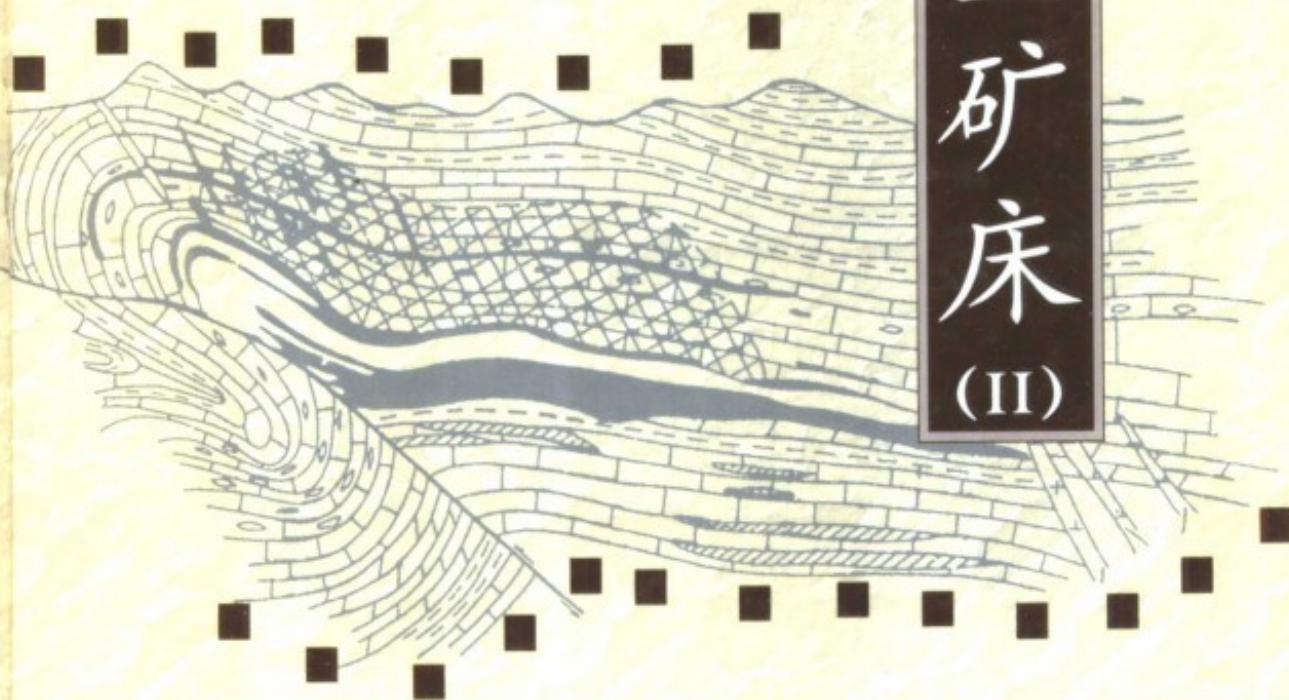


赵振华 涂光炽 等著

中国超大型矿床 (II)



(P-1408.0101)

责任编辑: 谢洪源, 李增全 封面设计: 王 浩



ISBN 7-03-011908-8



9 787030 119087 >

ISBN 7-03-011908-8

定价: 100.00 元

中国超大型矿床 (Ⅱ)

赵振华 涂光炽 等著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是“九五”国家攀登项目(95-预-25)“与寻找超大型矿床有关的基础研究”的主要成果之一。“八五”攀登计划中同一名称的项目(A-30)已于2000年出版了《中国超大型矿床(I)》,本书为其(II)。内容包括:重大地质作用,地质时代与超大型矿床,重要超大型矿床远景类型和超大型矿床形成的宏观地质背景。重点论述了元素超常富集,壳幔相互作用,铅、稀土暴发成矿和晋宁晚中生代超大型矿床形成的地球化学动力学背景,大面积低温成矿域,富碱火山-侵入杂岩金、铜矿床及独立银矿床,古环境,岩石圈地球化学边界时空结构,克拉通边缘与超大型矿床的形成及全球超大型铜矿成矿地质背景等。本书还论述了古大陆裂解、基底、地球演化重大事件对超大型矿床形成的控制以及建立国家资源安全体系的基础研究问题。

本书主要读者对象为从事地质、矿床、地球化学研究与教学,以及找矿勘探的人员。

图书在版编目(CIP)数据

中国超大型矿床(II)/赵振华,涂光炽等著. —北京:科学出版社,2003

ISBN 7-03-011908-8

I. 中… II. ①赵…②涂… III. 矿床—中国 IV. P617.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 067601 号

责任编辑:谢洪源 李增全/责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬/封面设计:王浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2003年10月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2003年10月第一次印刷 印张:40

印数:1—1 200 字数:935 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈杨中〉)

前 言

本书是国家“九五”计划期间国家攀登计划中“与寻找超大型矿床有关的基础研究”项目(95-预-25)的成果。它是“八五”期间该计划的继续。自20世纪80年代末涂光炽院士提出在我国开展并领导超大型矿床基础研究以来,科学技术部连续两次将之列入国家攀登计划。该项目汇集了中国科学院、国土资源部、教育部及有色金属总公司、核工业总公司等系统的科研、教学人员,重点开展了我国若干典型矿床剖析、形成超大型矿床的区域地质背景、成矿条件、远景区、超大型矿床关键类型等研究,在此基础上,“九五”期间的研究重点集中在重大地质作用、重要超大型矿床远景类型及超大型矿床形成的宏观地质背景等方面进行了多学科综合研究,本书即是这些研究成果的总结,集中反映了上述各方面的重要成果和进展。

本书包括三篇,十一章。各部分执笔及主要参加者如下:绪论篇涂光炽;第一章许继峰,刘义茂,彭建堂;第二章刘秉光,王江海,解广轰,边千韬,周江羽,汪道京,胡素芳,钟宏;第三章裘愉卓,高计元,王一先,张乾,秦朝建,温汉捷;第四章周新华,李献华,邱华宁,杨进辉,张连昌;第五章胡瑞忠,王国芝,苏文超,彭建堂,毕献武;第六章赵振华,王强,熊小林,包志伟;第七章李朝阳,梁华英,刘铁庚,王秀璋,程景平,邓海林,叶霖;第八章陈多福,范德廉,张焘,卢家烂,陈先沛,叶杰,陈光谦;第九章朱炳泉,常向阳,张正伟,董云鹏;第十章刘伟,邓军,翟裕生;第十一章夏斌,陈根文,王冉,于俊峰;结语篇赵振华。

本着百家争鸣的精神,本专著对有关超大型矿床的各种学术思想、观点未加限制,但总体构思是《中国超大型矿床(I)》的延续,按照项目立项时首席科学家提出并经专家委员会审定的各课题研究内容而确定的。各章节分别由相关专题的牵头单位负责人定稿,全书定稿赵振华。

全书的内容安排如下:

绪论篇重点围绕古泛大陆对超大型矿床的制约、大规模成矿作用与地球演化重大事件之耦合、超大型矿床的时空分布、形成机制反演岩石圈演化、基底控矿、新矿床类型开拓等问题,讨论了寻找超大型矿床基础研究中的若干问题。第一篇以元素超常富集、壳幔相互作用、铅及稀土暴发成矿和晋宁晚中生代超大型矿床形成的地球化学动力学背景等为重点,论述了重大地质作用、地质时代与超大型矿床的形成。第二篇以大面积低温成矿域及超大型矿床的形成,富碱火山-侵入杂岩与超大型矿床金、铜矿床,独立银矿床及其形成超大型矿床过程为特点,探索了我国重要的超大型矿床远景类型及成矿作用。第三篇以古环境、岩石圈地球化学边界时空结构,克拉通边缘及全球超大型铜矿成矿地质背景等为重点探讨超大型矿床的形成的宏观地质背景。结语篇在概括超大型矿床基础研究所取得的主要进展的基础上,针对我国实施可持续发展战略面临的矿产资源严峻形势,从超大型矿床的研究对建立保证我国矿产资源安全体系进行了论述。

本专著的完成得到科学技术部、中国科学院广州地球化学研究所、中国科学院地球化学研究所、中国科学院地质与地球物理研究所、中国地质大学（北京）等单位的支持与关怀。项目的野外工作得到了有关省地质调查局及矿山和地质队的支持与帮助。本项目的实施单位为中国科学院。中国科学院科学出版基金支持了部分出版经费。中国超大型矿床研究的倡导者，本项目的顾问涂光炽院士为本项目和本专著的完成付出了大量心血并亲自撰稿，本书各章节的作者们为完成本书付出了辛勤的劳动，乔玉楼对本书稿进行统编，在此一并致谢。

作为一个研究项目，中国超大型矿床的研究告一段落，但这并不意味着中国超大型矿床研究的结束。相信在国家有关部门的大力支持下，我国地学科技工作者将继续共同努力，中国超大型矿床的研究与开发定会取得更大成果、立足世界前沿，并为保证我国国民经济持续发展提供充足资源。

赵振华

2003年3月5日

目 录

绪论篇 寻找超大型矿床基础研究中若干问题的思考

重要参考文献	13
--------------	----

第一篇 重大地质作用、地质时代与超大型矿床

第一章 元素超常富集与超大型矿床	17
第一节 元素金超常富集与超大型金矿床——以八卦庙大型-超大型金矿为例	18
第二节 元素锑的超常富集与超大型锑矿床	31
第三节 千里山-骑田岭岩(矿)带演化与钨、铋、锡超大型矿床	42
重要参考文献	56
第二章 壳幔相互作用对超大型矿床的制约	59
第一节 扬子西、西南缘壳幔相互作用与超大型矿床	59
第二节 青藏东缘新生代壳幔相互作用与超大型矿床	78
重要参考文献	94
第三章 铅和稀土暴发性超大型矿床的形成	97
第一节 中元古代铅和稀土的暴发性成矿	97
第二节 中元古代铅和稀土暴发性成矿的地球化学证据	100
第三节 中元古代铅和稀土暴发性成矿的地质背景——以内蒙古中西部为例	115
第四节 铅、稀土暴发性成矿与富碱岩浆活动的耦合	123
第五节 关键性矿床——白云鄂博矿床研究的新进展	125
重要参考文献	150
第四章 晋宁晚中新生代超大型矿床的形成及化学地球动力学背景	154
第一节 华南新元古代化学地球动力学背景	154
第二节 云南东川铜矿 ^{40}Ar - ^{39}Ar 成矿年龄研究	204
第三节 胶东地区金矿床地质、成矿时代与物质来源	223
第四节 胶东地区花岗岩和脉岩的形成时代和地球化学	239
第五节 华北东部地区超大型金矿化学地球动力学背景	252
重要参考文献	257

第二篇 重要超大型矿床远景类型及成矿作用

第五章 大面积低温成矿域及其超大型矿床的形成	267
第一节 西南低温成矿域内右江盆地低温矿床地质特征	267
第二节 成矿流体的性质	269
第三节 盆地流体流动与大面积低温成矿	273
第四节 流体流动的通道	278
第五节 低温成矿域内大型、超大型矿床的特征	283
第六节 低温成矿域内大型、超大型矿床的制约因素	298
重要参考文献	300
第六章 富碱火成岩与超大型金、铜矿床的形成	303
第一节 我国富碱火成岩的空间分布特征	303
第二节 我国与富碱火成岩有关的大型、超大型铜、金矿床及矿集区	306
第三节 富碱火成岩金、铜成矿机理分析	350
第四节 我国富碱火成岩形成超大型金、铜矿床的潜力分析	359
第五节 结论	364
重要参考文献	367
第七章 独立银矿床及其形成超大型矿床过程的探讨	372
第一节 粤中三水盆地富湾沉积型超大型银矿床	373
第二节 贵州银厂坡沉积型富银多金属矿床银的成矿机制	382
第三节 陆相火山岩型银矿	392
第四节 川西嘎村大型富银多金属矿床	403
第五节 侵入体及其内外接触带型独立银矿床	418
第六节 我国独立银矿床和超大型银矿床成矿与找矿远景	428
重要参考文献	434

第三篇 超大型矿床形成的宏观地质背景

第八章 古环境与超大型矿床的形成	441
第一节 海平面变化与超大型矿床	441
第二节 典型矿床的沉积环境	453
第三节 缺氧环境与大型、超大型矿床	464
第四节 冰碛事件与黑色岩系型锰及磷-锰矿床的形成	478
第五节 结论	482
重要参考文献	486
第九章 岩石圈地球化学边界时空结构与超大型矿床的形成	490
第一节 中国大陆岩石圈地球化学边界对超大型矿床制约的基本特征	490
第二节 滇黔地区地球化学边界的地质特征与构造格局	500

第三节	东秦岭古大陆边缘地球化学边界及其成矿控制作用·····	523
第四节	结论·····	539
	重要参考文献·····	540
第十章	克拉通边缘与超大型矿床的形成·····	543
第一节	古陆边缘构造与成矿·····	543
第二节	典型古陆边缘成矿系统·····	549
第三节	古陆边缘产出大型、超大型矿床的基本因素·····	566
第四节	华北克拉通北缘中段林西地区的成矿背景和大井铜-锡-银-铅-锌矿床 的成矿作用·····	568
	重要参考文献·····	585
第十一章	超大型铜矿成矿的全球地质背景·····	588
第一节	超大型斑岩铜矿·····	588
第二节	全球超大型砂页岩铜矿的成矿地质背景·····	608
	重要参考文献·····	617

结语篇 保证国家资源安全的矿产资源基础研究思考

重要参考文献·····	619
-------------	-----

绪 论 篇

寻找超大型矿床基础研究中 若干问题的思考

自 1987 年国际地球物理与大地测量联合会 (IUGG)、国际地质科学联合会 (IUGS) 和国际岩石圈委员会 (ICL) 共同提出将超大型矿床的全球背景列为地学的 12 个重大问题之一以来, 超大型矿床的研究一直备受国内外地学界的重视, 例如, 澳大利亚成立了以研究超大型矿床为目标的“地球动力学研究中心”; 欧洲联盟科学基金会设立了由 14 个国家参与的“地球动力学与矿床演化”项目; 国际对比计划设立了“岩石圈过程与巨量金属堆积”项目。这些事实表明, 地学界已将矿产资源, 特别是超大型矿床的形成与全球动力学背景密切结合起来进行研究。

我国已将超大型矿床的基础研究连续两次列入国家攀登计划。在对我国超大型矿床的形成、分布特点及规律等方面的研究中取得了长足进展。本书重点就有关超大型矿床形成、分布与泛大陆以及全球性重大地质事件的关系及有关铜、金刚石等矿种的矿床类型等基础研究问题提出一些肤浅的思考。

一、古泛大陆对超大型矿床的制约

从全球某些矿种或类型的超大型矿床的分布看, 它们常受最宏观的全球背景控制:

钾盐矿床: 90% 以上的钾盐矿床都分布在北半球, 如俄罗斯伊尔库斯克的涅帕和加拿大的萨斯卡切温, 这两个超大型钾盐矿床各拥有 >300 亿 t 的钾盐; 另外还有西欧与东欧的施塔斯福、上卡姆斯克、恩巴盐丘; 东南亚的老挝和泰国的万象盆地、呵力盆地等。

古砾岩型 Au-U 矿床: 超大型的古砾岩 Au-U 矿床都分布在南半球, 成矿时间在 22 亿~27 亿年期间, 如南非的维斯瓦特兰德, 加纳和巴西等国也都有产出, 但在北半球目前还没有发现此类型矿床。

与花岗岩类有关的 W-Sn 矿床: 与花岗岩类有关的超大型 W-Sn 矿床均主要分布在北半球, 如我国的柿竹园、大厂、个旧等; 马来西亚的近打河谷、吉隆坡矿; 欧洲英国的康瓦尔 Sn 矿; 北美洲加拿大的马克通 Sn 矿等。在南半球很少发现与花岗岩有关的 Sn 矿床, 只在北安第斯有大型矿床。

古元古代 Mn 矿床: 古元古代超大型 Mn 矿床主要分布在冈瓦纳古陆, 如南非、纳米比亚、印度等, 在劳亚大陆则没有产出。

与此形成明显对比的是有一些超大型矿床, 如条带状 Fe 矿床 (BIF) 和金刚石矿床则不受泛大陆控制。

由此看来, 古泛大陆对一定类型超大型矿床的控制是存在的, 如何解释尚需要大量工作。如果这一因素存在, 是否可以从一些矿床类型的分布来反演古大陆的裂解和拼合。

二、大规模成矿作用与地球演化重大事件之耦合

许多大规模的成矿作用多与全球范围的重大地质事件相关连, 并形成了多个超大型矿床。

1. 大规模、大范围的晚震旦-早寒武纪大量多样性生物之突然涌现（生命大爆发）与世界范围的大量磷块岩形成之耦合

世界范围的磷块岩都在此时期形成，在我国如晚震旦陡山沱组磷矿层，这可能与全球范围冰川融化，造成大规模的海侵事件有关。

2. Pb、REE 在中元古代的爆发性成矿

作者曾在 1997 年提出 Pb 和 REE 在中元古代爆发性成矿的问题（涂光炽，1997），这是指 Pb 和 REE 在太古宙和古元古代（即 18 亿年以前）几乎没有出现有意义的 Pb 和 REE 的矿化或成矿，但在此之后，在全球范围突然成矿，而且常形成超大型矿床。通过国内外这类矿床的对比研究发现，在太古宙和古元古代，全球范围内广泛发育的是 TTG-奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩，它们是低 K、高 Na 的岩浆岩组合。在中元古代全球范围内，如我国华北克拉通北缘产出了白云鄂博巨大 REE 矿床、狼山-渣尔泰地区的霍各气、东升庙超大型 Pb-Zn 矿床，在该矿区范围也同步发育了富碱，特别是富钾的岩浆岩，典型代表是环斑花岗岩（rapakivi）和一些富钾火山岩系。由于 Pb 在元素地球化学性质上与 K 的相似性，使得富碱岩浆可携带较多的 Pb。有名的 Olympic Dam 超大型 Cu、Au、U 矿床产在 16 亿年前形成的碱性花岗岩中。它们均暗示了中元古代时期一次全球性事件。

3. 暗色岩成矿——地幔柱事件

暗色岩（trap）也称溢流玄武岩（flood basalt）。20 世纪 80 年前人们谈论此岩时多是指印度德干高原的暗色岩，它形成于白垩纪与第三纪之间。该类岩石单调，缺少具工业意义的矿化。另外，在世界其他地方较少出露，或者面积较小。后来，情况发生了重大变化，在亚洲东部找到了两个大面积暗色岩分布区，一是我国西南峨眉山玄武岩，一是西伯利亚暗色岩，前者覆盖面积 50 万 km²，后者更大一些。南非有 Karoo，南美有 Parana，北美有哥伦比亚河等。更引人注目的是深海钻探计划（DSDP）和大洋钻探计划（ODP）的作业，在大洋深处找到若干大面积暗色岩，如印度洋中南部的 Kerguelen-Broken Ridge 暗色岩，分布面积达到 230 万 km²，太平洋西南的 Ontong Java 暗色岩面积达 190 万 km²，它们均具有白垩纪年龄。还有若干面积较小的暗色岩分布区。可以说，多个大面积陆上和海下溢流玄武岩的发现是近 30 年来固体地球科学的重大成就之一。它已被命名为大火成岩省 LIPs（Large Igneous Provinces）并作为 ODP 的重点课题之一。与此同时，暗色岩含矿性也引起人们的关注，例如：

（1）某些暗色岩常见浸染状 Cu、Ni 矿化，典型代表是俄罗斯的诺里尔斯克和美国明尼苏达州的 Duluth 铜镍硫化物矿床，前者 Ni 的储量居全球第二。

（2）我国川西攀枝花分布的与峨眉山玄武岩同源的侵入相镁铁质-超镁铁质杂岩，已在该杂岩中发现攀枝花、红格、太和等超大型钒钛磁铁矿矿床，还有力马河铜镍硫化物矿床，其中的层状杂岩由于与南非布什维尔德杂岩相似而更应引起注意。

（3）硫的自然铜及黑铜矿矿床，在我国滇东有发现，而在美国密歇根州有巨大储量。

(4) 自然金在黔西有出露。

这种大面积的暗色岩的成岩与成矿问题, 涉及巨大的物流和能量流, 这便是近年来地球科学中热门话题——地幔柱, 它们可能是源自核幔边界(D')或上下地幔之间。

4. 白垩纪重大地质事件与成矿、成油的关系

白垩纪是地质历史中非常具有特色的时期, 在该时期发生了许多重大的特殊事件, 如恐龙灭绝, 大气 CO_2 、 CH_4 含量数倍于现代值, 海相及陆相黑色岩系十分发育、分布广泛, 地球磁带长期稳定, 4000 万年未发生倒转, 海水古温度最高, 海平面比现在高 250m 等。更为特征的是此时期大洋脊张开速度最快, 环太平洋岩浆活动频繁, 含矿金伯利岩、碳酸岩发育, 双峰式火山岩、碱性杂岩发育, 基性脉岩大量产出; 沉积盆地广泛分布。在我国东部, 最为特征的是在侏罗纪-白垩纪初期, 由东西向构造格局转为 NE-NNE 向, 同时, 岩石圈厚度发生了强烈减薄, 白垩纪末可能是减薄最强烈时期。白垩纪的这些特殊事件是许多大型、超大型金属、非金属矿床和油气形成的关键。例如, 我国已知不同类型的铀矿、低温热液型 Hg、Sb、As 和萤石、沸石矿床, 以及部分 Pb、Zn、Cu、矿床, 部分 W、Sn、Mo 矿床均和大量 Au 矿床形成于白垩纪, 全世界 70% 的石油、天然气资源也赋存于白垩系。

5. 斑岩铜矿与板块活动的复杂关系

斑岩铜矿形成大型-超大型规模矿床的概率很高, 由于它们主要分布于环太平洋、特提斯和中亚三大全球性成矿域, 使之成为研究板块活动与成矿关系的最佳对象, 但其关系显示了复杂性: 它可能形成于板块消减之岛弧背景, 也可形成于消减之后弧-弧、弧-大洋高原、弧-大洋中脊、弧-大陆之碰撞背景 (Kirkhan, 1997)。有些斑岩铜矿可形成于裂谷和其他拉张环境, 如美国西部盆地中的一些斑岩铜矿。另外, 富 Au 斑岩铜矿的寻找与发现, 如美国的 Bingham 斑岩铜矿 (Au 900 t), 印尼的 Grasberg 斑岩铜矿 (Au 1600 t), 使此类斑岩铜矿的产出背景成为研究焦点。Kesler (1973) 曾提出产于岛弧环境的斑岩铜矿富 Au, 而产于大陆边缘的富 Mo; Muller (1993) 年则提出富 Au 斑岩铜矿及陆相火山岩低温热液金矿及金、铜矿主要产于大洋弧、大陆弧及后碰撞弧中之钾质火山岩系中。斑岩铜矿床与陆相火山岩型低温热液金矿床的密切空间关系也受到关注, 从已获得的有关斑岩铜矿中气液包裹体的高均一化温度 (500~700℃) 和高盐度 (40%~70%) (Roedder, 1984), 暗示了超临界高盐度流体的可能存在。因此, 大型-超大型斑岩铜矿与板块活动和大断裂的密切关系是探讨其形成机理时需要认真考虑的。

在斑岩和陆相火山岩型矿床中还必须注意第四纪成矿的问题, 这在西南太平洋岛屿最为突出。印尼、菲律宾、日本菱刈以及我国台湾金瓜石的一些 Cu、Au 矿床成矿年龄均在 1Ma 左右, 即落在更新世, 而在美国、南美几乎不出现第四纪的 Au、Cu 成矿年龄。联系到西南太平洋岛弧区是世界上的强地震区, 探讨第四纪 Au、Cu 成矿问题就更有意义了。

6. 铜镍硫化物矿床产出的多种地质背景

铜镍块状硫化物矿床是镍的最主要来源, 也是铜的重要来源之一, 其加工副产品铂

族元素也具有很高经济价值。矿床赋存于镁铁质-超镁铁质岩浆岩中。

对这种重要而且分布较广的矿床类型在 20 世纪 80 年代前矿床界的共识是岩浆不混熔矿床, 但岩浆热液也起关键作用。这种矿床中的热液成矿作用是首先在萨德伯里被观察到, 之后在不少矿床也可以看到。

经过多年实践的检验, 岩浆分凝和岩浆热液在铜镍硫化物矿床形成中所起的不可替代的作用已为矿床界所接受。与此同时, 人们也发现, 产出这种矿床类型的地质背景却十分丰富多彩, 千差万别。

首先, Dietz 于 1964 年提出了庞大的萨德伯里构造和铜镍矿石不是来源于地壳深部或地幔, 而是由陨石冲击形成的。Dietz 假设, 一个含铜的铁陨石冲击了萨德伯里, 形成直径达 50km 的陨石坑, 引起围岩的角砾化和大量冲击锥的形成。按照 Dietz 的看法, 铜镍矿石来自天外, 而矿床的石英闪长岩围岩则是冲击高温熔融岩石之后结晶形成的。冲击还使下地壳产生岩浆, 它们上侵后成为矿区另一种重要岩石——苏长岩。

无疑, Dietz 的天外来客见解震撼了矿床界和天文界。支持者和反对者都展示各自的证据和认识, 进行热烈的讨论。1992 年和 1997 年, 仅在萨德伯里就举行了两次命名为大型陨石冲击与天体演化 “Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution” 的学术讨论会。

看来, 对萨德伯里矿床天外来客论似乎占了上风, 发现了更多的冲击证据, 如“角砾岩墙”, 冲击时产生大量角砾下降后形成特殊建造等。目前, 较流行的看法是, 天外冲击说是可以成立的, 但铜镍矿石并非从天而降, 而是冲击以它巨大的能量引发某些地壳岩石的熔融之后结晶分异, 产生镁铁岩-超镁铁岩及铜镍矿床。

不可能在这里做详细讨论, 但可以介绍若干支持天外来客论的新的微观依据。Becker 等于 1994 年在萨德伯里的 Onaping 建造中找到含量达 10^{-6} 级的 fullerenes, 即 ^{60}Co 。两年后同一作者在萨德伯里的 ^{60}Co 中发现氮具地外来源的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值。据 Naldrett 报道, Masaitis 等在 Onaping 建造中找到六粒金刚石, 粒径 50~100nm, 结晶形态类似在其他陨石坑所见。Dickin 等 (1996) 利用 Os 同位素比值论证了萨德伯里矿石和围岩的壳源成因。

多年来萨德伯里镍储量一直居世界首位, 研究者也始终将它作为典型实例对待, 但冲击论起来造反成功, 这就使萨德伯里成为在产出的宏观地质背景上一个非常不典型、非常特殊的实例。

镍储量居全球第二的俄罗斯诺里尔斯克矿床在产出的地质背景和形成机制上也有其特殊的一面。这个超大型矿床与西伯利亚大面积暗色岩建造有关, 赋存于暗色岩建造的侵入相岩石中。Naldrett (1994) 认为, 暗色岩中的部分溢流玄武岩中 Cu、Ni 和 PGE 严重贫化, 这主要是玄武岩与后期侵入岩浆接触后, 大量 Ni、Cu、PGE 等自玄武岩转移到侵入岩的结果。因此, 侵入相岩浆富集了 Ni、Cu、PGE 等并在以后形成超大型铜镍硫化物矿床。

在诺里尔斯克铜镍矿床形成机制中另一有趣问题是它的硫同位素组成。两位俄罗斯人 Godlevski 和 Grinenko (1963) 发现这个矿床硫化物矿物都具有高正值的 $\delta^{34}\text{S}$, 说明 S 不是来自基性-超基性岩浆, 而是来自地壳。他们认为, 岩浆穿过富含硫酸盐地层时, 硫酸盐被还原为硫化物。这展示了硫的壳源性质, 是岩浆侵入到地壳中, 同化大量硫酸

盐的结果。这也说明了诺里尔斯克矿床成矿物质的多源性。上述 Naldrett 关于诺里尔斯克贫化玄武岩中的有用金属迁移到侵入岩的问题尚需要更多的剖面地球化学工作及实验才能验证,但硫的壳源无疑可以确定。之后,在其他铜镍硫化物矿床,包括超大型矿床如加拿大的,也有 $\delta^{34}\text{S}$ 为高正值的报道。

20 世纪 60 年代对传统的铜镍硫化物矿床成矿理论的冲击接二连三地出现。除了 1963 年壳源硫的提出,1964 年萨德伯里天外来客的冲击外,1966 年开始在西澳大利亚发现一连串产于超镁铁质火山岩中的铜镍硫化物矿床。据 1981 年 Ross 和 Travis 报道,60~70 年代在西澳大利亚一共找到 56 个含 $\text{Ni} \geq 0.8\%$ 的这种类型矿床。

一般习惯于将这种新类型铜镍矿床称之为 Kambalda 型,因为此产地规模大,而且是 1966 年第一个被发现的。Kambalda 型矿床的出现引发了一系列有关形成理论的讨论。

铜镍矿床产在超基性火山岩(或称科马提岩)底部,如果岩流覆盖负地形,则在洼地矿化更富集一些。如果矿层加厚,含矿的科马提岩也加厚。这种矿床的上部为浸染状矿石组成,下部则多块状,二者界线清晰。矿体和围岩界线也很清晰。

从矿床类型被发现一直到现在,岩浆分凝成矿说占主流地位,但也有人提出喷流的见解。

从矿床产出的大地构造背景看,若干在铜、镍、铂储量位居全球前茅的萨德伯里、诺里尔斯克和金川均受控于古老克拉通的边缘带,但规模较小的铜镍硫化物矿床也可以赋存于造山带,如我国天山地区的香山、黄山等矿床。这种矿床规模与所处地质背景的联系是否具规律性尚有待今后更深入的研究。

从上述简略的介绍与回顾可以看出,铜镍硫化物矿床都与镁铁-超镁铁岩存在密切关系,但在地质背景、形成机制方面则是多种多样的。

7. 一个地区 Hg、Sb、As(雄黄、雌黄)矿床的成矿主要与该区最晚一次地壳活动耦合

南非默奇逊、加拿大的赫姆洛 Hg、Sb 成矿发生于新太古代;西班牙的阿尔马丹超大型 Hg 矿床形成于晚古生代(海西期);我国湘黔地区的 Hg、Sb 超大型矿床形成于燕山运动晚期。上述这些 Sb、Hg 矿床的成矿均与本地区的最晚一次地壳运动有关。

与此类似,在一个复式岩体中,W、Sn 等矿床的形成都与该复式岩体的最晚期侵入活动有关。

8. Pb、Zn 矿床的主要容矿岩石是沉积岩

在自然界 Cu、Pb、Zn 三种有色金属中,太古宙和古元古代形成的矿床中多 Cu、Zn 共生,Pb 基本不出现,如加拿大 Atibiti 带的一些 Cu-Zn 矿床和我国辽宁红透山矿床。中元古代及以后则主要是 Pb、Zn 密切共生,而且,它们多以沉积岩为容矿岩石。

据 Sangster (1994),赋存于沉积岩(包括成岩后受到变质的)的密西西比河谷型 MVT 及沉积喷流(SEDEX 或称热水沉积)型 Pb-Zn 矿床,其储量与产量可占 Pb、Zn 总储量、产量的 1/2 到 2/3。又据 Large (1999),仅澳大利亚北部 SEDEX 型 Pb、Zn 的资源量可达 1.2 亿 t,而美国 MVT 型 Pb-Zn 资源量达 0.85 亿 t。可见沉积岩容矿对 Pb、Zn 来说是十分关键的。

人们对上述两种类型 Pb-Zn 矿床的成因认识经历了有趣的变化。20 世纪前半叶, 它们被普遍认为是岩浆热液矿床, 主要的依据是部分矿体切穿地层, 这使沉积成矿难于成立。当时, 不是外生就一定是内生, 是成矿思维的主流。但使岩浆热液成矿论者感到困惑的是, 在矿床所在大范围内常找不到较具规模的岩浆岩, 只偶尔出现一些中基性岩脉, 那时, 流行的岩浆热液矿床分类方案是 Lindgren (1933) 提出的高温、中温、低温方案。这些矿床附近常有侵入岩或火山岩的发育。而 MVT 分布地区只有大片的沉积岩。于是, 20 世纪 30~40 年代曾在美国流行了一阵子的远温 (telethermal) 矿床名词便是针对 MVT 的。远温说法力图解释 MVT 的成因难题, 但并没有成功。

20 世纪后半叶人们逐渐摆脱岩浆热液论的束缚, 结合矿床地质特征和过去未为人知的若干成矿作用的揭示, 提出了新认识。

SEDEX 是 Sedimentary Exhalation 的缩写, 即沉积喷流。SEDEX 型 Pb-Zn 矿床的提出无疑受前一世纪 70 年代后多处洋底热液成矿作用直接观察及推论的启迪。SEDEX 型 Pb-Zn 矿床多产于裂陷槽巨厚沉积地层中, 矿床主体呈整合态、层状、透镜状, 矿石层理层纹发育, 具沉积矿床面貌。矿床下盘可见垂直矿床的小脉、细脉, 也有矿化, 它们被解释为洋底热液搬运成矿金属的通道。含矿地层可夹有钠长石岩、电气石岩、绿帘石岩等热液蚀变交代产物。这样, SEDEX 矿床虽貌似沉积矿床, 却伴随了强烈蚀变, 成矿物质也主要来自洋底, 而非大陆。矿床形成大致与围岩同时或稍晚。

澳大利亚是 SEDEX 型 Pb-Zn 矿床最发育的国家。据 Large (1999), 全球 15 个最大的 SEDEX 型 Pb-Zn 矿床中, 七个位于澳境内。澳学者在这方面的贡献也更多一些 (Russell, 1981; Large, 1999)。MVT 型 Pb-Zn 矿床的容矿岩石虽也是沉积岩, 但主要是碳酸盐岩, 其中白云岩或白云石化了的石灰岩更多见一些。矿床多赋存于古老克拉通的盖层中。控矿断层发育, 有的矿床具层控特征。它们主要产于显生代碳酸盐岩中, 大面积内不见古生代、中生代花岗岩类。

从 MVT 这一名称可以看出矿床大量展布于美国密西西比河流域, 特别是河的西侧。由于储量大、开发早, 矿床研究程度相对较高。自远温成矿论销声匿迹后, 代之而起的主要是盆地卤水侧向运移成矿论。这一见解主张, 由于水头作用、沉积物压实作用, 携带金属的粒间水被挤出, 并作侧向运移到盆地边缘或盆地中古隆起附近沉淀出 Pb、Zn, 形成矿床。一般认为, 由于卤水温度较低, 不可能同时携 Pb、Zn 与 S 运行, 故成矿主要发生于两种溶液 (一种含 Pb、Zn, 一种含 H_2S) 的遭遇和混合。有的还提出, 卤水具油田卤水性质。大量 MVT 型 Pb、Zn 矿床的气液包裹体测温和成分测定结果也支持这一见解。包裹体测温多落入 70~150℃ 区间。盐度常 >15%。包体中可以见到细粒油气、有机质 (Roedder, 1984)。

实际上, 以沉积岩为容矿岩石的 Pb、Zn 矿并不只有 SEDEX 和 MVT 两种类型。一种可称之为砂岩铅矿的是分布较广 (主要在欧洲) 组成颇为特殊的 Pb、Zn 矿床。它主要产于不整合面上的石英岩或砂岩中。在组成上它几乎是单一的 Pb, 只是偶尔在矿床上盘出现少量 Zn。不整合面下的岩石常含较多长石。有人认为 Pb 来源于富含长石的岩石。

我国最大的铅锌矿床滇西金顶, 也以沉积岩为容矿岩石, 包括砂岩、角砾岩。它们独特之处在于成矿时代很新, 在第三纪。矿床距板块缝合线不远, 是否在成因上与板块