床(图6,图7);断裂界面内往往充填有热液脉状矿床(图1)。总之,地质界面为成矿作用条件的转换面,记录了成矿作用的发生、发展、成矿元素富集成矿的过程和物理化学条件的变化,已知矿床的实际资料证实,界面成矿理论阐明了成矿界面上发生的成矿作用及其演化过程。在勘探区已研究了数百个矿床(朱裕生等,2007),界面成矿是指导勘查区矿床勘查的指导理论,已知的岩浆型,沉积型,陆相和海相火山岩型,斑岩型,热液型等十三类矿床的找矿预测模型中都设置了地质界面是重要的预测参数,成矿界面是必要的成矿要素,已公认界面成矿理论是当代成矿学理论的组成部分(叶天竺等,2014)。它在深部勘查和勘查区

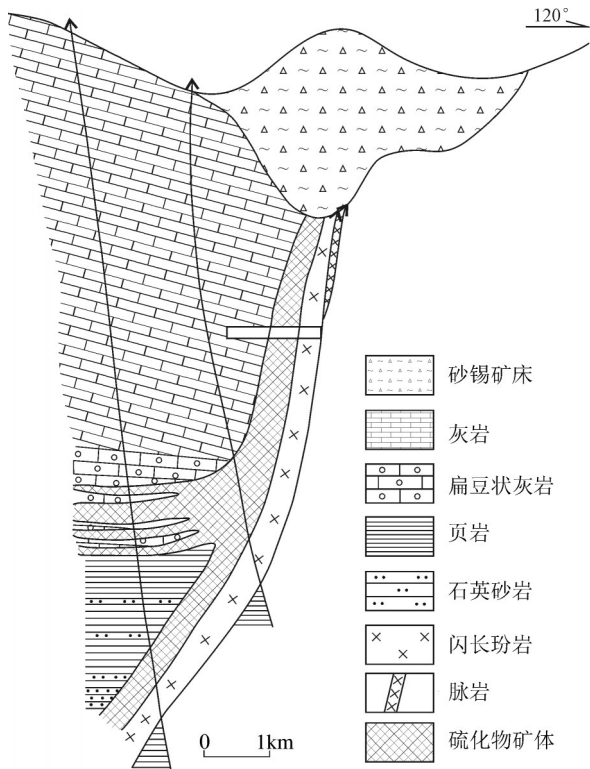


图5 白面山锡锌硫化物矿床024号勘探线剖面界面成矿图
(据邱亮斌等,1992)

Fig. 5 Marginal metallogenesis map of No. 024 exploration line section of Baimianshan tin-zinc sulfide deposit
(after Qiu Liangbin et al., 1992)

矿产预测实践中产生了实效。当前界面成矿的认识(或理论)已纳入区域成矿规律总结的必要内容、三维建模、矿产预测的指导理论之一(朱裕生,2013;肖克炎等,2016)。

4 “成矿界面”类别和分类探讨

在不同的成矿地质构造背景控制下,产生不同的成矿地质环境,在不同深度的地壳内部都可能存在不同成矿界面。在各类成矿界面上,有可能发生不同的成矿作用。当代对成矿作用的分类已经形成共识,归并为5类:即岩浆、沉积、变质、表生和流体(与岩浆、变质成矿作用无关的)成矿作用(陈毓川等,2015)。“地质界面”和某类成矿作用匹配耦合形成矿床,“地质界面”也转化为“成矿界面”。由于“地质界面”的多样性和成矿作用类别的差异,造成了“成矿界面”的多样性。由此而导致成矿学理论探索和矿产勘查应用的难度。根据当前已知矿

床赋存的“成矿界面”事实和成矿作用的类别将“成矿界面”分为若干类别,它阐明了不同深度,不同矿种,不同类型矿床赋存于四维空间的地质位置和同类矿床的成因以及成矿地质特征,进一步细化了矿床(体)在四维空间的整体特征描述。在前人研究基础上(朱裕生等,2007),匹配5类成矿作用(陈毓川等,2015),“成矿界面”可以概括分为以下几个组(表1):

(1) 超基性、基性岩浆分异成矿作用成矿界面组。超基性岩和基性岩类岩浆分异成矿作用形成的成矿界面,是岩浆结晶分异作用形成了岩相界面,主要“成矿界面”出现在岩浆结晶分异阶段的晚期,矿床赋存在岩相转换面或特定的岩相内,典型矿床实例见图3、图6及图7。

(2) 酸性岩浆侵入成矿作用成矿界面组。花岗岩类与岩浆侵入作用有关的,与岩浆热液流体有成因联系的成矿界面,矿体产在岩体顶端的尾部,或在岩体与围岩接触界面上。该组成矿界面按花岗岩类岩浆侵入作用与岩浆热成矿液流体造就的蚀变界面,蚀变带及与围岩接触面进一步细分为若干成矿界面类型。

(3) 中酸性岩浆侵入自交代和接触交代成矿作用成矿界面组。该界面组一般与斑岩型、矽卡岩型矿床有成因联系,这类岩体在侵入和成岩过程中变质作用强烈,产生的成矿界面是蚀变岩类的分界面、蚀变带和围岩的接触界面,矿床赋存在这些界面上或蚀变带内,典型矿床实例见图5。

(4) 碱性岩浆侵入或交代成矿作用成矿界面组。该类成矿界面的特征与中酸性岩浆侵入自交代和接触交代作用有关的成矿界面基本相似。但该类岩浆侵入交代成矿作用形成的矿产以铀、稀有、金矿床为主,少数与铁铜矿床有成因联系。成矿界面仍然是各类蚀变岩类的异相交界面,蚀变带和围岩接触交代的界面。

(5) 火山-次火山侵入-喷发-沉积(陆相和海相)成矿作用成矿界面组。该类型赋存有火山热液型、次火山型和块状硫化物型矿床,这些矿床是在火山喷发阶段的后期或两次火山喷发活动的间歇期形成的,矿层产在每个韵律的顶部或两个韵律的交接部位。根据发生的成矿作用进一步划分若干类型的成矿界面。

表 1 成矿界面组分类
Table 1 Division of metallogenic interface group

成矿界面组	成矿作用	成矿界面组特征	实例
1	超基性、基性岩浆分异成矿作用	含矿岩体为分异良好的镁铁-超镁铁层状岩体,矿床一般赋存在岩相转换面,呈层状互层状产出	四川攀枝花钒钛磁铁矿;南非布什维尔德岩浆型Cu-Ni-PGE硫化物矿床;俄罗斯贝辰加Cu-Ni硫化物矿床;俄罗斯萨兰诺夫铬铁矿矿床
2	酸性岩浆侵入成矿作用	与含矿有关的岩体通常呈现出复式岩体,矿化发育于花岗岩体的内外接触带,多为矽卡岩型、云英岩性矿床	云南个旧地区锡多金属矿床模型;中国跃进山矽卡岩型铜金矿床;捷克增诺维茨云英岩矿床
3	中酸性岩浆侵入自交代和接触交代成矿作用	复式岩体,矿化发育于岩体接触带和断裂以及附近的层间裂隙,围岩蚀变主要为矽卡岩化和钠化	广西白面山锡锌硫化物矿床;湖北大冶式矽卡岩型铁(铜)矿床;内蒙古白音诺铅锌矿;俄罗斯弗罗洛夫矽卡岩型铜矿
4	碱性岩浆侵入或交代成矿作用	岩体垂直分带特征明显,矿化发育于岩体顶部且向下延伸	四川牦牛坪稀土金属矿床;格陵兰伊犁马萨克铀-稀土矿床;巴尔哲稀有稀土金属矿床;俄罗斯乌拉尔列比亚任斯克磷灰石-磁铁矿矿床
5	火山-次火山侵入-喷发-沉积(陆相和海相)成矿作用	火山旋回构成了矿区内含矿火山岩系,即矿化集中发育的层位,矿层在每个韵律的顶部或两个韵律的交接部位,矿化蚀变带十分发育,矿石具有显著的沉积特征	新疆阿舍勒式块状硫化物型铜锌矿床;新疆阿希金矿;宁芜玢岩铁矿;呷村式VHMS矿床;广西龙头山金矿;俄罗斯达什克桑钴矿
6	沉积成矿作用	矿化发育于地层不整合界面、沉积间断界面,沉积物粗、细粒的变换界面等多类成矿地质界面;含矿层自下而上,一般出现连续矿化分带,矿体呈层状,与地层整合接触,矿石一般具有条带状构造	中国华北溶洼型铝土矿;宁乡式铁矿;广西下雷沉积型锰矿床;山西孝义西河底沉积型铝土矿床;贵州遵义海相沉积岩型锰矿床
7	变质成矿作用	矿体与围岩多呈整合接触关系,矿体多为透镜状,层状或似层状,含矿岩体发育于变质原岩界面、变质相界面,混合岩化变质界面	弓长岭BIF型石墨矿;乌克兰克里沃罗格铁矿;加拿大拉布拉多金属矿床;黑龙江柳毛石墨矿床
8	动力构造成矿作用	矿田受大型穹隆、断裂或褶皱控制,矿床一般发育于不同方向区域性断裂交会的部位和构造体制转换的界面	河南余冲金矿;吉尔吉斯斯坦海达尔坦汞铋矿床;贵州烂泥沟金矿;山东归来庄金矿
9	非物质异相成矿作用	成矿流体酸碱度变化过程中出现中性环境时,成矿元素沉淀富集成矿(pH,Eh,F _{o2} 值转换面)	闽西紫金山浅成低温热液型铜金矿;中亚勃里奇穆尔毒砂矿床;内蒙古赤峰维拉斯托银多金属矿床;贵州丹寨水银厂汞矿

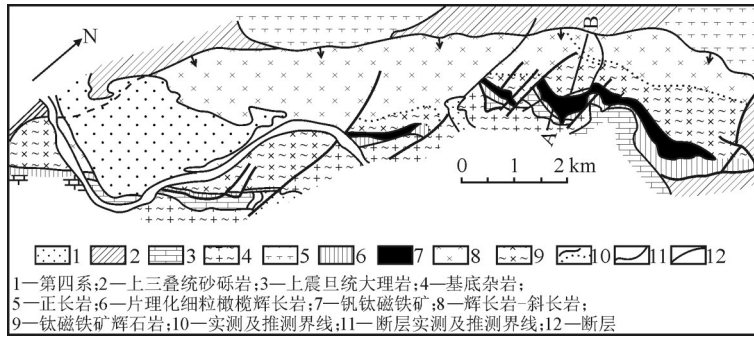


图6 攀枝花钒钛磁铁矿矿区基性岩和矿床(体)赋存位置关系略图

Fig.6 Sketch diagram of the location relationship between basic rocks and deposits (orebodies) in the Panzhihua vanadium-titanium magnetite ore district

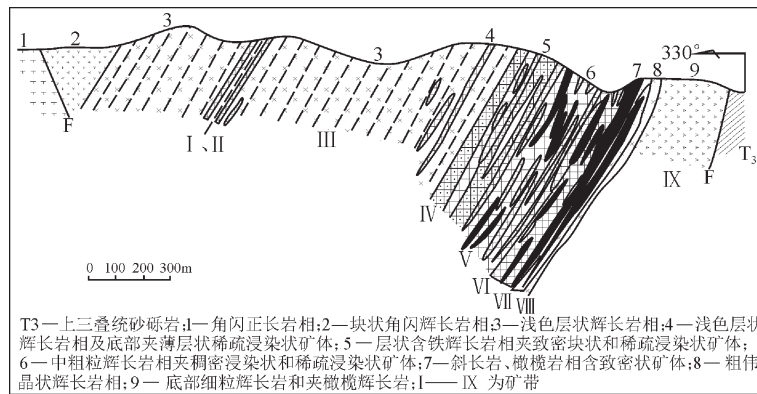


图7 攀枝花钒钛磁铁矿矿区铁镁质岩浆侵入体岩相分带和矿体分布地质空间关系图 (据张云湘等,1988)

Fig.7 Geological and spatial relationship between lithofacies zonation and orebody distribution of iron-magnesium magma intrusion in Panzhihua vanadium-titanium magnetite ore district (after Zhang Yunxiang, et al., 1988)

(6) 沉积成矿作用成矿界面组。沉积成矿作用在沉积旋回的控制下,形成有海相成因和湖相成因的成矿界面。沉积环境控制的成矿界面又受到机械沉积作用,化学沉积作用和生物沉积作用的影响,可进一步细分成矿界面类型,矿床赋存在这些界面上,成矿作用基本发生在一个旋回或一个沉积过程的后期。典型矿床实例见图8。

(7) 变质成矿作用成矿界面组。变质成矿作用形成的成矿界面基本受变质相,混合岩化和变质热液的控制,成矿界面多样,繁简各异。通常按变质建造,变质相等因素,细分成若干类成矿界面(程裕淇,1994)。

(8) 动力构造成矿作用成矿界面组。构造动力应变-改造作用有关的成矿界面类别多样,按照构

造类别进一步划分为若干类,典型矿床实例见图4。

(9) 非物质异相成矿作用成矿界面组。成矿流体的物理、化学条件转换有关的成矿界面,它是成矿界面中较复杂的一组。通常在成矿流体酸碱度变化过程中出现中性环境时,成矿元素沉淀富集成矿(张长青等,2012);海洋沉积过程中,由氧化转换成还原环境时,成矿元素沉淀富集形成矿层。物理化学转换面是应用当代先进的测试手段获得实际资料确定的成矿界面,可进一步细分成若干类。

以上对“成矿界面组”类别的划分属轮廓性的概略认识,概括成以下的共同特征:

(1) 成矿界面(组)出现在地壳的不同深度和不同的地质构造单元内,标定了区域成矿作用的基本特征,并与矿床类型有直接成因联系;

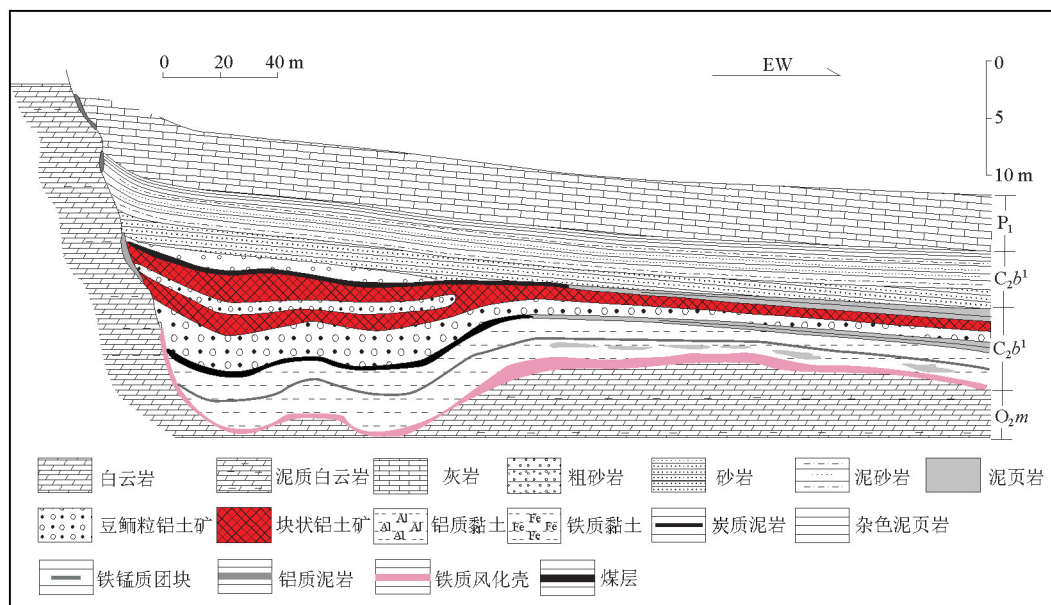


图8 华北溶注型铝土矿成矿界面示意图
(据王庆飞等,2012)

Fig.8 Schematic diagram of metallogenic interface sedimentary bauxite in corroded depression of North China
(after Wangqingfei et al., 2012)

(2) 成矿界面(组)是矿床形成过程和成矿作用演化的地质记录,汇集了完整的控矿因素和找矿标志,象征着矿床成矿作用的发生、发展、成矿元素富集成矿的过程和物理化学条件变化的整体概念。

(3) 成矿界面(组)的类别标志了矿床成矿作用的基本类型,是确定矿床成因类型的主要依据。

综上所述,成矿界面(组)是成矿单元内普遍存在的关键地质要素,显示了矿床在四维地质空间的基本特征,是当代成矿学的新理论之一(叶天竺等,2014)。

5 讨论

前人对“成矿界面”理论已有一定的论述,但并未对成矿界面组进行有效合理的科学分类,本文将成矿界面组分为9类,并用典型矿床阐明了每类的特征,指明了在矿产勘查中应用的可能性。“地质界面”是地质体之间异相差异的交界面,在地壳内普遍存在;“成矿界面”是指地质界面上发生成矿作用和赋存有已知矿床的地质体或地质空间;“界面成矿”是指地质界面上必然或可能生成成矿作用后形成四维空间的地质过程总和,它是利用当代已知矿床资料推断出来的,是矿产预测和勘查工程布置的地质理论依据。在已有的矿床地质资料中,判别地质界面的类别,可为成

矿界面的确定建立科学依据。由此可知,成矿界面在矿产预测、勘探找矿工作中具有特定的实用价值。目前界面成矿已纳入成矿规律总结的内容,找矿勘探的实践证明,它是科学有效的。

6 结论

界面成矿理论在实践国内深部勘探和境外“一带一路”矿产资源预测评价的工作中发挥了成矿学理论的指导作用,特别是境外基础地质信息不全、矿床基础数据不对称的事实面前,界面成矿理论可作为境外典型矿床与国内典型矿床的对比研究的理论依据,在对比研究过程中,确定相同类型的成矿界面组是非常实用和有价值的找矿标志,该理论是境外矿产勘探,圈定找矿战略选区的重要依据之一,并且极大地丰富了我国的成矿学理论。

致谢: 成文前参阅了许多中国和俄罗斯老一辈地质学家的专著论文,受益良多。在写作过程中,得到了王宗起研究员、梅燕雄研究员等专家的指教和帮助,在此致以衷心的感谢。

References

Chen Yuchuan. 1993. Metallogenic Model of Chinese Deposit[M].

- Beijing: Geological Publishing House, 8–17(in Chinese).
- Chen Yuchuan. 1999. Minerogenetic Series of Mineral Deposits and Metallogenic Prediction[M]. Beijing: Geological Publishing House, 15–19(in Chinese).
- Chen Yuchuan. 2011. A tentative discussion on the breakthrough of ore prospecting in China[J]. Mineral Deposits, 30(5):768–772(in Chinese with English abstract).
- Chen Yuchuan, Pei Rongfu, Wang Denghong, Wang Pingan. 2015. Natural classification of mineral deposits: Discussion on minerogenetic series of mineral deposits (IV)[J]. Mineral Deposits, 34(6), 1092–1106(in Chinese with English abstract).
- Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu Zhigang, Li Tiande, Fu Xujie. 2002. Metallogenic Series and Regularity in Altai Metallogenic Province [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 180–184(in Chinese).
- Cheng Yuqi. 1994. Introduction to Regional Geology of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 432–441(in Chinese).
- Huang Chongke, Bai Ye. 2001. China Copper Deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 26–31(in Chinese).
- Huang Chongke, Zhu Yusheng, Zhang Zhongwei. 1997. Silver Deposits in Nanlin Mountain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 194–198(in Chinese).
- Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Pei Rongfu. 2012. Mineral Deposit Model of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 42–97 (in Chinese).
- Li Zhongming, Yan Changhai, Liu Xuefei, Zhao Jianmin, Liu Baishun. 2012. Genesis of the Yushan Concealed Bauxite Deposit in Xin an County of Henan Province [J]. Geology and Prospecting, 48(3): 421–429(in Chinese with English abstract).
- Liu Dequan, Tang Yanlin, Zhou Ruhong. 2005. Copper Deposit and Nickel Deposit of Xinjiang Province in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 263–265 (in Chinese).
- Luo Mingjiu. 1992. Introduction of Gold Deposit in Henan Province China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 331–333(in Chinese).
- Lv Linsu, Wang Yunfeng, Li Hongbo, Zhou Zhenhua, Zhang Zuoheng, Xie Guiqing. 2011. Discussion on the metallogenesis of Bushveld magmatic Cu–Ni–PGE sulphide deposit in South Africa[J]. Mineral Deposits, 30(6): 1131–1148 (in Chinese with English abstract).
- Lv Guxian, Wu Jichun, Wang Dianliang, Han Lu. 2012. Problems in geological prospecting in the field of exploration in China [J]. Mineral Deposits, 31(SI):1164(in Chinese).
- Qiu Liangbin, Hu Huoyan. 1992. Study on metallogenic material sources in baimianshan cassiterite–sulfide deposit[J]. Geotectonica et Metallogenia, 16(1):109–110(in Chinese).
- Shekhtman P A, Korolev V A, Nikiforov N A. 1979. Detailed Prediction Chart of Hydrothermal Deposit [M]. Moscow: Moscow University Book House Press, 162–166(in Russian).
- Smirnov V I. 1976. The Geology of Mineral Deposits[M]. Moscow: Moscow Earth Publishing House, 64–399(in Russian).
- Starostin V I. 2014. Theory of Deposit–producing [M]. Moscow, 233–236(in Russian).
- Sun Qizhen. 1994. Marginal mineralization and Mineralization marginal effects [J]. Earth Science Frontiers, 1(3–4): 176–182 (in Chinese with English abstract).
- Sun Qizhen. 1999. Marginal mineralization and metallogenic prediction [C]//Chen Yuchuan Theory and Methods of Exploration and Evaluation of Contemporary Mineral Resources[M]. Beijing: Geological Publishing House, 26–33(in Chinese).
- Wang Qingfei, Deng Jun, Liu Xuefei, Zhang Qizuan, Li Zhongming, Kang Wei, Cai Shuhui, Li Ning. 2012. Review on research of bauxite geology and genesis in China [J]. Geology and Prospecting, 48(3): 430–448 (in Chinese with English abstract).
- Wu Ganguo, Deng Jun. 1999. The Research Status of Metal Deposits and Orefield Structure [M]. Beijing: Seismological Press, 142–149 (in Chinese).
- Wu Guang, Zhu Yusheng. 2016. Discussion on Connotation and Classification of Metallogenic Units [J]. Geological Review, 62 (Supp.1): 233–234 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Keyan, Sun Li, Zhu Yusheng. 2016. Theory of mineral resource assessment [J]. Geological Review, 62(Supp.1):63–64(in Chinese with English abstract).
- Ye Tianzhu, Lv Zhicheng, Pang Zhenshan. 2014. Theory and Method of Prospecting Prediction in Exploration Area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 14–15 (in Chinese).
- Zhang Changqing, Ye Tianzhu, Wu Yue, Wang Chenghui, Ji Hai, Li Li, Zhang Tingying. 2012. Discussion on controlling role of Si–Ca boundary in locating Pb–Zn deposits and its prospecting significance[J]. Mineral Deposits, 31(3): 405–416 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guobin, Han Chao, Yang YanChen, Liang Bing, Wei Yanlan, Han Shijiong. 2018. Zircon U–Pb age, geochemistry and genesis of acid intrusive rocks in the Yuejinshan Skarn type copper–gold deposit, Wandashan block [J]. Geology in China, 45(5): 977–991 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yunxiang. 1988. China Panxi Rift [M]. Beijing: Geological Publishing House, 274–282(in Chinese).
- Zhao Pengda, Chi Shundu. 1991. A preliminary view on geological anomaly [J]. Earth Science–Journal of China University of Geosciences, 16(3): 241–248(in Chinese).
- Zhao Pengda, Meng Xianguo. 1993. Geological Anomalies and Mineral prediction [M]. Journal of Earth Science, 18(1): 39–47(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Wu Liangshi, Bai Ge, Yuan Zhongxin, Ye Qingtong, Huang Mingzhi, Rui Zongyao, Sheng Jifu, Lin Wenwei, Deng Songping, Mao Jingwen, Bi Chengsi, Dang Zefa, Wang Longsheng, Zhang Zuoheng, Chen Weishi. 2014. Metallogenic Regularity of Major Metal Deposits in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 25–27(in Chinese).
- Zhu Yusheng. 1993. On mineral deposit modeling [J]. Geological Review, 39(3): 216–222(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yusheng. 2006. Basic Theory of mineral resources assessment [J]. Acta Geologica Sinica, 80(10): 1515–1527 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yusheng. 2007. The Main Metallogenic Geological Features and the Deposit Metallogenic Lineage of China [M]. Beijing:

- Geological Publishing House, 284–292 (in Chinese).
- Zhu Yusheng. 2016. Mineral resources assessment: A new combination model of scientific research with mineral exploration [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2454–2463 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yusheng, Mei yanxiong, Dong Jianhua. 2010. Geological positioning type of deposit [J]. *Mineral Deposits (SI)*, 29: 763–764 (in Chinese).
- Zhu Yusheng, Wang Quanming, Zhang Xiaohua, Fang Yiping, Xiao Keyan. 1999. Some problems on division of metallogenic belts in China [J]. *Geology and Prospecting*, 35(4):1–4 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yusheng, Ding Jianhua, Ma Yubo. 2016. Discussion on fusion relations between metallogenic series and metallogenic belt [J]. *Geological Review*, 39(3):85–86(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yusheng, Xiao Keyan, Ma Yubo, Ding Jianhua. 2013. The History and Present Situation of the Division of Urban and Rural areas in China [M]. *Journal of Geology*, 349–354(in Chinese).
- Zhu Yusheng, Xiao Keyan, Song Guoyao, Yan Shenghao, Chen Zhenghui, Mei Yanxiong, Li Chunjie, Liu Yaling, Wang Meiyu. 2007. Geological Characteristics and Mineralization Spectrum of Belt Deposits in Major Metallogenic Areas of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 286–291 (in Chinese).
- 构造预测图[M]. 北京: 地质出版社, 162–166.
- 斯达拉斯金 В И. 2014. 矿床成因论[M]. 莫斯科: 莫斯科大学书屋出版社, 233–236.
- 斯米尔诺夫 В И. 1976. 矿床地质学[M]. 莫斯科: 莫斯科地球出版社, 64–399.
- 孙启祯. 1994. 边缘成矿与成矿边缘效应[J]. *地学前缘*, 1(3–4): 176–182.
- 孙启祯. 1999. 边缘成矿与成矿预测[C]// 陈毓川. 当代矿产资源勘查评价的理论与方法. 北京: 地质出版社, 26–33.
- 王庆飞, 邓军, 刘学飞, 张起钻, 李中明, 康微, 蔡书慧, 李宁. 2012. 铝土矿地质与成因研究进展[J]. *地质与勘探*, 48(3): 430–448.
- 吴淦国, 邓军. 1999. 金属矿床矿田构造的研究现状[M]. 北京: 地震出版社, 142–149.
- 武广, 朱裕生. 2016. 成矿单元内涵及级别划分的探讨[J]. *地质论评*, 62(增刊): 233–234.
- 肖克炎, 孙莉, 朱裕生. 2016. 矿产资源评价理论[J]. *地质论评*, 62(增刊): 63–64.
- 叶天竺, 吕志成, 庞振山. 2014. 勘查区找矿预测理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 14–15.
- 张长青, 叶天竺, 吴越, 王成辉, 吉海, 李莉, 张婷婷. 2012. Si/Ca 界面对铅锌矿床定位的控制作用及其找矿意义[J]. *矿床地质*, 31(3): 405–416.
- 张国宾, 韩超, 杨言辰, 梁冰, 韦延兰, 韩世炯. 2018. 完达山地块跃进山砂卡岩型铜金矿区酸性侵入岩锆石 U–Pb 年龄、地球化学特征及成因[J]. *中国地质*, 45(5): 977–991.
- 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 1988. 攀西裂谷[M]. 北京: 地质出版社, 274–282.
- 赵鹏大, 池顺都. 1991. 初论地质异常[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 16(3): 241–248.
- 赵鹏大, 孟宪国. 1993. 地质异常与矿产预测[J]. *地球科学*, 18(1):39–47.
- 赵一鸣, 吴良士, 白鸽, 袁忠信, 叶庆同, 黄民智, 芮宗瑶, 盛继福, 李文蔚, 邓颂平, 毛景文, 毕承思, 党泽发, 王龙升, 张作衡, 陈伟士. 2004. 中国主要金属矿床成矿规律[M]. 北京: 地质出版社. 25–27.
- 朱裕生. 1993. 论矿床成矿模式[J]. *地质论评*, 39(3): 216–222.
- 朱裕生. 2006. 矿产预测理论[J]. *地质学报*, 10(80): 1515–1527.
- 朱裕生. 2007. 中国主要成矿区(带)成矿地质特征及矿床成矿谱系[M]. 北京: 地质出版社, 284–292.
- 朱裕生. 2016. 矿床区划——地质科学研究与矿床勘查结合的新形式[J]. *地质学报*, 90(9): 2454–2463.
- 朱裕生, 丁建华, 马玉波. 2016. 矿床成矿系列与成矿区带融合关系的探讨[J]. *地质论评*, 62(增刊):85–86.
- 朱裕生, 梅燕雄, 董建华. 2010. 矿床(体)地质定位型式[J]. *矿床地质*, 29(增刊): 763–764.
- 朱裕生, 王全明, 张晓华, 方一平, 肖克炎. 1999. 中国成矿区(带)划分及有关问题[J]. *地质与勘探*, 35(4): 1–4.
- 朱裕生, 肖克炎, 马玉波, 丁建华. 2013. 中国城乡区带划分的历史与现状[J]. *地质学刊*, 349–354.
- 朱裕生, 肖克炎, 宋国耀, 阎升好, 陈郑辉, 梅燕雄, 李纯杰, 刘亚玲, 王美玉. 2007. 中国主要成矿区带成矿地质特征及矿床成矿谱系[M]. 北京: 地质出版社, 286–291.

附中文参考文献

- 陈毓川. 1993. 中国矿床成矿模式[M]. 北京: 地质出版社, 8–17.
- 陈毓川. 1999. 矿床成矿系列与成矿预测[M]. 北京: 地震出版社, 15–19.
- 陈毓川. 2011. 实现找矿突破的探索[J]. *矿床地质*, 30(5): 768–772.
- 陈毓川, 裴荣富, 王登红, 王平安. 2015. 论矿床的自然分类——四论矿床的成矿系列问题[J]. *矿床地质*, 34(6), 1092–1106.
- 陈毓川, 王登红, 徐志刚, 李天德, 傅旭杰. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律[M]. 北京: 原子能出版社, 180–184
- 程裕淇. 1994. 中国区域地质概论[M]. 北京: 地质出版社, 432–441.
- 黄崇軻, 朱裕生, 张忠伟. 1997. 南岭银矿[M]. 北京: 地质出版社, 194–198.
- 黄崇軻, 白治. 2001. 中国铜矿床[M]. 北京: 地质出版社, 26–31.
- 李中明, 燕长海, 刘学飞, 赵建敏, 刘百顺. 2012. 河南省新安县郁山隐伏铝土矿成因分析[J]. *地质与勘探*, 48(3): 421–429.
- 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 2005. 中国新疆铜矿床和镍矿床[M]. 北京: 地质出版社, 263–265.
- 吕古贤, 武际春, 王殿良, 韩璐. 2012. 我国整装勘查区工作中的矿田地质找矿问题[J]. *矿床地质*, 31(增刊): 1164.
- 吕林素, 汪云峰, 李宏博, 周振华, 张作衡, 谢桂青. 2011. 南非布什维尔德岩浆型 Cu–Ni–PGE 硫化物矿床成因探讨[J]. *矿床地质*, 30(6): 1131–1148.
- 罗铭玖. 1992. 河南金矿概论[M]. 北京: 地质出版社, 331–333.
- 毛景文, 张作衡, 裴荣富. 中国矿床模型概论[M]. 北京: 地质出版社, 42–97.
- 邱亮斌, 胡火炎. 1992. 白面山锡石硫化物矿床成矿物质来源探讨[J]. *大地构造与成矿学*, 16(1): 109–110.
- 舍赫特曼 И А, 科罗列夫 В А, 尼基福罗夫 Н А. 1982. 热液矿床详细