

金属矿床地质的发展

—纪念《矿床地质》创刊十周年—

郭文魁

(地质矿产部地质研究所)

内容提要: 矿床知识来自矿业。有关矿石成因的争论曾引导到野外现场实际观察的良好趋向。20世纪中叶以来,先后应用先进的设备仪器以及如同位素和流体包裹体等对矿床进行研究;这不仅扩大了成矿作用的视野,而且更加深入洞察矿石的习性。然而,有关矿石成因与来源问题的争论仍在继续;不过进入了更深的层次。欲探索矿石形成的客观规律,最合理的方法是结合野外的现场观察进行室内的仔细研究。

主题词: 金属矿床 矿业 现场观察 室内研究

《矿床地质》期刊创刊于“文化大革命”之后。“文革”十年,我国老少矿床地质人员,大多中断了自己的岗位工作,为时虽有久暂之差别,但都曾卷入到“文革”的浪潮。可是就在这一时期国外却由于野外调查工具的创新与室内观察仪器的改进,在新资料积累的基础上,提出不少令人瞩目的新设想与概念。回顾过去,瞻望未来,可温故而知新,有助于认识我们在矿床地质研究方面和在矿床地质发展的历程中所处的位置,以推进有关的研究工作。

矿床学发源于采矿事业。如将玛瑙、玉髓、铁碧玉和石英等石器作为原始采挖的产物,那么从旧石器时代(约40万年前),中国就有了采矿的萌芽。有文字可查考的是《史记·封禅书》,其中记载有“黄帝采首山铜、铸鼎于荆山下。”这相当于新石器时代早期,即在公元前8000年前中国已开始采冶铜矿,并有金器制做。近年在辽宁建平红山文化遗址(约公元前4000年)出土一红铜环,更有实物可为佐证。金申(M. L. Jensen等, 1979)推断约在新石器时代人类已熟习铜金,但缺乏确切考证。所以可以说中国的金属采冶最早。新石器时代晚期的甘肃东乡马家窑文化(约公元前3000年)遗址有青铜兵器出土。夏禹即世(约公元前3000年)则有青铜剑之铸造。而西方(Agricola, 1556)设想青铜金属出现于公元前3500年并在希腊开始采挖金银(公元前2500—前356年)。东西方的论证大体一致。殆至商朝(公元前1600—前1100年),湖北大冶铜录山和江西铜岭曾盛采铜矿,且已有极其精致的金箔制成。埃及西奈半岛开采孔雀石(公元前1500年)。周朝(公元前1100—前256年)曾专设执掌矿业之“矿人”,以“掌金玉锡石之地,……”,可见当时矿业之盛。据已出土的金属文化古物之分析,周末以前中国采冶范围至少已有金、银、铜、铅、汞、铁和少许铬。晋朝(公元265—420年)才有以铜镍合制白铜之记载,镍的采冶以中国为最早。中国古代人民对采矿的实践,逐步积累为矿床地质的朴素认识。在《管子·地数篇》(成书于公元前180年前)中记载:“上有丹沙者,下有黄金;上有慈石者,下有铜金;上有陵石者,下有铅锡赤铜;上有赭者,下有铁。”这是当时矿床金属分带与地

表次生淋滤的简明概括, 虽不精密完整, 但在历史上甚至现代曾起了指导找矿的一定作用。

几乎与管子同代, 希腊有金在石英中产出之报道(Herodotus, 公元前484—前425年), 而哲学家亚里士多德的一个学生在“石头之书”(Theophrastus, 公元前372—前287年, Book of stones)中描述了16个矿物, 而分为金属、石头与土三类。这应是矿物学的萌芽。而关于矿床地质的学说大部分是由古老希腊与罗马哲学家所推论的。柏拉图观察火山见到矿石物质从局部水汽中结晶出来, 而倡导矿石喷发成因。与之同时的斯特雷波根据金生脉中(Strabo, 公元19年)考虑地球生长矿石可与神秘“金树”所结果实类比。后一概念曾在博物学者中流行一时, 认为其枝干当为不同种类的金属, 而其根则向下伸向地球中心。这二种不同概念都缺乏地下矿石的第一手知识, 但却对矿床地质的研究留下丝缕不断的影响。

贯穿中世纪的黑暗时代, 除了阿维申那(Avicenna, 公元980—1037年)将亚里士多德的著作译为阿拉伯文而将矿物分为石头、硫矿物, 金属与盐类; 且确认硫化物矿物外, 对先前哲学家的概念少有增改。由于受封建与宗教迷信的束缚, 中外都一度出现以树枝占卜找矿的事情。中国古代找矿与开采的方法直到明崇祯年间在《天工开物》一书(公元1637年)才加追记与描绘。西方 G. 鲍尔(G. Bauer, 拉丁化为 Agricola)曾在德国一矿区(Erzgebirge)现场观察, 写出有关金属矿石成因的著作《De Re Metallica》(1556), 其中不仅绘出当时探采的实况, 并开始按成因将矿床分为冲积的与原地的两大类; 而且论断: (1) 矿石通道晚于围岩; (2) 矿石是从循环于通道之溶液中沉淀出来的。他的工作标志着从概念推断到实地观察的过渡。一个世纪之后, 鲍尔的同胞一个炼金术士和哲学家柏切尔(Becher, 1669)在表达其对矿产地质认识的一草图中, 却将十多种金属嵌入山区的基岩中, 近被英国理查德(David Richard, 1989)认为是早期朴素的成矿想像图。

17世纪中叶, 在意大利工作的一个瑞典人(Nicolaus Steno, 1669)认识到矿石是沿裂隙上升汽体凝结的产物, 当时为一先进的概念。殆至十八世纪中期, 矿床地质的不同实际资料主要是在德国一个矿区(Erzgebirge)先后积累起来的, 从而得出不同的认识。如柏克尔(Becker, 1703)、亨克尔(J. S. Henkel, 1725, 1727), 纪墨曼(C. F. Zimmerman, 1746), 冯·欧泼尔(F. W. Von Oppel, 1749)和李曼(Lehman, 1753)等, 他们的主要观点是地球内部的喷气作用(Exhalation)从深部带动金属上升而沉积在裂隙中。后来德刘士(C. T. Delius, 1770, 1773), 吉尔哈德(Gerhard, 1781)和卡喷梯尔(J. F. Carpentier, 1779, 1799)等进一步解释为扩散上升水(diffused ascending water), 在此上升水经过之区, 溶解分散在岩石中的金属细粒, 而成为含矿溶液。这实质上是围岩蚀变和侧分泌学说之萌芽; 而德刘士又首先认识到大气营力所造成矿石表面的蚀变, 应是地表矿石次生作用之萌芽。这些萌芽长久被忽视了, 直到十九世纪初期山德堡格(Eridolin Sandberger, 1822)发表其“关于矿脉的研究”一文, 才广为接受。

18世纪晚期, 二个完全相反的观念统治了矿床地质的思路。一个是火成论者赫顿(Jame Hatton), 他的《地球之理论》(Theory of the Earth, 1788)首次给侵入岩与变质岩下了定义。他主要从观察岩石入手, 认为火成岩与矿床都衍生自深部熔融的岩浆, 矿石物质呈熔态注侵到构造裂隙中, 坚持金属不会从水溶液中沉淀出来。另一个是水成论者魏尔纳(A. G. Werner), 他在《矿脉形成新理论》(Neue theorie der Entstehung der gonge, 1791)中坚持矿脉是由原生宇宙海水派生出的下降淋滤水形成的。他主要从观察矿脉入手,

认为不仅沉积物;而且所有火成岩和变质岩都是沉淀的。

火成论者与水成论者之间的争论促进了对岩石与矿物产状的观察,积累了许多新资料,到19世纪早期,使不少地质学家如:海姆(J. I. Heim),冯·赫姆保尔特(A. von Humboldt)和德·沃衣申斯(D. de Voisins)等认识到不同矿石如镍、锡与不同类型侵入岩之间的空间与可能的成因关系,与围绕火成活动中心的矿床带状分布现象,这应是岩石成矿专属性与矿床区域带状分布的萌芽。其后,开始用实验方法研究矿床(A. Daubree, 1841)和提出花岗岩体渗出(exudation)水溶液形成矿脉说(Scheerer, 1847)。19世纪中叶法国德·卜蒙(Elie de Beaumont)提出当时最有影响的论文,他将大多数矿床看做是火成活动的一个相,除加深岩浆分凝成矿作用(磁铁矿、铬铁矿)的认识外,强调与发展热水溶液的重要性,并认识与描述了侵入火成岩接触变质带的交代矿石。与之同时有些地质学家开始引用化学原理到矿床地质中,从而初步形成大气水侧分泌理论(K. G. Bischof, 1847)。冯·科塔(B. Von Cotta, 1859),在“论矿床学”中初步论证温度压力条件对矿物带状分布与表生作用的制约关系,其“平衡”论对矿床地质有深远影响。19世纪晚期,许多矿床地质学家对矿石搬运和沉积的理论作出贡献,其中突出的有冯·科塔,山德堡格(F. Sandberger, 1882),斯特尔兹纳(A. W. Stelzner, 1879),德·郎奈(L. de Launay, 1892),帕希波尼(F. Psoepny, 1884),菲利普斯(J. A. Phillips, 1875)和沃格特(J. H. L. Vogt, 1893)等。德·郎奈首次提出金属成矿论(Formation des gites métallifères ou métallogénic, Paris, 1892)。由于野外资料的积累,排除不切实际的概括。矿床地质学家理解到没有任何单一理论能以解释所有矿床成因。

20世纪早期,经济地质成为科学的重要分枝(F. L. Ransome, 1901; H. W. Emmons, 1919)。德·郎奈强调成矿论是地质学的重要分枝并初步提出成矿期、成矿系列与成矿区划的概念(L. de Launay, 1905)。地质构造在确定矿石位置与引导含矿流体到适当处所而沉积起了重要作用(F. L. Ransome, 1901, 1909, 1911; B. Prescott, 1915; F. L. Stillwell, 1919),有的认为大气水下渗加热再上升成矿(C. R. Van Hise, 1905)并提出大气冷水在浅部成矿的实例(W. H. Emmons, 1906)。另一方面则进一步论证矿化溶液的火成来源(J. F. Kemp, 1901; Woldemer Lindgren, 1901; W. H. Weed et al., 1903; H. Stögen, 1908),一时广为接受,随之交代作用方式被广泛认识(W. Lindgren, 1925),且较简单的化学变化知识应用在解释矿化作用方面,逐渐扩大;从组分的堕性与活性以论证扩散(diffusion)与渗浸(infiltration)交代作用(D. S. Korzhinskii, 1936)。并开始以碱性改造作用(Bown和Fenner, 1938)与沉积改造作用(J. Bridge, 1950)分别讨论有关矿石的改造富集。

20世纪初,矿床成因分类在世界知名矿床地质学家共同讨论的基础上(Richard, 1905),林格伦(W. Lindgren, 1907, 1913, 1933)逐步增改而将矿床首先分为机械富集与化学富集两大类。在化学富集大类中又再依据其产自地表水、产自岩浆、或产在岩体内的矿床,细分为三个亚类。其中热水矿床(hydrothermal deposits)又按其形成时的温度与深度再分为高、中、低温三个类型。在其分类的应用过程中,先后发现一些问题,其他矿床学家又加以修正补充,其重要者有远成热水矿床(L. C. Graton, 1933),浅成高温热水矿床(A. F. Buddington, 1935),以及亚中温热水矿床和隐温热水矿床(J. D. Ridge, 1968)。

1975年将“热水 (hydrothermal)”这一术语的成因含义重新厘定,提出“热水”即是热的水 (hot water),不必一定与火成作用有关 (C. F. Park Jr., 1975)。另一方面斯帕尔 (J. E. Spurr, 1923) 支持帕尔特 (Thomas Belt, 1861) 过去火成论的见解,提出矿浆论 (The Ore magmas) 的专著。

稍后,欧洲矿床地质学者 (P. Niggli, 1929; H. Schneiderhohl, 1941) 也先后提出类似的矿床成因分类,他们更强调火山喷气 (流) 作用,首先提出自生黄铁矿细粒是细菌作用的想法 (H. Schneiderhohl, 1923) 和更强调生物化学作用 (P. Niggli, 1929)。

如果说20世纪前半期矿床地质学家以较多的精力讨论矿床成因分类,40年代则是构造、岩浆与热水学说风行之时。首先提出与花岗岩伴生的矿石是沉积岩变质作用的结果 (A. Loke, 1941),这是成矿元素活化的雏议。接着有矿石呈熔体从硅酸质岩石以下的深部沿构造上升而形成的构造岩浆论 (C. H. White, 1945),推断此熔体在上升途中从围岩中吸取一些水。按元素离子大小为依据以论断深层渗透作用的构造屏障论 (R. A. Hackey, 1946)。变质混染岩浆热水成矿论 (W. H. Kenedey, 1949)。构造岩浆成矿期与成矿带 (Yu. A. Bilibin, 1948)。热水对围岩的蚀变作用开始于矿化作用之前而结束于其后 (R. H. Sales和C. Meyer, 1948),热水活动的间歇性 (T. S. Lovering, 1949),以及开始成岩成矿的实验研究,测试硅酸盐与其他非挥发性物质在气体中的溶解度 (T. E. Gillingham, 1948)。岩浆结晶尾期出现碱性富水的溶液不混溶于残余硅酸盐熔体中 (F. G. Smith, 1948),以及硅酸盐与富铁磷酸盐的熔离实验 (R. Fischer, 1950)。

50年代正式提出花岗岩化和区域变质形成矿床的见解,在“花岗岩化与矿石” (C. T. Sullivan, 1948) 一文的基础上,发展为多次花岗岩化基性前锋富集矿化 (H. G. Backlund, 1952),花岗岩有关水的活化与矿化作用 (G. E. Goodspeed, 1953),以至提出再生溶液 (regenerated solution) 的概念 (H. Schneiderhohl, 1953)。推论海下有岩浆喷流-沉积混合矿床之形成 (G. C. Taupitz, 1954)。而“层控矿床”一词已经流行 (H. E. Mackinstry, 1955),同位素地质学问世 (K. Rankama, 1954) 引致更多的理论地球化学家从事含矿流体性质与运移机制的探讨,已经测定的矿物流体包裹体资料多支持含矿流体为络合物真溶液 (J. D. Ridge, 1956)。通过实验提出影响含矿流体性质的四个主要变量,即温度、压力、离子与活动系数 (H. L. Barnes et al., 1957),并用已知热力学参数计算了热水流体性质 (P. B. Barton, 1957) 以及岩浆气体的成分 (A. T. Ellis, 1957; K. B. Krauskopf, 1959),又试用物理化学以解释矿物共生组合 (D. S. Korzhinskii, 1959)。在这期间还提出矿源层的概念 (C. L. Knight, 1957),并开始编制大区域的成矿图以作区域成矿之分析 (P. M. Tatalinov, 1957) 和区域成矿之划分 (V. I. Smirnov, 1959),以探索成矿的规律性。

60年代是矿床同生与后生成因观点的辩论再次兴起的时代,对既有同生又有后生特征的矿床提出叠生成因 (T. S. Lovering, 1965),促使矿床地质学家从不同途径对有关矿床进行仔细观察与深入研究。一方面引用同位素 (M. L. Jensen, 1958; R. S. Cannon, 1961; H. G. Thode, 1961)、热化学 (P. D. Parker, 1962; H. D. Holland, 1965)、生物化学 (K. L. Temple, 1964) 和热力学 (H. L. Barnes, 1967) 等从理论上加以分析与研究;一方面改进成岩成矿实验方法 (A. I. Nalderett, G. Kullerud, 1965—1966; C. Wgane Burnham, 1967; A. R. Phipatts, 1967) 以取得相应矿床的模拟材料;另一方面在G.索比(1885)的基础

上进行矿物流体包裹体的精细观察 (E. Rhoeder, 1965) 和野外尤其是海下与海岸如红海 (A. R. Miller, 1966) 与萨尔顿海 (D. B. White, B. J. Skinner, 1967) 的现场调查。增加了成矿元素的来源、运移、聚集和沉积等机理之认识的深度与广度, 使辩论层次更加深化。加拿大萨德贝理区的一个铜镍矿床开始提出陨石撞击成因 (R. S. Dietz, 1964)。关于层控矿床提出地热驱动卤水成因论 (C. F. Davidson, 1965)。由于资料之众多, 开始应用计算机加以处理, 有的处理结果支持矿液中有络合物之存在 (H. C. Helgsen, 1964)。以既有氢氧同位素组分为依据, 论证成矿热水之来源, 有的为岩浆源, 而更多的偏向大气水源或混合源。不过亦有矿床学家认为成矿流体来自深源 (V. I. Smirnov, 1968)。

随着多种多样矿床成因观念之出现, 野外勘查方法也在不断改进, 地球化学采样 (H. E. Hawkes, 与 J. S. Webb, 1962) 和地球物理研究的十几个型式是勘查中的标准程序, 并开始将航空与航天遥感方法应用到探测与填图方面 (Baringer, 1969)。

这一时期, 综合研究热水矿床地球化学曾提出七种围岩蚀变作用组合, 并试图以此去判别各该组合形成期的压力温度环境 (C. Meyer 与 J. J. Hemley, 1967)。

70年代以来, 在交代分带理论 (D. S. Korzhinskii, 1970) 的基础上, 发展出渗浸交代的层析理论 (A. Hofmann, 1972) 以及以粒间溶液扩散为主的双交代作用 (Bimetasomatism: J. D. Frantz 和 H. K. Mao, 1976), 后来对矽卡岩矿床分带的进一步研究认为既有扩散又有渗浸作用, 但这种分带仅可在温度与 CO_2 逸度不变而矿物局部平衡时才能形成。而实际的条件远为复杂 (M. T. Einaudi, M. D. Meinert, R. J. Newberry, 1981), 开始对“局部平衡”置疑。同时开展了活地热体系与热水矿床 (Donald E. White, 1981) 以及流体流与热水矿床成因的研究 (L. M. Cathles, 1981), 意即含矿流体在运动中进行矿化, 而未必达到“平衡”状态, 这是对百余年来传统“平衡”概念的冲击。又从化学特征将滨太平洋与矿化作用有关的类花岗岩进行成因分类, 主要分为原始火成与沉积重熔的两大类 (A. J. R. White et al, 1977; Shunso Ishihara, 1981)。创立了矿石学 (Ore Petrology), 侧重于矿石结构组分的研究 (R. L. Stanton, 1972), 较少强调岩浆作用。在东太平洋海隆的海底第一次进行现场观察“黑烟柱”喷流的成矿作用 (C. T. Hedgsen, 1977)。在矿床地质中提出岩浆、变质与沉积三大成矿系列 (V. I. Smirnov, 1982)。根据计算机储存有世界大部分矿床资料, 进行检索统计, 提出经验成矿学 (Empirical Metallogeny; P. Laznika, 1985), 推断成矿作用中之层控说与岩浆说之消长。由于仪器的改进, 可用质子诱导X射线与 γ 射线对原生流体包裹体发射而进行直接分析 (Alan J. Anderson et al, 1989); 在不同地质背景及不同侵位深度的侵入岩体以及同一构造矿化区内不同深度所采矿物流体包裹体和稳定同位素样品, 分析测定所获得的有关资料说明, 先前认为可用以确定成矿流体性质与来源的有关指标数据, 在区域上与深度上都有显著的变化, 也即是随着区域或深度不同的变量。如美国中央瓦萨奇 (Centrat Wasatch) 山区高盐度流体包裹体产在侵入体一定深度的沸腾地带, 更深则为低盐度富 CO_2 的流体, 先期岩石中高盐度流体包裹体远比其内所产石英脉内的流体的盐度为高 (David A. John, 1989); 而加拿大在欧卡纳加 (Okanaga) 谷同一矿区内, 浅成流体的氢氧同位素组分具有大气水的特性, 而产在古生界——中生界变质岩内的中深部位的含矿流体, 同位素则变为岩浆——大气水组分 (X. Zhang, B. E. Nesrett, K. Muehlenbachs, 1989)。事实说明精密的室内分析测定结果, 只有与野外的具体地质产状相结合, 才能得出合理论

断。单凭少数分析数据,以推论成矿流体之成因与来源,会迷糊事实的真象。

中国的现代矿床地质与世界的发展历程相似,也是从矿业发展起来的。自“五四”运动以来,才外为中用,结合中国的矿产地质特征逐步发展起来的。从矿产资源的调查开始(丁文江,1917,1919;翁文灏,1919),在成矿方面曾提出中国矿产区域论(翁文灏,1920),并从砷矿物开始论述了成矿系列(翁文灏,1927)。还建议用化学思路去调查研究火成侵入作用(李四光,1924)。为中国的钢铁工业评估资源曾开展铁矿床与硫矿的调查与研究(谢家荣,1915,1918,谢家荣,刘季辰,1926),并提出中国铁矿床之分类(谢家荣,1923)。20世纪早期开始到国外学习并从事矿床地质学者先后有谢家荣,孟宪民、冯景兰和郑厚怀等,他们先后将国外当时流行的有关矿床地质的学说引进国内。而在中国矿床地质方面工作最多贡献最大的首推谢家荣,他60年代所著《中国矿床学》,直到1989年才能问世。其中许多论点显然受当时国外学术思潮之影响。自1949年新中国建立以来,国家有计划地开展大量地质矿产工作,因而在普查、勘探与矿床地质研究方面积累了大量宝贵资料,许多矿床地质学家写出不少论著,大多随着世界上有关潮流不断前进,并提出我国矿床地质的区域特色。

矿床地质研究基本上是一门野外科学。精确的室内测定与实验资料可供开拓思路与提高理解程度,但必需结合矿床的客观实际条件而辩证的看待与审慎的应用。世界最大的且研究十分深入的矿山仍然遇到争论问题。如对矿石物质搬运与沉积成矿的最基本问题依然意见分歧,没有彻底解决。现在对已知矿床找出两个或更多成因设想或“模型”较为普遍;而令人满意地揭露其实际成因则较少。成矿作用既有明显的区域性又在时间上有演变性,近年美国矿床学家也承认成矿作用在地质历史中的多旋回性(C. Meyer, 1981),欲以某一设想或“模型”而概括,为时尚早。例如有些块状硫化物和氧化物的矿体,曾经描述为岩浆分异的直接产物,实为稀溶液或气体加入的交代产物或为海底溢出热水泉的沉积产物。近年多次到深海沟对“黑烟柱”喷发“卷流”(Plume)的直接观察,现场采样的分析,许多人得到共同的认识。理论来源于实践,而实践才是检验真理的唯一标准。许多矿床地质中的设想有待引用先进技术在有关区域和典型矿山进行深入细致的工作,往复实践,不断提高,以逐步接近客观真理,而提高地质找矿理论的可行性。

参 考 文 献

- [1] 谢家荣 1918 自然硫矿的成因 科学 第3卷 第9期 第959—966页
- [2] 翁文灏 1919 中国矿产志略 农商部地质调查所专报 乙种一号
- [3] 翁文灏 1920 中国矿产区域论 农商部地质调查所汇报 第一号 第19—24页
- [4] 谢家荣 1923 中国铁矿床之分类与其分布 科学 第8卷 第5期
- [5] 李四光 1924 A suggestion of a new method for geological survey of igneous intrusions:中国地质学会志 第3卷 第2期 第109—115页
- [6] 谢家荣、刘季辰 1926 湖北西南部之铁矿床 中国地质学会志 第5卷 第2期 第141—148页
- [7] 翁文灏 1927 砷矿物在成矿系列中之位置 中国地质学会志 第5卷 第1期 第61—63页
- [8] 谢家荣 1930 煤岩学研究之新方法 中国地质学会志 第9卷 第3期 第311—320页
- [9] 谢家荣 1931 安徽南部铁矿之研究 中国地质学会志 第10卷 第317—346页
- [10] Agricola (Bauer), G., 1556, De Re Metallica (Engl. tr. by H. C. Hoover and L. H. Hoover, New York: Dover, 1950).

- [11] Anderson, Alan J. et al., 1989, Proton-induced X-ray and Gamma ray emission analysis of unopened Fluid Inclusions: *Econ. Geol.* Vol. 84, p. 924—939.
- [12] Backlund, H. G., 1952, Some aspects of ore formation, Precambrian and later: *Edinburgh Geol. Soc. Tr.* Vol. 14, pt. 3, p. 302—335.
- [13] Barnes, H. L. and Czamanske, G. K., 1967, Solubility and transport of ore minerals, in: *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, ed: H. L. Barnes, New York: Holt, Rinehart and Winston.
- [14] Bilibin, Yu. A., 1955, Metallogenic provinces and metallogenic epochs (in Russian); *GOSGEOLTECHZDAT*, MOSCOW.
- [15] Bridge, J., 1956, Bauxite deposits of the Southwestern United States: p. 170—201. in Snyder ed: *Symposium on Mineral Resources of the S. W. United States*, Univ. Tenn. Press.
- [16] Cannon, R. S. Jr., et al., 1961, The data of lead isotope geology related to problem of ore genesis: *Econ. Geol.* Vol. 56, p. 1—38.
- [17] Cathles, L. M., 1981, Fluid flow and genesis of hydrothermal ore deposits: *Econ. Geol.* 75th Ann. Vol., p. 392—423.
- [18] de Launay, L., 1913, *Traité de Métallogénie—Gîtes Minéraux et Métallifères*: Tome 1, Paris et Liege.
- [19] de Launay, L., 1892, *Formation des gîtes métallifères et métallogénie*, Paris.
- [20] Dietz, R. S., 1964, Sudbury structure as an Astrobleme: *Jour. Geol.* Vol. 72, p. 412—434.
- [21] Einaudi, M. T., et al., Skarn Deposits: *Econ. Geol.* 75th Ann. Vol., p. 317—391.
- [22] Emmons, W. H., 1940, *The Principles of Economic Geology*. 2nd ed. 520p. McGraw—Hill Book Co. Inc.
- [23] Frantz, J. D. et Mao, H. K., 1976, Bimetasomatism resulting From intergranular diffusion: I. A theoretical model for monomineralic reaction zone sequence: *Am. Jour. Sci.*, Vol. 276, p. 817—840.
- [24] Frietsch, R. et al., 1979, The ore deposits in Finland, Norway and Sweden—A Review, *Econ. Geol.* Vol. 74, No. 5, p. 975—1001.
- [25] Goodspeed, G. E., 1952, Mineralization related to granitization: *Econ. Geol.* Vol. 47, p. 164—168.
- [26] Graton, L. C., 1940, Nature of the ore-forming fluid: *Econ. Geol.* Vol. 35, Supplement to No. 2, p. 157—358.
- [27] Graton, L. C. and Bowditch, S. I., 1936, Alkaline and acid solutions in hypogene zoning at Cerro de Pasco: *Econ. Geol.*, Vol. 31, p. 651—698.
- [28] Guild, P. W., 1973, Distribution of metallogenic provinces in relation to major earth fractures.
- [29] Helgeson, H. C., 1964, *Complexing and hydrothermal ore deposition*: Macmillan New York (Pergamon Press), 128p.
- [30] Ishihara, Shonos, 1981, The granitoid series and mineralization: *Econ. Geol.* 75th Ann. Vol., p. 458—484.
- [31] Jensen, M. L., 1958, Sulfur isotopes and the origin of sandstone type uranium deposits (Colorado Plateau and Wyoming): *Econ. Geol.* Vol. 53, p. 598—618.
- [32] Jensen, M. L. and Bateman, A. M., 1979, *Economic Mineral Deposits*, 3rd ed 593p. John Wiley & sons, New YORK.
- [33] John, D. A., 1989, Geologic setting, depth of emplacement and regional distribution of fluid inclusions of Central Wasatch Mountain, Utah: *Econ. Geol.* Vol. 84, No. 2, p. 386—409.
- [34] Korzhinskii, D. S., 1936, Mobility and inertness of components in metamorphism: *Akad. Nauk, SSSR. IZV. Ser. Geol.* I, p. 58—61.
- [35] Korzhinskii, D. S., 1965, The theory of systems with perfectly mobile components and processes of mineral formation: *Am. Jour. Sci.*, Vol. 263, p. 193—205.
- [36] Korzhinskii, D. S., 1970, *Theory of metasomatic zoning* (Trans: Jean Agrell): New York, Oxford

- Clarendon Press, 162p.
- [37] Krauskopf, K. B., 1967, *Introduction to Geochemistry*: McGraw-Hill, New York.
 - [38] Laznicka, P., 1985, *Empirical Metallogeny, Vol. I, Phanerozoic environments, Associations and Deposits, Part A*: Elsevier, Amsterdam.
 - [39] Loke, A., 1941, *Granite and ore*: Econ. Geol. Vol. 36, p. 448—454.
 - [40] Mackay, R. A., 1946, *The control of impounding structures on ore deposition*: Econ. Geol. Vol. 41, p. 13—46.
 - [41] McKinstry, H. E., 1955, *Structure of hydrothermal ore deposits*: Econ. Geol. 50th Ann. Vol., pt. 1 p. 170—225.
 - [42] Meyer, C., 1981, *Ore-forming in Geologic history*: Econ. Geol. 75th Ann. Vol., p. 5—41.
 - [43] Mitchell, A. H. G. and Garson, M. S., 1981, *Mineral Deposits and Global Tectonic Settings*: Academic press, London.
 - [44] Neabitt, Bruce E. et al., 1989, *Genetic implication of stable isotope characteristics of mesothermal Au deposits and related Sb and Hg deposits in the Canadian Corellera*: Econ. Geol. Vol. 84, No. 6. p. 1489—1506.
 - [45] Niggli, p., 1929, *Ore deposits of Magmatic Origin*, Trans: H. C. Boydell: Thomas Hurby, London.
 - [46] Park, Charles F. Jr. and MacDiarmid, Ray A., 1975, *Ore Deposits*, 3rd ed. 530., W. H. Freeman & Co.
 - [47] Radkevich, E. A., 1956, *Les zone. métallogénique du primoris et les particularites de leur development geologie de la partie de 1^{re} Extreme-orient et de la Transbaikalie*: Geol. Bull. Rud. Mestorozdh. Petrog. Miner. Geokhim. Trans. Vy. 3.
 - [48] Rankama, K., 1954, *Isotope Geology*: McGraw-Hill, New York.
 - [49] Richard, David, 1989, *A special issue developed to current research on mineral deposits*: Econ. Geol. Vol. 84, No. 5, p. 997—1002.
 - [50] Ridge, J. D., 1968, *Changes and Developments in Concepts of Ore genesis 1933/1967 in Ridge ed. Ore Deposits of the United States, A. I. M. E. Inc. New York*, p. 1713—1812.
 - [51] Ridge, J. D., 1968, *Classification of Mineral Deposits, 1933/1967*, *ibid.* p. 1814—1834.
 - [52] Roedder, E., 1965, *Evidence from fluid inclusions as to the nature of the ore-forming fluids: Symposium—Problems of post magmatic ore deposition*, Vol. 2, Prague, p. 375—384.
 - [53] Sales, R. H. and Meyer, C., 1948, *Wall rock alteration at Butte, Montana*: A. I. M. E. Tr., Vol. 41, p. 13—46.
 - [54] Schneiderhohl, H., 1941, *Lehrbuch der Erzlagerstättenkunde*, Jena: Gustav Fischer.
 - [55] Schneiderhohl, H., 1953, *Genetische Lagerstätten-gliederung auf Geotektonische Grundlage*: Neu. Sb. f. Mineral., Mh. Jahrgang, 1953, s. 47—89.
 - [56] Smirnov, V. I., 1968, *The sources of the ore-forming fluid*: Econ. Geol. Vol. 63, p. 380—389.
 - [57] Smirnov, V. I., 1982, *Ore Deposit Geology*, 4th ed (in Russian): Nedro, Moscow.
 - [58] Spurr, J. E., 1923, *The Ore Magma*: McGraw-Hill, New York.
 - [59] Stanton, R. L., 1972, *Ore Petrology*: McGraw-Hill, New York.
 - [60] Tatarinov, P. M. et al., 1957, *General principles of regional metallogenetic analysis and methods, to compile metallogenetic map of folded area: (in Russian) : Gosgeoltechmzdat, MOSCOW.*
 - [61] Taupitz, G. C., 1954, *über sedimentation diagenese, metamorphose, magmatismus und die entstehung der erzlagerstation*: Chemie der Erde, Bd. 17, H. 2, S. 104—164.
 - [62] Thode, H. G. et al., 1961, *Sulfur isotope geochemistry*: Geochim. et Cosmochim. Acta. Vol. 25, p. 150—174.
 - [63] White, A. J. R. et al., 1977, *Granitoid types and mineralization with special reference to tin: Circum-Pacific plutonium Proj. Mtg. 7th Toyama, Japan, 1977*, p. 89—100.

- [64] White, D. E., 1981, Active Geothermal system and hydrothermal ore deposits: Econ. Geol. 75th Ann. Vol. p. 392—423.
- [65] Zhang, X., Nesbitt, B. E. and Muchlenbachs, K., 1989, Gold mineralization in the Okanagan valley, Southern British Columbia: Fluid inclusion and stable isotope studies: Econ. Geol. Vol. 84, No. 2, p. 410—424.
- [66] Ding Wenjiang, 1917, The mining industry of China. (personal manuscript).
- [67] Ding Wenjiang, 1919, The mineral resource of China: Far East Review, Feb. p. 80—83.
- [68] Xie Jiarong, 1927, The pyrite deposits and sulphur industry of China: in *Proceedings of 14th Intern. Geol. Congr.*
- [69] Zhu Xiren, 1933, The Copper deposits of China, in *Copper resources of the world: Rept. 16th Intern. Geol. Congr.* p. 603—680.

A REVIEW ABOUT THE DEVELOPMENT OF ORE DEPOSIT GEOLOGY

Guo Wenkui

(*Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing*)

Abstract

The knowledge of ore deposits began with metal mining. According to the antiquities unearthed recently, China appears to be the earliest country in copper and gold mining. While Guanzi (the 7th century B. C.) recorded some plain ideas about vertical ore zoning raised by ancient experienced Chinese miners, the western philosophers were only making different speculations about possible ore-forming processes on the basis of a little firsthand material. The controversy in opinions about ore genesis resulted in a good trend of field observation.

At the beginning of twentieth century, vast accumulations of observational documents made it possible to suggest reasonable theory and classification of ore deposits. Since the mid-20th century, due to the application of advanced equipments, instruments and varied new means such as isotopes and fluid inclusions to the study of ore deposits, not only the field of vision on metallogenesis has been enlarged but also the insight into habitual features of ores deepened. The dispute about the ore origin and source has been still going on, but more profoundly in the arrangement of ideas. A few recent interesting papers on the variation of stable isotopes and the characteristics of fluid inclusions reveal that these unique parameters used as indices to detect the probable genetic process and source of ores are actually variables in time and space. Therefore, the most reasonable way to approach the objective law of ore deposition is to combine the laboratory research with the on-the-spot field observation.