

现代矿床学

《教案》

- 第一篇 如何开展科技项目研究
- 第二篇 矿床学的发展前景与思维方法
- 第三篇 21 世纪矿床学展望
- 第四篇 现代成矿理论进展
- 第五篇 当前国内矿床学领域研究动态
- ★ ★ 现代矿床学研究的前沿领域

第一篇 如何开展科技项目研究

一、 如何选题

- 基础研究必须瞄准学科前沿（广泛参阅国内外文献，经常参与学术交流，及时了解学科动态）
- 应用基础和应用研究应立足解决国民经济和社会发展中存在的重大而又迫切的问题（关心国家大事，多与管理部门和各级领导沟通，通过电视、广播、报纸、网络等多种媒体和各类会议了解国家的发展计划）
- 与国民经济和社会发展水平以及经费资助强度相适应

二、 如何撰写申请书

1. 系统收集、阅读和整理有关资料、文献和信息

1) 作用

- 了解研究区的情况，研究程度，存在问题
- 选取有用资料，为我所用，节约人力、物力、时间
- 了解新涉及的研究领域的动态和发展趋势
- 学习新理论、新方法

2) 途径

- 参加国内外学术会议（Congress, Symposium or Conference），专题讨论会（Workshop）和短训班（Seminar or Short course）
- 进行国内外学术交流（Talk or Email）
- 上课（极为次要）
- 读书（较为系统，但资料和观点可能不是最新的）
- 阅读杂志（极为重要）

国外重要杂志（部分）

Nature	Science
Earth Science Reviews	International Geology Review
Geology	Episodes
Economic Geology	Ore Geology Review
Mineralium Deposita	Resource Geology
Contributions to Mineralogy and Petrology	Journal of Petrology
Lithos	Mineralogy and Petrology
Mineralogical Magazine	Physics and Chemistry of Minerals
American Mineralogist	Canadian Mineralogist
Chemical Geology	Earth and Planetary Science Letters
Journal of Geochemical Exploration	Geochimica et Cosmochimica Acta
Journal of Geophysical Research	Geophysics
Geophysics Journal International	Geophysical Prospecting
Journal of Structural Geology	Tectonophysics
Ground Water	Journal of Hydrology
Environmental Geology	Engineering Geology
Quaternary International	Marine Geology
Sedimentary Geology	Computers & Geosciences

国内重要杂志（部分）

中国科学	科学通报
自然科学进展	地球物理学报
地质学报	地质论评
地质科学	地学前缘
矿床地质	地质与勘探
岩石学报	岩石矿物学杂志
地球化学	矿物学报
高校地质学报	地球学报
地球科学	现代地质

- 网上查阅（最为重要）

世界重要出版社网址

www.springer.dewww.blackwell-science.com

www.elsevier.nl

www.sciencemag.org

www.nature.com

www.oup.co.uk

世界重要国际组织网址

www.icsu.org International Council for Science

www.unesco.org United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

www.helsinki.fi/science/igu/index.html International Geographical Union

www.iugs.org International Union of Geological Sciences

www.cevl.msu.edu/~long/IAGC/programs.htm

International Association of Geochemistry and Cosmochemistry

www.homepage.montana.edu/~ueswl/geomorphlist/

International Association of Geomorphologists

www.nhm.ac.uk/mineralogy/seltmann/IAGOD/index.html

International Association on the Genesis of Ore Deposits

www.iah.org/ International Association of Hydrogeologists

www.iamg.org/ International Association for Mathematical Geology

www.blacksci.co.uk/uk/society/ias/default.htm

International Association of Sedimentologists

www.man.ac.uk/geology/IASIG

International Association of Structural / Tectonic Geologists

www.dst.unipi.it/ima International Mineralogical Association

ipa.geo.ukans.edu/index.htm International Palaeontological Association

ingua.nlh.no/ International Union for Quaternary Research

www.uark.edu/studorg/metsoc/ The Meteoritical Society

www.mines.utah.edu/~wmgg/SEG.html

Society of Economic Geologists

www.min.tu-clausthal.de/www/sga/sga.html

Society for Geology Applied to Mineral Deposits

www.sepm.org/sepm.html Society for Sedimentary Geology

www.aapg.org/ American Association of Petroleum Geologists

www.agiweb.org/ American Geological Institution
earth.agu.org/homepage.html American Geophysical Union
www.uni-essen.de/geologie/aegs.htm Association of European Geological Society
www.aeg.org/ Association of exploration Geochemists
agid.igc.usp.br/ Association of geologists for International Development
gs.wustl.edu/ Geochemical Society
www.geosociety.org Geological Society of American
www.iugg.org International Union of Geodesy and Geophysics
www.gfg.ku.dk/~iag/ International Association of Geodesy
www.cig.enscm.fr/~iahs/ International Association of Hydrological Sciences
iamas.org/
 The International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences
www.iugg.org/iapso
 The International Association for the Physical Sciences of the Oceans
www.iaspei.org/
 International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior
www.iavcei.org/
 International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior
www.minersoc.org The Mineralogical Society
www.geolsoc.org.uk The Geological Society
www.usgs.gov/ U. S. Geological Survey
www.bgs.ac.uk/ British Geological Survey

中国重要地学机构网址

www.most.gov.cn 科技部
www.cernet.edu.cn 科教网
www.nsfc.gov.cn 基金委
www.mlr.gov.cn 国土资源部
www.cashq.ac.cn/index.asp 中国科学院
www.cgs.gov.cn 中国地质调查局
www.cags.cn.net 中国地质科学院
www.ngi.org.cn 全国地质图书馆
www.geolchina.gov 中国地质学会

3) 注意事项

- 网上查阅资料可依地区、作者或专题关键词进行，阅览室查阅资料可按地区或刊物特点进行，查阅时应采用由新到老，逐步追索的办法
- 资料来源应列完整（作者名、论文篇名、刊物名、年卷期、页码或作者名、书名、出版地、出版社、出版年份、页码）
- 收集和整理资料时应进行资料分类（可按地区、作者、时间、内容分类）

2. 撰写项目申请书

1) 立题依据

- 论题简介
- 所涉及的研究领域中国内外的研究现状、存在问题及立项研究这些问题的必要性

- 研究地区的基本情况、研究现状和存在问题
 - 研究思路（工作模型）
 - 研究意义
 - 参考文献（新、特、全）
- 2) 研究目标、研究内容和关键问题
- 研究目标要明确，大小要合适
 - 研究内容要具体，且必须围绕研究目标展开
 - 关键问题要选准，数量不宜多，且必须与研究内容一致
- 3) 研究方案
- 有可操作性，且与研究内容一致
 - 尽可能采用新方法
 - 注意测试手段的可靠性和可行性
- 4) 预期成果
- 相对具体
 - 与研究内容一致
 - 所提成果的高度要适当
- 5) 研究基础、队伍、条件和经费预算
- 研究基础要强调已有一定工作积累，但还有不少工作要做
 - 研究队伍和条件要与研究任务（内容）对应
 - 经费预算要尽可能合理
- 6) 例子
3. 如何开展实际研究工作
- 1) 实地调研（观察、测量、采集样品和标本、记录、素描、拍照、标图，及时整理标本和记录）
 - 2) 样品处理（磨片及观察光/薄片、根据需求和统一协调的原则以及样品情况选定样品情况、进行单矿物分离）
 - 3) 进行各种样品分析测试
 - 4) 系统整理资料，制作相应的表格和图件
4. 如何撰写毕业论文或研究报告
- 1) 撰写提纲和详细提纲
 - 2) 撰写论文或报告
 - 前言（选题和选区依据 / 研究意义；课题来源、名称和编号；前人研究成果综述 / 存在问题；本次研究所做的工作 / 工作量表；所取得的主要成果；致谢）
 - 正文（主题明确，观点突出，结构合理，层次分明，语言流畅，逻辑性强）
 - 结论（应反映出主要工作和主要成果）
 - 致谢（力求全面）
 - 参考文献（注意相关性）
 - 3) 注意事项
 - 引用他人的数据资料、图件照片和观点方法必须注明出处
 - 样品处理和测定方法以及仪器型号及其工作条件应予以说明
 - 应列出全部分析测试数据而不是只列看起来适用的部分数据。同时，所列数据应是原始数据（包括测定误差）而不是平均值或范围值

- 数据图表要准确，且应与主题协调一致

5. 如何撰写科研论文

1) 综述性论文

- 过程（选题，确定题目；通过各种渠道系统收集资料；对收集到的资料进行归纳整理和分类，确定论文的基本结构和主要内容，筛选材料；进行写作）
- 注意事项（资料尽可能新；有所为有所不为；突出重点，详略得当）
- 实例

2) 研究论文

- 立题要大处着眼，小处着手（例子：含硫化物角闪石巨晶 / 三颗锆石 / 橄榄石位错）
- 选材要科学合理，精益求精（例子：安徽铜陵岩浆底侵作用）
- 引言要简明扼要，引人入胜（选题的重要性，前人的研究成果及其存在的问题，论文的工作和意义 / 评述前人的工作要客观公正，罗列参考文献要尽可能多地列他人的文献）
- 正文要紧扣主题，层次分明
- 结论要明确具体，论之有据

第二篇 矿床学的发展前景与思维方法

一、矿床学的发展前景

1. 矿床学的发展是社会进步的需要

矿产是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。随着社会生产力的发展和社会生活的进步，人类使用矿产的数量和种类在急剧增长。

石器（工具）→金属矿产（冶炼技术，冶金工业）→能源矿产（化工技术，有机化工工业）→非金属矿产（材料合成与加工技术，材料工业）→宝石、玉石、观赏石、园林石（生活水平提高，精神需要）

国内：发展中国家，需要大量矿产资源

国际：发展中国家和发达国家都需要大量矿产资源，只不过发达国家是在别的发展中国家采矿或从别的发展中国家购买矿产资源而已。

1996 年世界矿业大国矿业产量产值综合指标

	俄罗斯	美国	加拿大	南非	澳大利亚	中国	全世界
总产值（百万美元）	12679	57856	11421	17000	18587	32849	219289
占世界百分数（69.7%）	5.8	26.4	5.2	7.8	8.5	15.0	
人口总数（百万）	145.3	242.1	25.5	36.0	16.2	1060.0	5556
国土面积（百万 km ² ）	17.1	9.4	10.0	1.2	7.7	9.6	150.1
人均矿业产值（美元/人）	87.3	239.0	447.9	472.2	1147.3	31.0	39.5
每 km ² 矿业产值	741.5	6154.9	1142.1	14166.7	2413.9	3421.8	1461.0

2. 矿床学正朝着综合化和系统化的方向发展

1) 综合化（成矿条件复杂，找矿难度大）

（1）矿床及其形成环境和形成作用的多样性决定了它必须向综合化方向发展

矿床类型的多样性：矿种 / 成因 / ……

成矿环境的多样性：构造 / 岩石、地层 / 温度 / 流体 / ……

成矿作用的多样性：生物 / 火山 / 热泉……

（2）各类矿产的共生或伴生也决定了它必须向综合化方向发展

石油、煤炭、金属和非金属矿产共生或伴生

Cu、Fe、Pb、Zn 共生或伴生 / 斑岩铜矿和矽卡岩型铜矿共生

2) 系统化

单个矿床→矿床组合→成矿系列→成矿谱系→成矿系统→区域成矿规律

矿床→矿田→矿集区→成矿带→成矿省→巨型成矿带（域）→全球成矿

全球成矿时空演化

3. 学科交叉已成为矿床学发展的一种重要途径（提问）

矿床地球化学（元素共生组合）/ 矿田构造学（韧性剪切带控矿、侵入接触构造控矿）、矿床物理化学 / 海洋矿床学 / 生物矿床学 / 壳幔成矿学……

此外，矿床学与环境科学以及矿床学与经济学的结合也日益受到重视（环境矿床学、资源经济学、矿床综合评价学）

** 小结：重要 / 发展潜力 / 发展途径

结论：矿床学具有光明的发展前景

二、矿床学的思维方法

1. 基本原则

- 1) 坚持实践第一（矿床研究的实践性）
 - (1) 全面理解“认识来源于实践”的观点
认识事物的一般过程是实践→认识→再实践→再认识；矿床学研究：野外观测、室内研究→分析类型、推测成因、判断价值→矿床勘查、矿山开发（验证）→修改成因模型、指导找矿（举例）
 - (2) 正确处理野外观测与室内分析的关系
以野外观测为基础，以室内分析为主要手段，二者缺一不可。只有两者结合，才能获得规律性的认识
 - (3) 合理运用“古为今用，洋为中用”的原则
“尊老不唯老，重洋不唯洋”（举例）
 - * 华南花岗岩（徐克勤多期花岗岩—江西陡水加里东花岗岩、周新民多来源花岗岩—浙江西裘和广西四堡）
 - * 浅成低温热液型金矿（火山岩型）/ 条带状变质铁矿
- 2) 建立系统观念（矿床研究的系统性）
 - (1) 矿床是岩石圈系统的一个组成部分（壳幔结构及深部地质作用过程）
 - (2) 成矿系统本身（构造、地层、岩浆岩、流体）
- 3) 注重历史分析（矿床研究的历史观）

矿床历史分析可分为三个层次：

 - (1) 单个矿床的形成过程分析（典型层控矿床）同生沉积成矿—后期叠加改造
 - (2) 成矿带、成矿省、成矿域演化的历史分析，成矿系列及其演化（长江中下游）
 - (3) 全球成矿史 元古—燕山期（哈钦森 R W）
- 4) 具备经济头脑（矿床研究的经济观）

矿床学既有地质属性，又有经济—技术属性

 - (1) 国内外矿业市场供需情况（铁矿、锡矿、稀土矿）
 - (2) 经济建设需要（铜矿、钾盐）
 - (3) 矿床的经济开发前景（地理、交通……）（南极铁矿，仅仅是宣传）

2. 矿床学思维方法

- 1) 系统思维
考虑各部分的内在联系，相互作用和相互制约（成矿系列研究是系统思维的成功实例—长江中下游）
- 2) 互补思维
就是要考虑矿床特征的互补与对照（矿床种类和矿床成分等各个方面的互补）。

成矿系列的互补性：指一个成矿系列中成矿元素、种类的分配和矿化程度在不同矿床类型中的分配是不均衡的，具有“此多彼少”和“此强彼弱”的关系。如鄂东南 Fe、Cu、Mo、Au 成矿系列中，Fe、Co 主要产于岩浆型矿床中，Cu、Mo 主要产于斑岩型矿床中，表现出各成矿元素在不同矿床类型中分配的不均匀性；在铜陵地区的 Cu—Fe—S 成矿系列中，矽卡岩型和层控型铜矿占主导，而斑岩型和石英脉型层次。
- 3) 模糊思维
成矿环境和成矿作用的复杂性，成矿过程的不可逆性以及研究方法的局限性……等等，决定了矿床学研究需要模糊思维（概率统计理论）。

举例：成矿预测 / 找矿模型应用。

4) 异同思维

特殊性与普遍性相结合

* 元古代条带状铁矿： 苏联、澳大利亚、巴西、印度、加拿大、南非风化壳型富铁矿

国内：地壳运动频繁，未变质含铁地层出露少，变质深，去硅难

国外：地壳运动较少，未变质含铁地层出露多，变质浅，去硅易

* 中国矽卡岩型富铁矿，中生代大量花岗岩类侵入和火山一次火山作用

5) 创造思维

新的假说—验证过程，根据部分事实，提出假说……丰富的想象力，很强的探索性

* 层控矿床 (Cu、Pb、Zn, 1000 万)

* 超大型矿床 (W、Sn、REE, 2000 万)

* 分散元素矿床 (Tl、Se、Te、Cd、In、Ge、Re、Ga, 1000 万)

* 低温矿床 (Pb、Zn、Au、As、Sb、Hg, 5000 万)

* 深部物质与流体成矿 (1000 万)

* 月球矿床 (>10 亿)

第三篇 21 世纪矿床学展望

一、理论矿床学

深入研究矿床的形成和分布规律，为矿产勘查提供新的成矿学理论基础。基本发展趋势是将成矿作用放到地球动力学系统（造山带—盆地系统）中加以研究，亦即将盆山系统的形成演化与成矿系统作为一个统一整体进行研究。

1. 区域成矿地质背景

包括深部作用背景（岩石圈组成、结构、演化，壳幔相互作用及成矿物质再循环与矿床形成）

2. 成矿作用演化

基础是对成矿年代学和成矿事件过程的研究

**矿床（田）成矿，研究成矿过程、矿化阶段及对矿床物质成分和矿体形态、产状的影响。

**区域成矿，研究区域内重大构造成岩成矿事件，阐明其成矿谱系，以认识矿床在区域中的时空分布规律。

**全球成矿，研究地质历史上构造成岩成矿的阶段性和突发性、继承性和变异性等，并与其他学科一起，共同探索地球的形成和演变过程。

3. 成矿系统和成矿动力学

4. 地质流体与成矿作用研究，流域填图

5. 大型、超大型矿床形成的地质背景和控制因素

6. 全球性成矿规律

二、勘查矿床学

发展矿床勘察理论和方法

1. 大比例尺成矿预测研究方法

1) 三维立体填图基础上的地质制图预测法

2) 综合信息预测

2. 战术性与战略性的深穿透地球化学方法

3. 大区域矿产资源快速勘查评价新方法

4. 找矿靶区快速优选与评价新方法

5. 矿床（体）快速定位预测新方法

6. 相似类比找矿理论与方法

7. 成因模型找矿理论与方法

8. 理论预测找矿理论与方法

9. 成矿构造解析找矿理论与方法

10. 数学分析找矿方法

三、应用矿床学

扩大矿床学研究对象，发掘地质体的有用性，加强非传统矿产资源的研究

1. 研究和开发新的非金属矿产资源

2. 加强对矿产资源的综合利用研究

3. 海洋矿床学

4. 人造矿物岩石

四、环境矿床学

拓宽研究领域，探索为矿业开发和环境保护协调发展服务的矿床学研究

GSA1999 年会：矿山环境 57；矿床地质 / 找矿勘探 / 工业利用 75

1. 矿床的环境质量；
2. 矿床的环境质量评价；
3. 寻找经济—环境综合效益好的矿床类型；
4. 减少矿床开采对环境的污染。

五、矿床学研究成果为发展地球科学和丰富科普内容服务

古大陆多次分解和拼合的成矿学标志……

六、新技术

数学模型、实验研究、可视化

* 小结： 一是发展成矿理论；二是发展矿床勘查理论和方法；三是开发新的矿产资源；四是在矿业开发与环境保护的协调发展中发挥矿床学的基础研究作用。

第四篇 现代成矿理论进展

一、海底现代热液成矿作用的发现

1. 过程

1) 首次报导

Miller 及其同事 1966 年首次报导了红海拉张海底的热液成矿作用，发现规模巨大的多金属矿床（约 1 亿吨）和金属热卤水。与此同时，Bonatti 和 Joensuu 观察到了南太平洋隆起的现代热液成矿作用。

2) 广泛发现

70-80 年代在太平洋、大西洋、印度洋的洋中脊及各种海槽都发现类似的成矿作用。

3) 初步总结

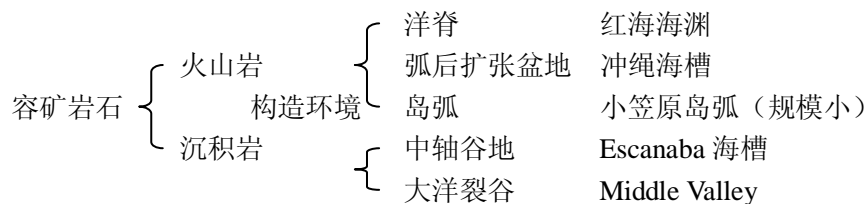
Rona 和 Scott 1993 年对此进行了总结，收集了 135 处现代热液的资料，包括热液的性质，它们所携带的金属、挥发份与形成的矿物组合等

4) 系统总结

侯增谦和莫宣学 1996 年对国内外有关资料进行了总结，在回顾现代海底热液成矿作用研究的过去与现在的基础上，重点介绍了现代海底热液成矿作用研究的重要进展，并讨论了其今后的研究方向。

2. 重要进展

1) 现代海底各种重要硫化物矿床的发现



△ 均与海底扩张作用和断陷活动密切相关

2) 现代海底热液成矿作用过程的观察

(1) 成矿地质构造背景

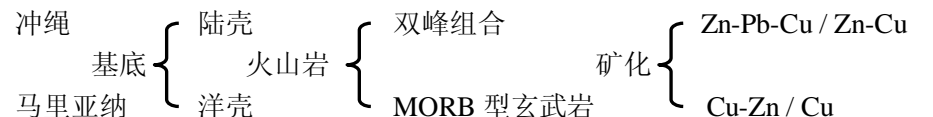
洋脊、弧后扩张盆地、岛弧、中轴谷地、大洋裂谷

* 成矿作用不是与挤压造弧阶段的钙碱性岩系有关，而是与岛弧开裂断陷阶段的双峰式岩石组合密切共生。

(2) 硫化物堆积机制

现代海底硫化物堆积过程实际是烟囱生长、倒塌堆积和热液流体在其开放空间充填与交代的过程。

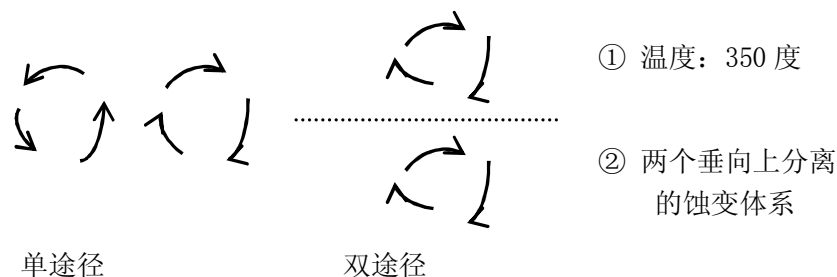
(3) 成矿物质来源



△ 火山成因块状硫化物矿床的成矿物质主体源自含矿火山岩系及其下伏基底物质，是由循环的热液从中淋滤出来的。

(4) 热液流体对流循环

单途径循环模型→双扩散对流循环模型



3) 研究意义

(1) 全球性物质和热流量监测和全球热状态和物质化学平衡研究

来自地球深部的物质和热液，约 80%是通过热液活动在洋脊排放的。因此，现代海底热液成矿活动成为监测全球性的物质和热流量的重要窗口，研究全球热状态和物质化学平衡的重要途径。

(2) 海洋学、生物学和气象学研究

大量物质通过热液活动向大洋排泄，不仅影响着水圈的物质组成和化学成分，同时制约着大量热液喷口生物群的生存与繁衍，并对气象产生影响，因而成为海洋学家，生物学家和气象学家的重大研究课题。

(3) 热液成矿作用天然实验室的观察、研究

热液成矿作用天然实验室的观察、研究，丰富和更新我们现有的知识储备和成矿理论。

(4) 海底矿产资源利用

陆地资源日趋贫乏，海底矿产资源利用（岛屿争执）。

二、与板块构造理论相结合的矿床时空分布规律

1. 概述

60 年代板块构造学说兴起，活动边界-岩浆活动-成矿。偏重讨论块状硫化物矿床、斑岩铜矿与板块构造关系。火山岩型浅成低温热液金矿。

2. 板块构造演化与成矿

阶段	主要事件	沉积组合	岩浆活动	构造变动	变质作用	成矿作用	造山作用	现代实例
大陆裂谷阶段	地幔柱上涌，岩石圈穹起、变薄，陆内裂谷及陆间裂谷发育	类磨拉石沉积，红层-熔岩-蒸发岩（浊积岩）组合	A.A-TH 系列岩浆的喷发与侵入	正断层为主的地堑、地垒等断块构造，伸展构造		与裂谷岩浆活动有关的 Ni、Cr、V、Ti、Pt、金刚石、W、Sn、Nb 等；层控金属矿床，煤、油、盐类矿床	块断造山	东非裂谷与红海
洋底扩张阶段	大洋裂谷、大洋盆地、大陆边缘被动及转换断层的发育	深海沉积，大西洋型浊积岩，陆架沉积等	TH 系列岩浆的喷发与侵入，蛇绿岩套的形成	拉张的大洋裂谷，沿转换断层的剪切，大陆边缘的挤压和古断裂的重新活动	洋底变质作用	与蛇绿岩套有关的矿床，大陆边缘裂谷中的层控多金属矿床，大洋盆地深海铁锰结核等	沿洋中脊的洋底山脉，大陆边缘隆起的山系	大西洋

俯冲阶段	洋壳板块俯冲，洋内弧（陆缘弧）弧沟系发育，大洋盆地开始消亡	弧沟系的各种沉积作用，各种类型浊积岩的广泛发育	与俯冲有关的岩浆活动，以 CA 系列岩浆为主的喷出和侵入	俯冲导致的强烈褶皱和断裂，以逆断层为主，混杂堆积的出现，蛇绿岩套的定位，弧后扩张或挤压	双或单变质带	与俯冲岩浆活动有关的及层控的 Fe、Cu、Pb、Zn、W、Sn、Mo、Au、Sb、Hg 等金属矿床	俯冲造山	太平洋
大陆碰撞阶段	大陆碰撞，大洋消失，缝合带形成，山脉形成，有时有残留洋盆	边缘盆地中的浊积岩，磨拉石沉积	地壳重熔产生的花岗岩形成并侵位	强烈逆掩，大型推覆构造，多期变形，叠加褶皱	中压区域变质和混合岩化	与 S 型花岗岩有关的 Sn、W 矿床，边缘盆地中层控 Pb、Zn、Hg、Sb、Cu、U、V 矿床	碰撞造山	阿尔卑斯-喜马拉雅及东地中海、黑海、里海

3. 板块构造登陆遇到的难题（德兴铜矿）/ 宏观规律

三、超大型矿床的探索与研究愈来愈引起世人的关注

1. 实例

国外： 澳大利亚 Olympic Dam Cu-U-Au-Ag

日本菱刈陆相火山岩型金矿 >100 吨 Au

加拿大 McArthur River U 10 万吨

国内： 广西大厂锡矿 湖南柿竹园钨矿 云南金顶 Pb-Zn 矿

云南个旧锡矿 湖南锡矿山 Sb 矿 内蒙白云鄂博 REE

甘肃金川镍矿 河南栾川钼矿 W、Sb、.REE

2. 事件

1) IUGG90 年代地球科学 12 个重要前沿课题之一

国际大地测量与地球物理联合会（IUGG）于 1987 年提出将“超大型矿床的全球背景”研究作为 90 年代地球科学 12 个重要前沿课题之一。

2) 国家科委计划项目

1992 年国家科委批准“与寻找超大型矿床有关的基础研究”计划项目实施，首席科学家涂光炽院士，我校翟裕生院士负责一个专题及方法技术研究。同年，国家科委批准“与寻找超大型矿床有关的方法技术研究”计划项目实施，首席科学家是谢学锦院士。

3) 加拿大地质调查所矿物资源会

1994 年 1 月加拿大地质调查所主持召开了矿物资源会，讨论“世界级”矿床有关问题。

4) 加拿大地质学会年会

1994 年 9 月加拿大地质学会第四届年会的主题是“世界级矿床的勘查与矿山地质”。

5) 国家科委延续攀登项目

1997 年底国家科委批准“超大型矿床”延续攀登项目，涂光炽先生负责。

6) 《大型构造与超大型矿床》出版

1997 年《大型构造与超大型矿床》出版。

3. 研究进展

1) 大型矿床与类似名词定义

超大型、特大型、巨型、世界级矿床

giant ore deposit / world class deposit / super large deposit

涂：储量超过大型矿床储量 5 倍以上的矿床

2) 对典型超大型矿床的剖析

加拿大、俄罗斯、澳大利亚 Olympic Dam

中国白云鄂博、柿竹园、大厂及金顶

3) 超大型矿床的分类

点型：只此一家，别无分店（白云鄂博、奥林匹克坝）

面型、线型：有“徒子徒孙”、斑岩铜矿 德兴

4) 超大型矿床的矿化类型

钼矿：矽卡岩型、石英脉型、砂岩型、陆相火山岩型和斑岩型，仅斑岩型具超大规模。

锡矿：石英脉型、云英岩型、矽卡岩型、斑岩型、砂锡矿和锡石硫化物型，仅锡石硫化物型具超大规模

汞矿、锑矿、铅锌矿，层控型

铜矿 斑岩型 4 个，层控 1 个

金矿 花岗岩-绿岩带型（玲珑、焦家）

5) 超大型矿床形成条件的主要观点

(1) 成矿因素的良好匹配

(2) 多重分异富集成矿（湖南柿竹园）四期千里山花岗岩侵入

(3) 成矿系统的复合与叠加（狮子山层控矽卡岩型铜-硫矿床）

(4) 特定的地球化学省：华南 W、Sn 背景高、华北 Au、Mo 高

欧阳自远(1995)认为地球原始物质的不均一性是超大型矿床形成的物质基础。

(5) 全球背景说和全球事件说（元古代 / 燕山期）

(6) 根植于地幔的深位构造

6) 大型构造对超大型矿床的控制（略）

7) 超大型矿床成因及其与较小矿床的关系

四、花岗岩与成矿讨论的深化

1. 概述

1) 研究历史

国外

空间热源

水成 / 火成 → 鲍温实验（20 年代）→ 里德（花岗岩化，50 年代）→ 温克勒（变质岩熔融，60 年代）→ ISMA 分类（70 年代）→ 皮彻尔（与构造关系，80 年代）→ 包体研究（90 年代初期）→ 大陆动力学（壳幔交换与地壳演化，90 年代末期）

国内 50 年代：南大徐克勤

80 年代：三次国际会议，南京大学地质系、贵阳地化所，袁奎荣、刘家远

90 年代：南京大学地质系、中国地质大学、桂林冶金地质学院

2) 研究意义

(1) 地壳和地球演化 / 大陆动力学（理论）

(2) 矿产丰富

(3) 建筑材料（应用）

2. 花岗岩研究的几个主要方面

- 1). 花岗岩分类
 - (1) 物源: (ISAM、磁铁矿/ 钛铁矿) 单一源
混合源
多元 (源) 物质混合长英质上地壳、基性下地壳、幔源基性物质 (或陆壳、洋壳、地幔)
 - (2) 形成方式: 熔融、交代改造、同熔、混合
 - (3) 构造背景: 造山带、盆地、裂谷带
 - (4) 成分: QAPF
- 2). 花岗岩与构造
英国皮彻尔、杨树峰、胡受奚
- 3). 花岗岩成因
 - (1) 结晶分异 (鲍温)、重熔 (Winkle)、同熔 (徐克勤)、交代改造 (里德)
 - (2) 交代改造→重熔→深熔 / 结晶分异→同熔
 - (3) 玄武岩浆的底侵作用 (Underplating)
(基性岩浆与老地壳岩石间的相互作用) ① 海西造山带; ② 安第斯山脉;
③ 阿尔泰—兴蒙造山带、东南沿海
- 4). 花岗岩就位方式
岩浆花岗岩 (重熔)、构造伸展、断裂剪切、火山构造塌陷
- 5). 花岗岩类岩浆动力学
- 6). 花岗岩与地壳演化、增生
 - (1) 板块汇聚水平增生
 - (2) 岩浆底侵垂向增生
 - (3) 基性岩浆与老地壳之间的相互作用
- 7). 花岗岩研究与大陆动力学
 - (1) 花岗岩成因与大陆生长、结构;
 - (2) 花岗岩成因演化与大陆演化及壳幔相互作用
 - (3) 花岗岩浆上升迁移与大陆内部能量传递和物质调整
 - (4) 花岗岩体的定时、定位与大陆块体时空定位及运动学、动力学
 - (5) 花岗岩体变形—大陆地壳变形的一种应变标志体
- 8). 花岗岩中的岩石包体研究
Didier、周新民、杜杨松等
 - (1) 花岗岩类型
 - (2) 形成机制
 - (3) 岩浆—成矿过程
 - (4) 中下地壳结构和性质
 - (5) 隐伏矿寻找
- 9). 花岗岩与成矿关系
 - (1) 花岗岩成因系列与成矿
改造型: W、Sn、Nb、Ta、REE
同熔型: Cu、Pb、Zn、Mo
幔源型:
陈毓川根据成因、物质来源、矿化组合, 把南岭地区与花岗岩类有关的有色、稀有稀土金属矿床分成 5 个矿床成矿系列、6 个矿床成矿亚系列和 21 个矿床式。

(2) 花岗岩成矿模式

五层楼成矿模式

典型矿床成矿模式（西华山、柿竹园大厂……）

成矿区成矿模式（赣东北 Cu、Pb、Zn、Nb(Au)城矿区）

10). 花岗岩的等级体制

单元—超单元花岗岩类岩石谱系单位 / 同源性及演化序列

岩石谱系单位的划分方案及与岩石地层单位的对应关系

	岩石谱系单位					岩石地层单位
	高秉璋等 1991	皮切尔·科 宾 1972 秘鲁海岸 岩基	贝尔曼·道 奇 1970 内华达山脉 岩基	北美地层 指南 1983	苏联 1: 5 万区 调规范 1988	
正式单位	超单元 组合	岩基段		超岩套	侵入杂岩巨序 列（巨岩套）	超群
	超单元	超单元	序列	岩套	侵入杂岩序列 （岩套）	群
	单元	单元	组	岩簇 （或岩谱）	侵入组合群 （杂岩组合）	组
					侵入组合 （系列）	
			（侵入体）		侵入杂岩（体） 侵入体（群体）	段
非单位式	侵入体					
不具的等级单位意	岩浆杂岩					

五、火山作用及与成矿关系

1. 火山碎屑岩分类（火山碎屑岩结构类型）
2. 火山碎屑流与涌浪堆积分布模型
3. 塑性碎屑结构
4. 线环复合的火山构造带（火山 - 侵入杂岩带）
5. 三位一体的火山侵入杂岩
6. 火山岩系列与大地构造环境
7. 火山岩演化与深部过程
8. 火山活动旋回与地球演化节律
9. 火山岩中岩石包体研究

10. 火山喷发物理过程
11. 火山活动与地质灾害及环境和气候变化
12. 火山作用与油气聚集及内生成矿

六、层控矿床理论的兴起

1. 概述

1) 层矿矿床概念与定义

层控矿床是指矿体赋存于一定的地层层位中，矿体呈层状或基本上呈层状，包含一部分非层状矿体，但受一定地层层位限制的矿床。

层控矿床的形成，一般经历了一个比较漫长而复杂的成矿演化过程。因而层控矿床往往是包含有多种不同时代、不同成因和不同矿物组合的多成矿阶段、多物质来源的多成因矿床。

2) 层矿矿床研究的意义

- (1) 经济意义：层控铜 50%，Pb、Zn90%以上，Au、Ag、Hg、Sb……
- (2) 指导找矿；顺层找矿
- (3) 矿床成因理论：突破了单一成矿作用的思想
- (4) 可作为地层对比的辅助标志

2. 主要进展

国外 70~80 年代系列专著，国内 80 年代专著——中科院地化所涂光炽、中国地质大学朱上庆

1) 层矿矿床地球化学

17 各矿种 250 个矿床地球化学工作

2) 层矿矿床地质学

- (1) 层控矿床中的表生成矿作用和后生成矿作用（*层控砂卡岩）
- (2) 层控矿床铜铅锌矿床主要类型及成矿模式
- (3) 国内外主要层控（铜铅锌）矿床
- (4) 中国层控铜铅锌矿床的时空分布特征

3) 层矿矿床及找矿

- (1) 层矿矿床成矿地质背景
- (2) 层控矿床主要成矿模式（火山—喷气成矿模式、非火山环境喷溢—沉积成矿模式、盆地热卤水成矿模式、地下水成矿模式、岩浆热液叠加成矿模式）
- (3) 层控矿床找矿方法；
- (4) 典型实例（云南金顶、安徽铜陵、江西九瑞、广西芒场）

4) 层控矿床含矿地质建造

- (1) 洋中脊和海沟、火山岛弧环境下产生的含矿地质建造
 - ① 蛇绿岩建造（中国辽宁红透山铜锌块状硫化物矿床）
 - ② 火山—沉积建造（青海锡铁山铅锌矿床）
 - ③ 绿岩带含铁碳酸盐建造
 - ④ 镁质碳酸盐建造（湘黔汞、锑、金矿带）
- (2) 陆内裂谷和拗拉谷环境下产出的金矿地质建造
 - ① 复理石建造（内蒙霍各乞、东升庙铜、铅、锌矿床）
 - ② 钙质粉砂岩—炭质页岩建造
 - ③ 双峰式火山岩建造
 - ④ 磨拉石建造

- ⑤ 黑色页岩建造
- (3) 克拉通环境下产生的含矿地质建造
 - ① 条带状硅铁建造
 - ② 黑色页岩—硅质岩—磷块岩建造
 - ③ 碳酸盐岩建造（凡口铅锌矿）
- (4) 活动的克拉通环境下产出的含矿地质建造
 - ① 陆相红色碎屑岩建造（滇中砂岩型铜矿和金顶铅锌矿）
 - ② 层控砂卡岩建造（长江中下游铜、金、硫）
铜官山、灵山、冬瓜山、新桥、铜山、武山、城门山、洋鸡山
- 4) 层控矿床主要成矿模式
 - (1) 火山—喷气成矿模式（块状硫化物）甘肃白银厂
海水对流循环示意图
 - (2) 非火山环境喷溢—沉积成矿模式 内蒙东升庙
海底热水或热泉成因
沉积岩中含金属热液的形成与沉淀示意图
沉积建造中层控硫化物矿床的成因特征图解
 - (3) 盆地热卤水成矿模式（广东凡口铅锌矿）
盆地热卤水形成—卤水搬运—矿质沉淀（同生沉淀与后生特征兼有）
 - ① 盆地热卤水的金属搬运方式
 - A. 金属和硫呈硫化络合物或在同一流体中搬运，温压降低，络合物分解，金属沉淀。
 - B. 含金属流体和含硫流体混合作用引起金属硫化物沉淀。
 - ② 矿化与白云岩化的相互关系 白云岩化增加岩石孔隙度
 - ③ 岩溶作用与矿化关系 解释角砾岩化
盆地热卤水成矿模式图
 - (4) 地下水成矿模式（滇中铜矿）
基岩风化—侵蚀平原—地下水渗透—金属沉淀—成岩再造—改造
砂岩铅矿床地下水搬运模式示意图
“萨布哈”成矿模式图
 - (5) 岩浆热液叠加成矿模式
层控砂卡岩矿床成矿模式图

七、放射性和稳定同位素理论与方法的引进及运用

1. 直接测定成矿事件时间的方法

用于直接测定成矿事件时间的样品是在成矿过程中形成的岩石和矿物 ① 蚀变矿物：绢云母、钾长石；② 脉石矿物石英（其中的气液包裹体）；③ 矿脉中的锆石、金红石、电气石；④ 矿石矿物：白钨矿、辉钼矿、方铅矿、黄铁矿-磁黄铁矿。

1) 蚀变矿物的年代学研究

含钾蚀变矿物： $K-Ar / Ar-Ar$ ；绢云母/长石： $Rb-Sr$ 等时年龄

2) 含金石英脉中“热液锆石”的 $U-Pb$ 年龄测定

热液活动中结晶出的锆石（低温） $U-Pb$ 法的最佳对象

3) 矿石矿物的直接定年

白钨矿： $Sm-Nd$ 法；辉钼矿： $Re-Os$ 法；热液磁黄铁矿： $Pb-Pb$ 等时线—逐步铅淋滤法 Stepwise Pb Leaching

2. 间接测定成矿事件时间的方法

3. 成矿年代学与成矿物质来源和成矿过程示踪方法

K—Ar、普通铅法、Rb—Sr、Sm—Nd、U—Pb、单颗粒锆石 U—Pb、Ar—Ar、La—Ce、Re—Os (年龄); He、Ne、Cu、Zn (物质来源)、B、Si、H、C、O、S (流体来源)

八、地球内部流体及与成矿关系

1. 概述

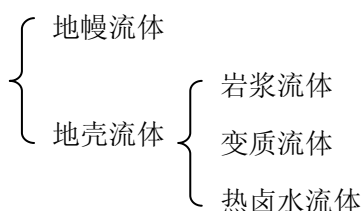
1) 地质流体的概念

熔浆、超临界流体、流体、气体

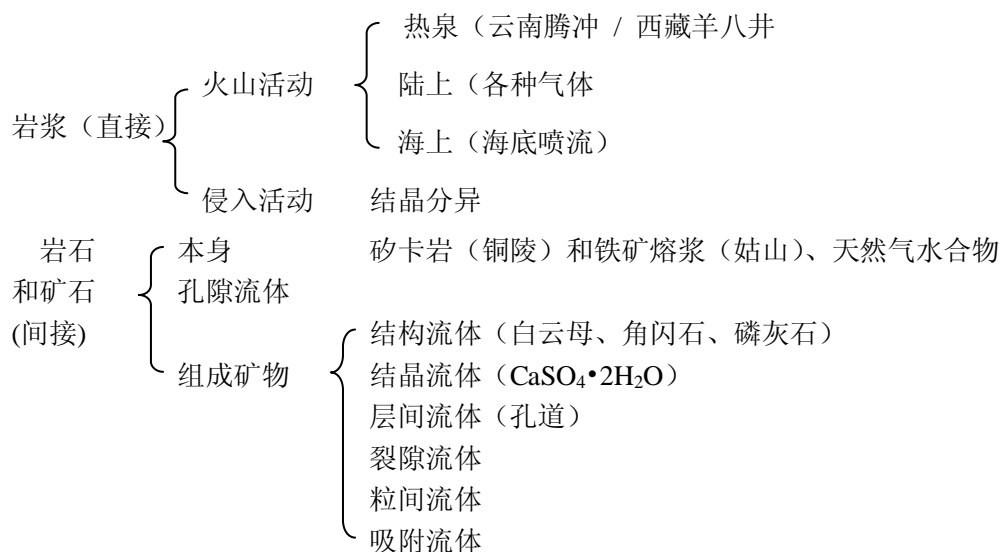
2) 地质流体的形成

岩浆—火山、侵入结晶 / 构造—摩擦生热、减压 / 变质 / 地热

3) 地质流体的种类 (尚需商讨)



4) 地质流体的赋存形式和样品来源



$\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ 白云母 / $\text{K}(\text{Fe}, \text{Mg})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ 黑云母

$\text{A}_{0-1}\text{B}_2\text{C}_5\text{T}_8\text{O}_{22}(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})_2$ 角闪石

5) 地质流体的分布

幔汁 (HACONS 流体) 在地球内部的垂直分带 (幔汁辐射)。其中 A 为 Ti, P, REE, Nb, Ta, Zr, U, Th, Pb, Sr, Ba 等高于二价的两性元素和 Li, Na, K, Rb 等碱金属元素, 流体形式包括气、液、浆、超临界态等。

(1) 地核氢流 (地核)

(2) 氢型幔汁 (下、中地幔) (Li, Na, K, Rb, Cs 的氢化物)

(3) 碱型幔汁 (上地幔气圈)

(4) 氧型幔汁 (中地壳和上地壳气圈)

- (5) 热液、热泉、水合天然气
- (6) 水圈（包括地下水）
- (7) 大气圈
- 6) 地质流体的研究方法
 - (1) 流体的来源

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; δD — $\delta^{18}\text{O}$; U — Pb 同位素; Na/Br 和 Cl/Br 比值; 稀有气体 (主要是 N_2 — Ar — He); 流体包裹体; 地球物理法。
 - (2) 流体的年龄

Rb — Sr 法; Sm — Nd 法; ^{39}Ar — ^{40}Ar 法; 热液矿床; 单个包裹体中流体的年代学。
 - (3) 流体的成分

化学分析法; 流体包裹体成分的测定; 现代地热系统流体的分析; 大洋中脊热流的分析; 火山喷出的岩浆和气体分析; (含金属离子、微量元素和稀土元素分析)
 - (4) 流体的迁移

构造作用 (造山运动、俯冲作用和剪切作用) 所驱使的流动; 岩石或沉积物压实作用所驱使的流动; 热驱动的对流和扩散; 重力梯度; 盐度或浓度梯度; 流体压力和静岩压力所驱使的流动; 地势和地层的倾斜度; 岩石的孔隙度和渗透率的研究; 流体的混合和不混溶; REE 元素对流体相混的指示; 流体包裹体对相分离的研究; 数学模拟及水文地球化学; 卫星遥感;
 - (5) 流体与岩石的相互作用

蚀变作用; 海水与玄武岩的相互作用; 矿区地下水的研究; 热液矿床的研究; 计算机模拟。
 - (6) 流体的热传导

温度测量; 蚀变作用及烘烤边研究

2. 地幔流体的性状与地幔流体作用

地幔流体是与地幔环境 (物相、温度、压力、氧逸度等) 处于平衡的气体和挥发份 (曹荣龙)

1) 地幔流体的类型 (路凤香)

(1) 超深流体

来自地幔深部 / Haggerty 认为的核幔边界 / 杜乐天认为的外地核氢气圈

证据: ① 金伯利岩中缺氧矿物 (碳化物及硅化物 / 硫化物) 和自然元素的发现;

{ 碳化钨 (WC) 结晶温度 = 2765°C > 上地幔温度
 自然硅、二硅铁矿、自然铁、方铁矿、硅铁矿
 含钛硅铁矿、自然铜、自然银

超高温与极度还原环境, 与金伯利岩本身不平衡也不协调……深部高度还原的流体透入到金伯利岩中, 缺氧矿物是深部流体所携带的物质。

② 金刚石中自然元素与合金的包裹体、流体包裹体、 CuCl_2 、 KCl 、 NaCl 包

裹体的发现

(2) 软流层起源的熔 / 流体

证据：“地幔伟晶岩”的存在，残留于地幔内部的上地幔软流层熔融岩浆（亦称为“夭折的岩浆”（failed magma）在高压下结晶成粗状的晶体。

(3) 与幔源岩浆有关的晚期流体

幔源岩浆结晶晚期分异出以 H_2O 或 CO_2 为主的流体。

证据：地幔交代矿物（金云母、富钛矿物、磷灰石、碳酸盐）的存在。

2) 地幔流体的组成的

(1) 主要化学组成

$\left\{ \begin{array}{l} \text{CHONS 简化时以 C-H-O 成分系为代表} \\ \text{HACONS} \end{array} \right.$

H 代表氢、卤素； A 为碱金属； C 为碳； O 为氧； N 为氮； S 为硫族
HACONS 是上述基本组份间复杂的化合物系统，另外还总携带随机分布的不相容元素。

(2) 稀有气体（Rare gas 或 Noble gas, He 氦、Ar 氩、Ne 氖、Kr 氪、Xe 氙）

① 原始来源

通过氦—氖同位素体系研究 $\left\{ \begin{array}{l} \text{洋中脊和热点玄武岩淬冷玻璃} \\ \text{太阳风} \end{array} \right.$

$(^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{地幔}} \propto (^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne})_{\text{太阳}} = 13.6$
 $(^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{地幔}} \propto (^3\text{He}/^4\text{He})_{\text{太阳}}$

}

定量相关

地球内部的地幔原始稀有气体是从太阳获得的。

② 主要源区

通过氦—氩同位素体系研究 $\left\{ \begin{array}{l} \text{超镁铁岩包体} \\ \text{火山气体} \end{array} \right.$

a) 地幔柱型（Plume 或 P 型）源区：热点地区深部的富集地幔

$^3\text{He} / ^4\text{He}$ 为 6×10^{-5} , $^{40}\text{Ar} / ^{36}\text{Ar}$ 为 350

起自下地幔 / 上地幔边界

b) 洋中脊玄武岩型（MORB 或 M 型）源区：洋中脊拉斑玄武岩下面的亏损地幔

$^3\text{He} / ^4\text{He}$ 为 1.1×10^{-5} , $^{40}\text{Ar} / ^{36}\text{Ar}$ 为 2×10^4

起自岩石圈地幔（包括软流层及整个上地幔）

c) 岛弧型（arc 或 Ac 型）源区：岛弧深部和贝尼奥夫带以上的地幔

$^3\text{He} / ^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar} / ^{36}\text{Ar}$ 低于 MORB 值

地幔流体尚受两个浅部源区组分的混染

d) 大气圈型（atmosphere 或 A 型）源区

$^3\text{He} / ^4\text{He}$ 为 1.4×10^{-6} , $^{40}\text{Ar} / ^{36}\text{Ar}$ 为 295.5

e) 地壳型（crust 或 C 型）源区

$^3\text{He} / ^4\text{He}$ 低于 A 型值, $^{40}\text{Ar} / ^{36}\text{Ar}$ 可变

(3) 原始挥发分 (C、H、N……)

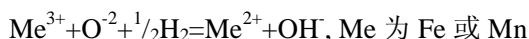
- ① C { 石墨、金刚石碳同位素研究
玄武岩及其地幔包体碳同位素研究

② H

A. 氢在橄榄石 (Mg_2SiO_4) 和辉石 ($\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$) 中的溶解度实验

Bai 等 (1992) 在压力 50 ~ 300Mpa, 温度 1300℃ 条件下, 用地幔岩包体中的橄榄石 ($\text{Mg}_{0.91}\text{Fe}_{0.09}$) $_2\text{SiO}_4$ 作实验, 结果发现橄榄石能够储存到 H_2O 的质量分数高达 0.0034%。外推压力 100Km 深, 则储水 0.03%。

Skogby 等 (1994) 在 H_2 气氛下将含 Fe^{3+} 的单斜辉石加热到 700~800℃, 结果发现单斜辉石贮氢相当于 $1100 \times 10^{-6}\text{H}_2\text{O}$



B. 地幔“无水矿物”中的水精确测定表明, 橄榄石、石榴石、斜方辉石和单斜辉石都含水

橄榄石 $100 \times 10^{-6}\text{H}_2\text{O}$

石榴石最大可含 $200 \times 10^{-6}\text{H}_2\text{O}$

斜方辉石 $450 \times 10^{-6}\text{H}_2\text{O}$

单斜辉石 $580 \times 10^{-6}\text{H}_2\text{O}$

结论: 天然地幔“无水矿物”有能力满足贮存亏损上地幔水含量 (约 $100 \sim 200 \times 10^{-6}$) 的要求

(4) 再循环组分

① 橄榄岩包体中的气液包裹体 (CO_2 地幔流体 / $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 俯冲板块)

② 金刚石

- { 橄榄石族 (P 型) $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-2\text{‰} \sim -7\text{‰}$ (其中的硫化物 $\delta^{34}\text{S} \approx 0\text{‰}$)
榴辉岩族 (E 型) $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-10\text{‰} \sim -20\text{‰}$

其中的硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ { $< 0\text{‰}$ (-11‰) 沉积成因硫 } 地壳背景硫
{ $>> 0\text{‰}$ ($+14\text{‰}$) 水热蚀变硫 }

3) 地幔流体的性质

(1) 易溶于硅酸盐熔体, 特别是富碱的硅酸盐熔体。地幔挥发分具有高的熔体 / 固体分配系数, 因而可以促进低熔点并饱和挥发分的富钾原始岩浆 (金伯利岩、钾镁煌斑岩及富碱熔岩等) 以及地幔交代岩的形成。

(2) 对微量元素的高的溶解度

微量元素包括大离子半径亲石元素 (Ca、K、Rb、Sr、Na) 及高价阳离子和稀土元素 (Ta、Nb、Ti、LREE) 等

绝大部分不相容元素和活动元素具有很高的流体 / 固体分配系数。

(3) 具有使溶质及各种微量元素沉淀、聚集的特性, 即再沉淀作用。

4) 地幔流体作用

(1) 地幔交代作用

地幔流体与地幔岩石反应, 产生矿物交代 (金云母化、角闪石化、单斜辉石化、磷灰石化), 使地幔岩石富集活动元素和不相容元素, 导致地幔富集事件。

- (2) 地幔熔融作用（流体参与），地幔中的局部熔融
- (3) 地球深部变形、蠕变、剪切（流体参与）（深切地幔的断裂带）
- (4) 地幔流体成矿作用（杜乐天）

HACONS 地幔流体 上涌、渗入、与地幔岩石反应 软流层（体）

上隆，并沿拆离断层系统向上运移，膨胀吸热 碱交代热液 碱交代作用 成矿

地幔流体交代型矿床—内蒙白云鄂博 REE

- (5) 地壳重熔

地幔挥发分（CO₂、H₂O、F、P、S、Cl、B 等）和活动性助熔元素（K、Na、Li、Rb、Be、Sr、Ba）对地壳岩石所发生的富集作用，将促使大陆基底岩系的深熔和壳表岩石的分熔，形成各种富含挥发分矿化剂的成矿中酸性岩浆。

3. 岩浆流体的性状与岩浆流体作用

- 1) 岩浆流体的成分

挥发分（H₂O、Cl、F、H₂S、S……）

造岩组分（K、Na、Si、Al……）

成矿元素（Au、Ag、Pb、Zn、Cu、Sn、Fe……）

- 2) 岩浆流体的温度

熔融—流体包裹体均一化温度约为 900~500℃

流体包裹体均一化温度约为 650~80℃

超临界流体（张荣华）

- 3) 岩浆流体的形成机制（岩浆分异作用）

- 4) 岩浆流体作用

(1) 对熔体结构的解聚—降低熔体粘度（熔体结构研究—莫宣学）

(2) 降低硅酸盐矿物的晶出温度

(3) 碱交代作用—金属成矿

4. 变质流体研究进展

- 1) 概述（研究简史）

(1) Touret, 1971, 通过挪威南部麻粒岩中流体包裹体研究，发现大量 CO₂ 流体存在

(2) Taylor, 1977, 水—岩相互作用

(3) Fyfe, 1978, 发表 Fluids in the Earth's crust, 阐述了流体在地壳运动中的作用

(4) Touret, 1982, 高压超高压变质流体（榴辉岩）

(5) Walther 等, 1986, 变质过程作用中的流体—岩石相互作用

(6) Forst 等, 1987, 流体作用与变质岩成因

(7) Cameron, 1988, 流体来源和成因

(8) Bridgwater 等, 1989 流体运动与元素迁移

Torgersen, 1991, 大规模流体运移机制

Thompson 等, 1992, 变质流体迁移过程中物质和能量输运

(9) 徐学纯, 1992/1993, 变质流体性状及其演化

(10) O'Hara, 1994, 剪切带流体—岩石相互作用

(11) Heinrich 等, 1995, 接触变质流体研究

(12) 徐学纯, 1996, 流体地质学

2) 下地壳及麻粒岩相变质流体研究

(1) 流体成分及其对变质作用的影响

①麻粒岩中的变质流体类型

Touret 在 1971 年首次在挪威南部麻粒岩中发现富 CO_2 的流体包裹体。经过研究, 确定麻粒岩相变质流体以高密度 CO_2 为主, 另有少量的 H_2O 、 CH_4 、 H_2S 等

Lamb 等于 1987 年提出典型麻粒岩相条件下 C—O—H 体系中的流体受 f_{O_2} 影响

f_{O_2}	$\left\{ \begin{array}{ll} \text{较高} & \text{H}_2\text{O—CO}_2 \text{ 混合流体} \\ \text{中等} & \text{富 H}_2\text{O 流体} \\ \text{低} & \text{H}_2\text{O—CH}_4 \text{ 混合流体} \end{array} \right.$
------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Isterate 等 1989 在意大利锡山麻粒岩中首次发现了高密度富 N_2 和 CH_4 , 而 CO_2 含量很少的变质流体

结论: 麻粒岩中的变质流体成分可变

② CO_2 来源

Reulen, 1977, ($\delta^{13}\text{C}$)

$\left\{ \begin{array}{l} 2/3 \text{ 的 } \text{CO}_2 \text{ 是深成的} \\ 1/3 \text{ 的 } \text{CO}_2 \text{ 是由局部岩石的脱碳反应和石墨的氧化作用形成的} \end{array} \right.$

Newton, 1980, CO_2 属地幔来源 (地幔脱气/射气作用)

Frost, 1980, 流体 CO_2 来自深部岩浆

$\left\{ \begin{array}{l} \text{近岩体 } \text{CO}_2 \text{ 为主的流体引起麻粒岩相变质作用} \\ \text{远离岩体 } \text{H}_2\text{O} \text{ 为主的流体引起角闪岩相变质作用} \end{array} \right.$

③麻粒岩形成的三种主要干化机制 (Newton, 1986)

A. 部分熔融吸收了岩石中的 H_2O

B. 深部地壳来源的 CO_2 流体的进入, 稀释和冲洗原岩中的 H_2O
(带走 K、Rb、Sr 等大离子亲石元素, 导致亏损)

C. 浅部接触变质的烘烤作用驱赶了岩石中的 H_2O , 导致干化作用和麻粒岩的形成。

(2) 地壳深部流体迁移和演化

Bridgwater, 1989 专著 Fluid Movement - Element Transport and the Composition of the Deep Crust

①流体迁移和演化机制

②流体—岩石相互作用过程中的物质和能量输运

③流体控制下的元素迁移

3) 高压超高压变质流体研究

(1) 高压超高压变质流体的成分特征

① 榴辉岩变质流体: $\text{CO}_2\text{—H}_2\text{O—N}_2\text{—CH}_4 / \text{N}_2\text{—CO}_2 / \text{H}_2\text{O—NaCl}$ 或 $\text{H}_2\text{O—NaCl—CO}_2 / \text{H}_2\text{O—CO}_2\text{—N}_2\text{—CH}_4\text{—(NaCl)}$ (N_2 含量高)

② 大别山熔融包裹体硅酸盐玻相— $\text{CO}_2\text{—H}_2\text{O—CH}_4\text{—NaCl}$

(2) 高压变质岩中原生流体包裹体的保存

镁铝榴石内的蓝晶石包裹体保存有原生 $\text{H}_2\text{O—CO}_2$ 低盐度流体包裹体

① 蓝晶石包体和主矿物石榴石可压缩性低

② 在 P—T 区间内等容抬升, 压力降低/温度降低 PV=nRT

(3) 高压超高压变质岩中流体来源

① 在浅部, 俯冲板片中由成岩作用和低级变质反应形成的大量孔隙水和 $\text{CH}_4\text{—H}_2\text{O}$ 流体不断排除

② 在深部, 俯冲洋壳的低温含水矿物发生变质反应, 释放出 H_2O 和 CO_2 流体

(4) 变质流体的演化

① Philippot 等, 1995, 西阿尔卑斯 Dora-Maira 地块不同变质阶段的流体包裹体

A. 高压期形成的原生 $\text{H}_2\text{O—CO}_2\text{—N}_2$ 低盐度流体包裹体;

B. 减压期形成的次生 $\text{H}_2\text{O—CO}_2\text{—NaCl}$ 高盐度流体包裹体;

C. 退变质期形成的次生 $\text{H}_2\text{O—NaCl}$ 低盐度含水流体包裹体。

② Anderson, 1993, 挪威加里东造山带变质级与变质流体成分关系

A. 榴辉岩和高压麻粒岩: $\text{CO}_2\text{—N}_2 / \text{H}_2\text{O—NaCl}$ (不混溶流体) 或 $\text{H}_2\text{O—N}_2$

B. 麻粒岩或麻粒岩相退变质榴辉岩: CO_2 或 CO_2 为主流体, $\text{N}_2 < 2.5\%$;

C. 角闪石相退变质岩石: $\text{H}_2\text{O—NaCl}$ 流体 (低盐度)。

△ 意义: 变质过程—流体演化

4) 剪切带中的流体—岩石相互作用 (钟增球)

(1) 剪切带中的流体流动

① 深部塑性区韧性剪切带 (变质流体和岩浆流体)

流体沿不均一界面 (不同岩性界面或老断层和剪切带) 以通道方式运移汇聚、渗透、对流和循环, 扩散是次要的。

② 浅部脆性区脆性剪切带 (大气降水比较重要)

流体通过裂隙系统汇聚、迁移或流动。

*天然剪切带中渗透率通常是各向异性的, 因此流体的流动具方向性。

(2) 流体与岩石流变

流体 (或熔体) 的数量、成分或赋存状态直接影响着岩石的流变。

(3) 剪切带的成分变异

① 应变局部化和力学失稳引起化学不平衡和组分的迁移 (构造地球化学)

② 流体—岩石相互作用和变质反应的加强促进成分变异。

△ 剪切带中流体的渗透和流动不仅会引起剪切带的成分变异,而且还是成矿的有利因素。

(4) 剪切带的体积变化

剪切带的体积亏损与流体的渗透和流动有关

矿物 A+流体→矿物 B+孔隙

(5) 高压剪切带中的矿物—流体—熔体相互作用

Andersen 等, 1991, 挪威 Bergen 加里东榴辉岩剪切带

① $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{N}_2-\text{NaCl}$ 流体相沿剪切带进入;

② 流体不混溶分成 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ / CO_2-N_2 两种流体;

③ 沿剪切带的流体通道, 榴辉岩相发生部分熔融;

④ $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ (卤水) 在熔体中溶解, 留下含水量低的含碳流体;

⑤ 在剪切带低应变域, 从熔体结成长英质伸展脉。

5) 接触变质作用的流体研究

(1) 流体成分

各种接触变质地体的流体成分有较大差别, 主要取决于原岩性质、侵入体的特点和流体来源。

Aslund 等, 1995 昆士兰 Revenue 花岗岩接触变质带 (早期含 Na、Ca 和 Cl 的卤水 / 晚期岩浆流体)

(2) 接触变质过程的流体流动及其模式

流体流动的规模、路径、方向、渗透机制 (Heinrich 等, 1995 / Symmes 等, 1995)

(3) 接触变质过程的流体—岩石相互作用

交代、部分熔融及浅色脉的形成 (Buick 等, 1995 / Aslund 等, 1995)

5. 沉积盆地热卤水流体及其成矿意义 (王焰新、沈照理)

1) 流体来源

古海水 / 大气降水 (雨水、湖水、地下水) / 矿物结合水 / 地层原生水

2) 流体组成

HCO_3-Na 和 $\text{CH}_3\text{COO}-\text{Na}$ 水 / $\text{Cl}-\text{Na}$ 水和 $\text{Cl}-\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 水 (盐度 100~300g/L) / $\text{Cl}-\text{Na}-\text{Ca}-\text{K}$ (Cu、Pb、Zn) (盐度>300g/L)

3) 卤水成因

地下蒸发浓缩/蒸发岩的溶解→卤水盐度和浓度 / 粘性土的膜过滤效应, 结晶岩、花岗岩中含氯硅酸盐 (如云母、角闪石) 的水解→卤水盐分升高

4) 成矿意义

(1) 沉积盆地水本身含有较高的成矿元素

(2) 沉积盆地水在演化过程中从周围围岩中浸取成矿元素

5) 有关矿床

(1) 密西西比河谷型 (MVT) Pb、Zn、Cu、Ba、F 矿床 (Mississippi Valley Type)

- (2) 页岩 Pb、Zn、Ba 矿床
- (3) 裂谷盆地和红层 Cu 矿床
- (4) 砂岩 U 矿床

6. 地质流体与成矿

1) 地质流体的种类及其成矿专属性

(1) 硅酸盐熔融体+M

通过结晶分异或不混溶作用从硅酸盐熔融体中分离出盐水溶液和挥发组分/铜镍硫化物矿床、铬铁矿矿床和矿浆型磁铁矿床、部分伟晶岩矿床

(2) $H_2O+NaCl+M$

① 高盐度成矿流体[w (NaCl) >26.3%]

斑岩型 Au 矿、斑岩型 Cu 矿或斑岩型 Cu (Mo)、Cu (Au) 矿床 (玉龙、德兴)

② 低盐度成矿流体[w (NaCl) <10%]

赣南 W、Sn、Be、Li, 浅成热液 Au、Ag、Pb、Zn、Cu

(3) H_2O+CO_2+M

太古代绿岩带金矿床 (玲珑金矿)

(4) H_2O +有机质+M

Fe、Mn、P、Al 沉积矿床/层控 Au、Pb、Zn、Hg、Sb、As、U 矿床 (秦岭公馆大型汞锑矿、滇黔桂汞锑金砷低温矿床组合)。

2) 地质流体的来源

- (1) 岩浆上升过程中因分解或结晶释放的流体;
- (2) 变质脱水—脱挥发分产生的流体;
- (3) 富水沉积物因压实或构造收缩挤压产生的流体;
- (4) 大气降水或海水下渗循环演化产生的流体
- (5) 地幔排气作用产生的流体
- (6) 交代作用产生的流体

3) 促使成矿流体上升或侧向迁移的驱动力

- (1) 减压作用使成矿流体从地壳较深部位迁移到较浅部位;
- (2) 地壳热结构改变而诱发流体循环并影响大范围围岩的流体岩石反应;
- (3) 因 (造山期间) 构造挤压和地热抬升驱动深部流体大规模侧向运移;
- (4) 不同部位的应力差或流体压力差导致流体侧向迁移。

块状硫化物矿床、斑岩矿床、矽卡岩矿床之类的岩浆或交代热液型矿床, 其形成均与结晶岩浆排出的热流体流动沉淀或交代作用有关, 因而起主导作用的可能是前两种驱动力。

大多数产自变质岩或沉积岩中的热液矿床, 其金属矿质的搬运往往涉及到强大的侧向分力 (如 MVT 型 Pb—Zn 矿床), 起主导作用的可能是后两种驱动力。

4) 成矿流体运移途径的确定 (提问)

- (1) 区域蚀变岩石 (白云石化、硅化、钾化……)
- (2) 区域蚀变构造 (含有矿化痕迹的区域构造, 如剪切带、裂隙带)
- (3) 热水沉积岩 (壳内流体的地表排出口附近, 海底热水喷流沉积)
- (4) 热水成因角砾岩 (有热水系统在浅表地区活动引发的构造岩带, 有角砾岩、破裂化岩石带等)
- (5) 热液矿物脉 (矿物封闭的微裂隙带), 火成岩脉 (群) (伟晶岩脉)
- (6) 有机质成熟度
- (7) 地气异常 (气体含量或成分异常变化)
- (8) 古地磁异常
- (9) 矿物包裹体
- (10) 同位素区域分布及变异 (S、O)
- (11) 成矿元素及伴生元素异常
- (12) 岩相古地理分析及古汇水区的查定
- (13) 已知矿床的分布型式

地质、地球物理、地球化学、遥感方法追索, 宏观/微观结合

5) 成矿流体运移方向的确定

(1) 宏观地质特征的变化

- ① 矿化梯度变化
- ② 交代蚀变分布 (同一期)
- ③ 次生矿物组合与分带
- ④ 次生重磁化
- ⑤ 成矿组合变化
- ⑥ 温压梯度变化
- ⑦ 物理特征变化

(2) 微观地质特征的规律性变化

- ① 流体包裹体的分布 (多→少)
- ② 主要化学成分变化
- ③ 同位素和微量元素 (如碳、硫、氢、铝、锶、稀土和铂族) 变化
- ④ 氧化—还原态分布与变化

△在前述方向性或规律性突然被中断或破坏之处, 通常可能意味着不同来源的流体发生混合, 使成矿流体的物理化学条件急剧改变, 促使矿质沉淀、堆积, 因而这样的部位又很可能是成矿有利地段。

6) 流体成矿机理

- (1) 不同种类流体混合导致成矿 (岩浆流体/大气水混合……)
- (2) 单一流体不混溶导致成矿

沸腾 $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$ (不混溶) →

(H_2O (低密度蒸气相) / $\text{H}_2\text{O} + \text{AlOCl}$ (强盐水熔融相))

- (3) 盐水体系中有有机质的参与导致成矿
 - ① 活化萃取（有机组份与无机物相互作用）
 - ② 形成金属有机络合物迁移（有机络合物）
 - ③ 沉淀聚集（改变 pH、Eh）
 - ④ 提供成矿所需的热源（有机质的裂解和聚合）
- (4) 水—岩（交换）反应导致成矿（物质、能量交换）
- (5) 物化条件改变导致成矿
- 7) 流体成矿过程模拟
 - (1) 热质运输模拟
 - (2) 成矿流体化学质量迁移数值模拟 / 成矿流体化学水—岩相互作用地球化学模拟
 - (3) 流体运输—化学反应耦合动力学研究
 - （描述热质运输的偏微分方程 / 描述反应动力学的常微分方程 / 描述平衡过程的质量作用和重量平衡代数方程）综合求解

九、壳幔相互作用与成矿

1. 定义

壳幔成矿学 (crust - mantle metallogeny) 是区域成矿学的一个新分支，主要研究壳幔系统多层圈之间的相互作用，特别是能量和物质交换及其对矿床形成过程的制约。其主要任务是通过壳幔相互作用与成矿关系的研究，阐明矿床的形成和分布规律。

2. 研究意义

- 1) 壳幔成矿学是联结深部地质学与区域成矿学的重要桥梁
- 2) 成矿作用与深部过程研究相联系已成为当今区域成矿学的一种重要发展趋势

3. 研究内容

大陆壳幔多层圈相互作用与成矿的时空和成因联系是壳幔成矿学研究的核心内容

- 1) 区域壳幔相互作用事件幕 (岩浆活动事件幕) 与成矿作用事件幕的时空耦合关系及其产物的时空分布规律
- 2) 幔源岩浆的底侵作用与深部地壳的部分熔融和多层位岩浆—热流体系统的形成、演化及其对造矿组分富集成矿过程的制约
- 3) 幔源岩浆的分异演化与壳幔同熔和 (多层位) 岩浆—热流体系统的形成、演化及其对造矿组分富集成矿过程的制约
- 4) 区域壳幔相互作用与成矿过程模型

4. 研究方法

“岩石探针”分析是进行壳幔成矿学研究的主要技术支撑

- 1) 物质组成研究与地球物理场分析结合
- 2) 地质及岩 (矿) 相学观察与同位素年代学测定结合
- 3) 演化历史分析与作用过程鉴别结合
- 4) 典型解剖与综合对比结合

5. 实例

十、低温热液成矿作用提到了议事日程

1. 概述

低温 $<250^{\circ}\text{C}$ ，实验、测温

低温热液矿床 (epithermal deposits) 主成矿温度 $<200^{\circ}\text{C}$ (美国中西部/中国西南地区)

2. 进展

1) 低温热液矿床类型

- (1) 卡林型金矿：80 年代在扬子地块西南缘滇黔桂交界区和西北缘川、甘边界找到了大量卡林型金矿 (微细浸染型金矿) (Au 与 Hg、Sb、As 等在低温下共生，找金在已知的 Hg、Sb、As (雄黄、雌黄、度砂) 矿田成矿带中进行，效果很好)
- (2) 浅成微细浸染热液型金矿，福建上杭紫金山金矿，陆相火山岩区
- (3) 火山岩型银矿
- (4) 非金属矿产
- (5) 砂岩型矿床 (Cu、Ca—Mo、Mo、Pb—Zn、Cu—Ag、V) / 含碳岩系中的矿床 / 不整合脉型铀矿 / 碳硅泥岩型铀矿

2) 低温热液矿床集中分布区的地质特点

- (1) 巨厚的地壳 36 - 50km
- (2) 基底区域变质作用不强，成矿元素未被结晶 (变质) 分异作用排出，成矿元素含量较高。
- (3) 盖层巨厚，长时间，大面积稳定下沉，岩浆活动不强烈。
- (4) 成矿物质来自深部 (同位素)。
- (5) 沉积环境交替变化 (海进/海退、氧化-还原)

3) 低温矿床和矿化点 (85 个) 的研究

- (1) 分散元素矿床：贵州烂木厂和云南南华的铊矿，贵州牛角塘和云南都龙的镉矿，云南临沧的锆矿，鄂西南鱼塘坝和西秦岭拉尔玛的硒矿，四川大水沟的碲矿
- (2) 金、银和铂族元素等贵金属的低温成矿

4) 低温条件下元素的活化、迁移及沉淀实验

- (1) 铂族元素的低温迁移富集能力 (S、Cl 络合物)
- (2) 金与二氧化硅在成矿过程中的地球化学关系
- (3) 金的沉淀机理—歧化反应实验
- (4) 水—油—岩系统中金银低温成矿作用实验

十一、非金属矿床研究获得重大进展

1. 非金属矿床成矿规律

1) 含矿建造研究

1990 年徐惠忠首次提出了中国非金属矿床含矿建造的分类方案。

2) 成矿系列研究

1989 年陶维屏根据非金属矿床的找矿特点定义了非金属矿床成矿系列的概念和划分原则，根据已掌握的资料划分出中国非金属矿床的 13 个成矿系列及它们的五种形成模式。

3) 非金属矿床区域成矿规律 (三个层次、三类图件)

单矿种矿床区域分析→矿点分布图

从区域成矿的角度着眼研究某一非金属矿种的矿床分布规律→单矿种成矿

预测图

从地壳三维空间演化入手,研究非金属矿床成矿构造环境与成矿活动的各种必然规律,注重大陆壳形成和以后的活动对非金属矿床形成与赋存的相互关系,引入了全球构造的概念。→中国非金属矿床成矿地质图

2. 非金属矿物学和矿石工艺学

- 1) 非金属矿物: 矿石特性研究和各种测试手段的研究。

粘土矿物

蛇纹石石棉

- 2) 非金属矿物、矿石工业应用研究(环境矿物材料 / 柱撑矿物)

袁慰顺等对膨润土改型及海泡石应用开发方面的研究

- 3) 非金属矿石工艺学研究(比较分散)

- 4) 工业矿物学和岩石学

人工制造矿物、矿石的科学、人造金刚石、云母、压电石英

3. 非金属矿床勘查技术和方法

- 1) 电法、磁法→石墨

- 2) 浅层地震技术→各类非金属

- 3) 地球物理 探测含矿条件 / 了解矿床开采技术条件 / 原位矿石质量测定

- 4) 遥感可行, 化探不可行

十二、非传统矿产资源概念的提出

1. 定义与范围

非传统矿产资源是指, 由于当今技术、经济原因尚未进行工业利用的资源和尚未发现其用途, 因而未被看作矿产的潜在资源, 或虽为传统矿产资源但因地质 地理原因极难发现的矿产资源。

2. 非传统矿产资源

- 1) 新类型

- (1) 金矿

60 年代美国西部卡林型金矿 / 70 年代加拿大太古宙绿岩带中的蚀变岩型金矿 / 80 年代澳大利亚红土型金矿

- (2) 银矿

Pb、Zn 伴生银矿→以银为主伴生铅锌→独立银矿(江西贵溪冷水坑和浙江台州斑岩型银矿)

- (3) 铂族元素矿床

铜镍硫化物伴生矿→80 年代南非和美国开发利用了基性超基性层状杂岩中的独立铂族矿床→90 年代俄罗斯黑色页岩中特大型层状 Au—Pt 矿床

黑色页岩中特大型层状 Au—Pt 矿床的发现(中晚里菲期, 相当于中国北部震旦纪)。俄罗斯干谷金矿发现于 60 年代, 70 年代已经勘探, 求得 1350~1620 吨金储量, 平均品位 2.7g/t。最近几年重新评价了该矿的含 Pt 性, 结果发现 Pt 的品位与 Au 不相上下储量翻了一番, 由一个特大而较贫的金矿变为一个特大而中富的金—铂矿。该矿床的矿体厚几十米(局部超过 100M), 埋藏颇浅, 可露采, 经济价值巨大。因此, 此类贵金属矿床非常值得重视。

- (4) 锆矿

锆英石砂矿→80 年代初内蒙原生锆矿、含水和钙钠的锆硅酸盐矿物

- (5) 铍矿

长英质伟晶岩中的绿柱石→80年代初在巴西发现了产于科马提岩中的绿柱石

(6) 铀矿

澳大利亚和加拿大不整合脉型铀矿；澳大利亚钙结核型铀矿；新疆堆浸砂岩型铀矿

(7) 金刚石

金伯利岩或钾镁煌斑岩→超高压变质带（大别山）

金刚石的傳統矿床类型是金伯利岩型或钾镁煌斑岩型。但近年来在板块碰撞带的超高压变质带中陆续发现微粒金刚石。首次发现是在哈萨克斯坦的片麻岩中；第二例见于我国的大别山；第三例是在挪威西部。这些微粒金刚石粒度不大：分别为 0.02—0.13mm，0.01—0.06mm，0.01—0.02mm。它们主要以包体形式产于高压变质岩中。这种微粒金刚石有可能成为未来金刚石矿的新来源。据《俄罗斯科学院报告》（1997，No.1）最近对原生金刚石矿床类型又有新发现，即著名的乌拉尔金刚石砂矿。其原生来源类型之一是外来侵入凝灰岩。96年12月在阿姆斯特丹召开的“国际21世纪金刚石成矿远景讨论会”指出：20世纪在金伯利岩中找金刚石的时代已经结束，21世纪应在活动带超高压变质岩区及煌斑岩去寻找金刚石。所有这些实例说明：突破各类矿床传统成因观念和成矿条件的束缚是发现新类型矿床的必由之路，而先期发现的矿床类型也未必是某种金属和非金属矿床的主导类型。

(8) 液态矿物原料

陆间裂谷带热卤水（氯化钙、食盐、溴、铜、铅、锌、铁等元素的组合，如加利福尼亚和红海的热卤水资源）

岛弧和阿尔比斯褶皱区热水（Be、NH₃）

自流盆地水和卤水（生产食盐、钙盐、钡盐以及铁、溴、碘）

现代蒸发盐盆地卤水（苏打、食盐、钾盐、Li、Br、B、K、Cs、Rb）

海水（Na、Cl、Mg、Br）

伴生的和废弃的水和卤水（溴、碘、氯化钙、食盐，油田）。

目前许多国家都在进行液态矿物原料的研究。原因包括 ① 许多矿物原料的来源枯竭；② 世界市场上某些种类的原料需求增加；③ 用地下水生产各种原料所得的利润比用传统方法生产更高；④ 生态因素也起不少的作用；⑤ 石油、天然气、煤产量不断增长，大大增加了稀有元素含量高且可顺便回收的高矿化水数量。综合利用这些工业矿化水经济效益高，因为这可使从深部含水层中抽水和建设基础设施的费用降到最低程度。

2) 新领域

(1) 海洋矿产资源

类型多，矿种多，资源量大 / 盐溶液、结核、金属软泥、Gas Hydrate 和油气
海洋矿产是一个极富挑战性的领域。据估计，仅太平洋就有 15000 亿吨多金属结核，预测的 Cu、Ni、Co 资源量达到 200—250 亿吨，而且这种矿产是可再生的，现在太平洋每年可形成 600 万吨结核。在已勘探的结核中所含的 Co、Ni、Mn 分别是大陆已知这些金属储量的 20、90 和 42 倍，而且认为海洋矿产结核的开采可满足人类需求的时间是：Cu—3 千年；Ni—7 万年，Mn—1 千万年，Co—42 万年。这几乎成为天文数字。

在深海海底的硅藻土含有大量 Ca、Si，红色粘土含有 25% 的氧化铝。在红海海底深断裂处发现有富含 Ag、Zn、Cu 的金属软泥，在苏丹和阿拉维的海岸边在 2000m 以内深处发现 18 个矿床，正在寻求从海底开采这些金属的方法。

海水本身就是各类元素的 3%浓度的溶液，当今已经从海水中提取盐 30%，Mg20%以上以及相当数量的 Na、S 和 K。其它元素含量较低，但总量很大，例如 1m³海水含 Au0.008mg，那么在世界大洋海水中含 Au 总量就达到 100 亿吨之多，而 U 则将近 40 亿吨。

(2) 人工矿床

俄罗斯学者近年来提出了人工矿床的概念，认为所谓“人工矿床”是自然因素和人类生产活动综合影响的产物，主要是指矿山的废石场和尾矿坝等有用资源。

由于开采的富矿渐少而贫矿增加，致使采选过程中产生的废料逐年增多，给环境带来不利影响。目前，在铁矿石采选过程中，采出岩矿物质总体积的 85%是废石场和尾矿坝废料。选矿厂，每选出 1 吨金属，就要产生 30—100 吨尾矿。若原矿品位继续下降，则再过 20—25 年要获得同样数量的黑色和有色金属，采选的矿石数量将增加 1 倍，废料数量也将增加 1 倍。目前，选矿过程有用组分的损失很大，对大部分有色金属矿石来说，选矿损失达 10—25%（有时高达 40%），对稀有金属矿石，选矿损失高达 30%—55%。在尾矿中，某些残余金属的含量水平较高，有时甚至超过原生矿石。

对“人工矿床”进行模拟和地质—工业评价，是选矿生产发展现阶段的一项迫切任务。B. И. 雅科夫列夫等（1996）论述了“尾矿坝型人工矿床开采利用的技术可行性”。他指出：每年有 170—180 亿吨废石和矿产加工废料进入废石场和尾矿坝，而最终产品大约仅占采出物质总体积的 3%。所有这些尾矿坝都可作为人工矿床加以研究。这样便出现了尾矿的开采、运输和尾矿坝的复田问题。

国际学术界已对此问题高度重视，仅 1998 至 1999 年就召开了几次学术会议。如 98 年 1 月在美国柯林斯堡召开“‘98 尾矿石与矿山废物会议”，3 月在美国图森召开“‘98 废物管理会议”，8 月将在加拿大卡尔加里召开“第 3 届国际矿产与冶金工业废物处理与回收讨论会”等。

人工矿床研究和评价，不仅具有资源利用的经济效益，它的评价内容不仅包括有用组分及其含量，还要评价有害组分含量及其迁移规律以及对环境的污染危害评价等，进而制定出有效的防治措施，从而使这项工作具有极其重要的环保意义。

3) 新深度

3. 矿产资源研究和利用的非传统方法

1) 新工艺

(1) 生物成矿

生物—有机物—有机流体参与金属矿床的形成

① 俄罗斯、德国大陆科学钻探发现，在地壳 8—12 公里深度范围内，存在大量流体，且正发生着流体—生物—成矿作用。瑞典大陆深钻在地下 4—6 公里的结晶岩中获得大量含烃类的高温流体矿泥。这些科学钻探证明，地壳深部存在大量 CO₂、烃类、盐水流体。

② 北美特大型 MVT 矿床中存在大量烃类包裹体，成矿流体由烃类和盐水溶液构成。

③ 我国滇黔桂微细浸染型金矿、长江中下游某些层控铅锌多金属矿床成矿流体中也均含烃类流体。某些油气田原油中含金达工业品位，汞的储量达超大型规模。

传统金属矿床的形成,忽略了生物、有机物流体的作用,因此金属矿床的形成,普遍归纳为由高温—低温的逐渐成矿过程,高温下岩石、矿物中的微量有用元素才能被活化出来。温度逐渐降低后,金属离子溶解度降低从而过饱和沉淀下来,形成工业富集。在生物、有机质、有机流体参与下,在低温(60—150℃)条件下,金属离子可以从岩石、矿物中被活化萃取出来,形成金属—有机络合物长距离迁移,在较高温度条件下金属—有机络合物不稳定,热裂解,沉淀聚集成矿。因此,在生物、有机质、有机流体参与下金属矿床的成矿概括起来应为:低温条件下的基化(形成各种羧基、烃基、炭基等)、而在内生成矿过程中的烷化(各种烃类化合物,如甲烷,乙烷等)。因此,在找矿方面可以建立新的水平和垂直分带有机地球化学探矿模式。

(2) 生物找矿

利用生物、微生物的吸附特征,根据特殊的微生物与某些金属元素的富集关系,进行找矿。例如:腊状芽孢杆菌对金有特殊韵关系,在金矿体附近,醋状芽孢杆菌大量富集。为此可利用腊状芽孢杆菌作为隐伏金矿床的找矿标志。

(3) 生物选矿

我国众多微细浸染型金矿、锰矿、铁矿为多元素复杂组分难溶难选的矿床,利用生物工程技术进行这些难溶、难选矿种的选矿是一个大有作为的领域。前苏联有色金属研究所,利用生物形成有机酸从而对难溶酌微细粒金矿进行选矿并已投入工业生产。利用有机酸使超微金粒形成较粗颗粒,从而分离出来。

(4) 生物净化

利用生物技术,对矿山尾矿、矿碴、污水等进行微生物净化处理,是一项重要的绿色革命。

4. 非传统矿业(高附加值型、高新技术型、后矿业经济型、综合服务型)

1) 稀土元素矿产

自80年代早期以来,稀土在能源、环保、高新技术产业中起着越来越重要的作用。① 代替重金属颜料;② 用做柴油添加剂;③ 作为水泥添加剂,从而降低能耗;④ 磁共振照相;⑤ 挠性超导体;⑥ 储存动态全息图像;⑦ 光纤脉冲转换器;⑧ 固体氧化物燃料电池。

2) 非金属矿产

环保事业的发展和防治要求的提高为一些非金属矿产开辟了应用的新领域。如前苏联切尔诺贝利核电站核物质泄漏后,人们利用沸石修筑护坝,以防止受到放射性污染的水发生渗透;同时在土壤中直接施放沸石、硅藻土等天然吸附剂,可以防止放射性元素被冲走并随之参与植物的生命循环。此外,在城市垃圾和工业三废处理中,非金属矿产均有广泛应用。

3) 磷霞岩

磷霞岩是顺便回收贵金属的非传统原料。磷霞岩由85%的霞石及其交代产物组成。霞石是富含氧化铝的矿物,在氧化铝生产过程中,可顺便回收Au、Pt、苛性钾和镓等。还可回收某些稀有和分散元素。

5. 非传统矿业经济

1) 两种资源与两个市场(国际、国内)

2) 战略资源与国家安全

3) 资源开发与生态保护

4) 矿地产经济

十三、微生物成矿作用

1. 微生物成矿作用方式

1) 微生物直接聚集成矿元素的作用

微生物在生存过程中有选择性地吸取某些元素导致成矿元素的生物聚集（硅藻土，Si）

2) 微生物改变环境物化条件的作用（PH，络合物）

从而改变成矿物物质的沉淀过程与性质

3) 微生物通过产生有机质而参与成矿作用

生物死亡后产生大量有机质

4) 微生物通过改变元素价态而参与成矿作用

生物的新陈代谢将成矿元素从一种状态转变为另一种状态（Eh）

2. 微生物成矿作用研究进展

Fe、Mn、Au、Cu、S、P

3. 微生物成矿理论的一些重点研究动向

1) 生物→有机体→流体成矿系统的研究

生物→预富集/有机质→再富集/有机流体→成矿

2) 综合对比研究现代的与古代的生物成矿作用的机制和条件

3) 从生物地质学的其它相关分支学科角度综合研究微生物成矿作用

4) 微生物成矿机制的新应用

微生物找矿，细菌数量固定异常区（Au）

微生物选矿

十四、矿田构造学研究取得重要进展

1. 主要进展

1) 课程建设与研究生培养

60 年代，翟裕生在北京地质学院开出矿田构造课程，开始培养矿田构造方向研究生（池三川、姚书振、邓军、黄方方等），出版内部教材，组织构造学术交流活动。

2) 控矿构造类型

地层不整合面控矿/侵入接触构造体系控矿/构造裂隙控矿/韧性剪切带控矿/变质核杂岩及伸展构造控矿/变质构造控矿/层控矿床的控矿构造（层理、同生、假整合和不整合与岩溶、褶皱、复合构造）

3) 构造控矿规律

构造体系控矿—构造分级控矿—构造复合控矿—构造分带性控矿—构造等距性控矿

构造应力场及其控矿作用（孙殿卿、杨开庆）

构造地球化学场控矿/侵入岩区含矿岩体“三层结构”模式（翟裕生）

体系类型	形成时间	区域应力	岩浆侵入机制	岩浆演化	岩浆活动次数	成矿可能性	矿床成因类型	岩体实例
浅层次接触构造体系<2Km	晚	拉张环境	渐进顶蚀、吞蚀作用、火山口沉陷、隐爆作用、岩墙扩展	较酸性	复杂	大	热液型 角砾岩筒型 矽卡岩型 斑岩(玢岩)型	丰山洞 铜绿山 铜山口

中层次接触构造体系 2~5Km	↑		↑	↑	↑	↑	热液型 矽卡岩型 矿浆贯入型	铁山 阳新月山
深层次接触构造体系 >5Km	早	挤压环境	气球膨胀 穹隆底辟	较基性	简单	小	岩浆 自变质型 伟晶岩型	青阳

翟裕生等，长江中下游地区铁铜（金）成矿规律，北京：地质出版社，1992

4) 矿田构造研究方法

5) 矿田构造研究应用于隐伏矿床预测

池三川，隐伏矿床（体）的寻找，武汉：中国地质大学出版社，1988

淮南煤田预测，滑脱构造研究 20 亿 t +90 亿 t（东部）

韧性剪切带控矿→广东河台、海南戈枕、江西金山、辽宁排山楼

2. 发展趋势

1) 构造形迹控矿研究→构造动力控矿成矿研究

2) 三维控矿分析→四维控矿分析

3) 浅部构造研究→深部构造研究

4) 定性研究→定量研究

5) 单纯构造研究→构造—流体—成矿系统的综合研究

十五、成矿系列

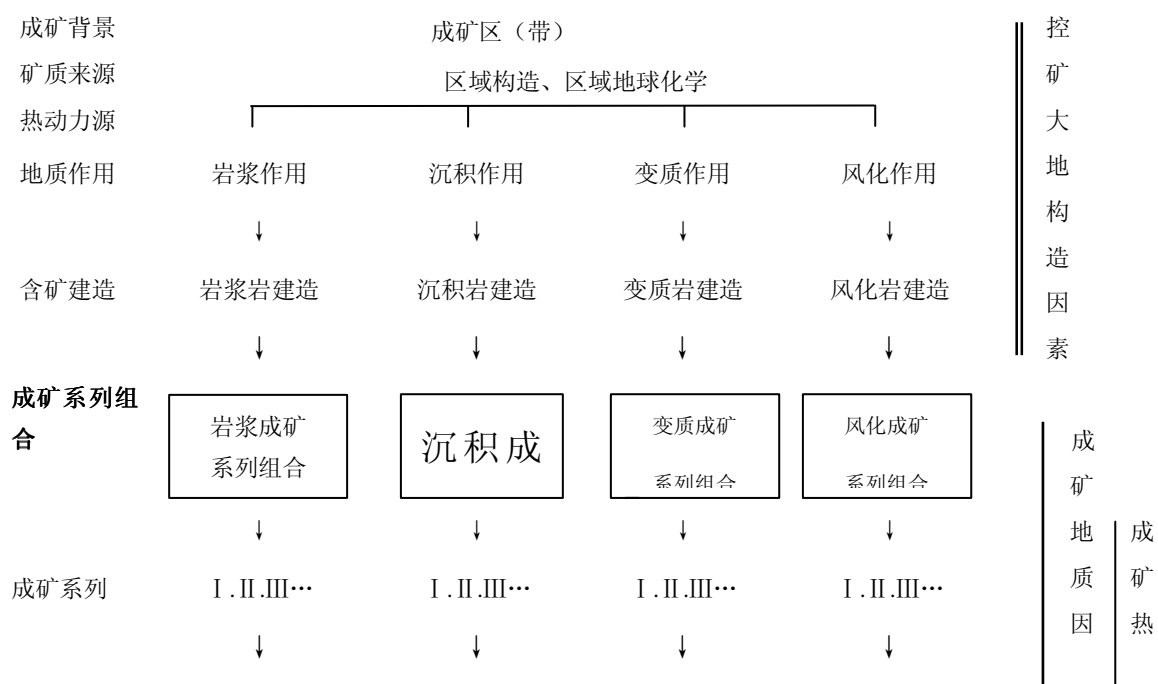
参考文献：

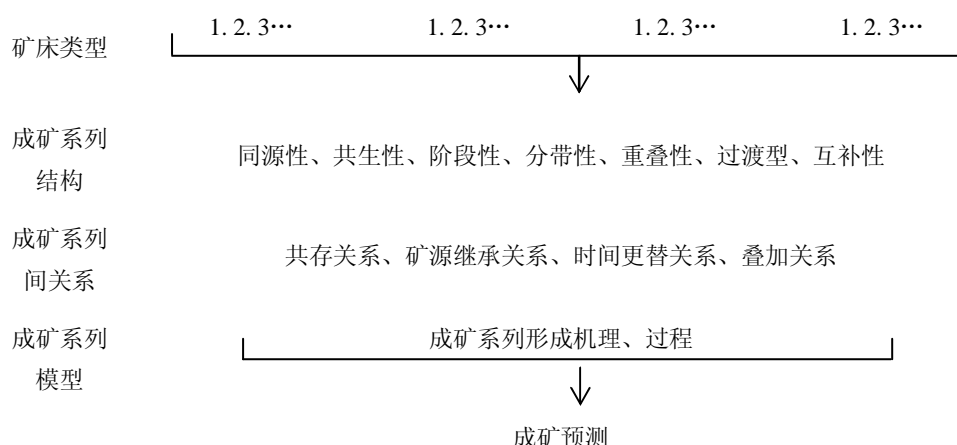
1. 翟裕生等，成矿系列研究，武汉：中国地质大学出版社，1996。

1. 成矿系列的概念

成矿系列是指在一定地质构造环境中形成的、在时间上、空间上和成因上有密切联系的一组矿床类型构成的整体。

2. 成矿系列研究的思路





3. 成矿系列的层次（层次和级别）

矿床类型 / 成矿亚系列 / 成矿系列组合

4. 成矿系列的分类

岩石建造可以作为划分和建立成矿系列的基础

1). 程裕淇等的划分方案

2). 翟裕生等的方案

I. 岩浆及岩浆—热液成矿系列组合（花岗岩类 W、Sn、Mo、Bi、Nb、Ta、Li、Be 系列 / 花岗闪长岩-石英二长岩类 Cu、Mo、Au 系列 / 花岗闪长岩类 Mo、Pb、Zn、S 系列 / 闪长岩类 Fe (Cu、Mo) 系列 / 闪长岩-安山岩类 Fe、P、S 系列 / 碱性岩和碳酸盐类 Nb、P、TR 系列 / 金伯利岩类金刚石 / 镁铁-超镁铁质层状杂岩体 Cr、Ni、Cu、Pt、V、Ti 系列 / 镁铁-超镁铁质层状杂岩体 Cr (Pt) 系列 / 镁铁-超镁铁质 Cu、Ni、Pt 系列 / 辉长岩-斜长岩类 Fe、Ti、V 系列 / 科马提岩 Ni-Cu-菱镁矿-滑石系列 / 蛇绿岩套豆荚状铬铁矿 Cr、Ni 和硫化物 Cu、Zn、Au 系列 / 陆相火山（次火山）岩 Cu、Au、U、Ag、Pb、Zn 系列 / 陆相酸性（中性）火山岩沸石、膨润土、红柱石、明矾石、叶蜡石系列 / 陆相玄武岩浮石、贵橄榄石、膨润土、凹凸棒石、硅藻土系列 / 海相火山岩（喷出-沉积岩）的 Cu、Pb、Zn、Fe、S 系列）

II. 沉积（含热水沉积）和沉积—改造成矿系列组合（海相黑色岩系 V、U、Ni、Co、Mo 系列 / 滨海相碳酸盐岩-碎屑岩 Fe、Mn、P 系列 / 海陆过渡相及陆相碎屑岩 Fe、Al、煤、石油、油页岩系列 / 陆相及滨海相蒸发岩、碎屑岩、石膏-岩盐-钾盐系列 / 砂岩（及页岩型）Cu、U 系列 / 砂岩 Pb-Zn 硬石膏系列 / 碳酸盐岩 Pb-Zn-重晶石系列 / 碳酸盐岩 Au - Ag 系列 / 碳酸盐岩 Hg-Sb 系列 / 河流砂矿 Au、Sn 等系列 / 海滨砂矿 Ti、Pt、TR 系列 / 古石英砾岩 Au-U 系列 / 大洋底结核结壳 Fe、Mo、Co 系列 / 洋底热卤水软泥等 Fe、Mn、Zn、Cu、Pb 系列）

III. 变质成矿系列组合（条带状含铁建造中含铁硅质岩 Fe-Au 系列 / 花岗-绿岩中 Au 系列 / 受变质火山热液-沉积型 Fe、Cu (Ti) 系列 / 混合岩化热液交代 B、Fe、TR 系列 / 混合岩化伟晶岩白云母、长石、石英系列 / 富铝结晶片岩红柱石-矽线石-蓝晶石系列 / 碳酸盐岩接触变质大理岩硅灰石、透闪石、透辉石系列 / 镁质大理岩菱镁矿、滑石、海泡石系列 /

IV. 风化成矿系列组合（花岗岩类风化壳高岭土、蒙脱石、TR 系列 / 中性、镁铁

质-超镁铁质风化壳（红土型）Ni、Au、Al、Fe 系列 / 硫化物矿床氧化带 Au、Mn、Fe 系列）

5. 成矿系列的内部结构

成矿系列的结构指某个系列中各矿床成因类型间的时间、空间、物质和成因上的联系。

- 1) 同源性：指同一成矿系列中不同成因类型的矿床具有全部或部分相同的物质来源，都与同一种成矿作用有关。
- 2) 共生性：指一个成矿系列中不同类型矿床间的共生关系，如矽卡岩型—斑岩型矿床共生。
- 3) 阶段性：指在一个成矿系列的形成过程中，不同类型矿床的形成时间有先有后，可划分出不同阶段。（岩浆型 Fe、V、Ti 成矿系列：熔离型→伟晶岩型→贯入型）
- 4) 分带性：指成矿系列中不同类型矿床在区域、矿田内的空间排列样式，它们或沿某一含矿岩石建造层位，或围绕某一侵入岩体，或循某一断裂带作有序的分布。
（江西银山：垂向上 Pb—Zn—Ag（上）→Cu—Au（下） / 热液脉型（上）→斑岩型（下））

- 5) 重叠性：指在一个成矿系列中，形成时间有先后的不同矿床类型产于同一空间范围，彼此相互重叠。

热液成矿作用常沿着同一构造—岩浆中心反复地脉动或多次进行。柿竹园钨钼多金属矿床中，矽卡岩型、云英岩型、石英脉型矿化反复地在同一复式花岗岩体接触带内产生，导致矿质多次重叠富集，形成了超大型矿床。

- 6) 过渡性：在一个成矿系列形成过程中，矿床类型随着具体地质条件的有序变化而发生递变，成矿系统内各端元矿床之间常出现过渡型矿床。

（1）矿种过渡：矽卡岩型铜矿→矽卡岩型金含硫矿（大冶鸡冠嘴铜金硫矿床）

（2）成矿流体的过渡：岩浆型铁矿→热液型铁矿（大冶灵乡脑窖铁矿）

（3）成矿方式的过渡：晚期岩浆熔离型→岩浆贯入型（伟晶岩型磷灰石—阳起石—磁铁铁矿石，承德大庙）

（4）矿化类型间的过渡：矽卡岩型→斑岩型

- 7) 互补性

指一个成矿系列中成矿元素种类的分配和矿化强度在不同矿床类型中的分配是不均衡的，具有“此多彼少”的关系。例：鄂东南

6. 成矿系列间的相互关系

- 1) 共存关系

花岗闪长岩—石英二长岩类斑岩型 Cu、Mo、Au 系列 (A)

陆相火山—次火山（安山岩—流纹岩类）Cu、Au、Pb、Zn、Ag 系列 (B)

活动大陆边缘带 { 隆起区 (A)
隆起区的断陷火山岩盆地 (B)

- 2) 物质来源关系

在一定条件下，一种较早生成的成矿系列是另一种较晚生成的成矿系列的物质来源。

花岗岩—绿岩带中 Au 系列（风化剥蚀）→河流相砂金系列

镁铁—超镁铁质的 Cu、Ni、Pt 系列（风化作用）→ 风化壳红土型 Ni、Al、Fe 系列

金属硫化物矿床成矿系列（化学风化作用）→ 铁帽型 Au、Mn、Fe 系列

砂页岩型铜矿（构造-岩浆活动）→ 斑岩型铜矿

3) 时间交替关系

一种成矿系列在时间上替换了另一种。

沉积铁矿系列：太古—元古宙（含铁石英岩型硅铁建造）（O₂ 增加）→ 滨海相 Fe、Mn 系列（鲕状赤铁矿）→ 晚古生代—中生代陆相湖沼铁矿系列（菱铁矿）

4) 成矿系列的分裂（裂解）

在地史的长期演化过程中，一定岩石建造中成矿物质组合将“由繁到简”。

元古代镁铁—超镁铁质层状杂岩体 Cr、Ni、Cu、Pt、V、Ti、Fe 系列	{	① 辉长岩—斜长岩 Fe、V、Ti 系列
		② 高钙镁质—超铁镁质 Cu、Ni、Pt 系列
		③ 镁铁—超镁铁质 Cr (Pt) 系列

5) 成矿系列的复合和叠加

在一定的成矿区带中，在不同地质时期形成的成矿系列间存在着复合关系，较晚生成的往往重叠复合在较早生成的成矿系列之上，或对早成的成矿系列加以继承或改造，造成复杂的成矿现象。

广东大宝山多金属矿田：

复 合 叠 加	{	中泥盆统滨海—浅海相	{	同生热水沉积型铜多金属矿床
		Fe、Cu、Pb、Zn 系列		火山—沉积型菱铁矿—黄铁矿
		燕山晚期花岗岩 W、Mo 成矿系列		花岗闪长斑岩：斑岩型钼（钨）矿床
				花岗闪长岩体接触带：矽卡岩型钨钼矿床

安徽铜陵：

{	上古生代滨海—浅海碎屑岩—碳酸盐岩建造	} → 沉积→改造型矿床
	Fe、S、(Cu) 成矿系列	
	燕山期岩浆—热液 Cu、Fe、S 系列	

7. 成矿系列与大地构造环境

1) 在“稳定地块”（克拉通）中产出的成矿系列

花岗—绿岩带中的 Au 矿系列 / 条带状 Si—Fe 建造中的 Fe 矿系列 / 与科马提岩有关的 Cu、Ni 矿床系列 / 石英砾岩中的 Au、U 成矿系列（南非） / 克拉通内部显生宙盆地的油、气成矿系列 / 密西西比河谷型 Pb、Zn 矿系列 / 风化壳型铝土矿系列 / 砂矿床系列（Au、Sn、金刚石、钛铁矿等）

2) 大陆裂谷中成矿系列

大型层控型 Cu、Pb、Zn 矿床（云南金顶 Pb-Zn） / 镁铁质-超镁铁质层状杂岩 Cr、Ni、Pt、Cu 系列

3) 洋脊和大洋盆地中的成矿系列

与蛇绿岩套有关的铬铁矿、铜镍硫化物、金矿-石棉等 / 塞浦路斯型块状硫化物矿床（Cu、Fe、Zn 等） / 洋底的锰结核和富钴锰结核 / 深海碳质沉积物中的富

金属页岩

4) 在岛弧和活动大陆边缘环境中的成矿系列

块状硫化物矿床（以黑矿为主）/ 浅成低温热液金、银、汞、铋矿床 / 斑岩型铜、钼、锡和钨矿床 / 与同熔型花岗岩有关的 Fe、Cu、W、Mo、Au、U 矿床 / 与流纹岩有关的 Sn、Be、U、Pb、Zn 矿床 / 与改造型花岗岩有关的锡、钨、铋、铌钽和铍以及 REE / 与安山岩类有关的磁铁矿-磷灰石-阳起石矿床 / 与火山作用有关的非金属矿床 / 边缘盆地和岩浆弧后盆地中的石油、天然气矿床

5) 陆-陆碰撞带中的成矿系列（造山带）

与镁铁质-超镁铁质岩有关的铬铁矿矿床系列 / 蛇绿岩套中构造蚀变岩型金矿床 / 与高压变质作用有关的非金属矿床系列（硬玉等） / 与重熔花岗岩有关的锡矿和钨矿 / 砂岩型铅锌矿床及层控铅锌汞铋金矿

6) 被动大陆边缘和内陆盆地中的成矿系列

沉积磷块岩矿床 / 蒸发岩盐类矿床系列，砂岩铜铀系列 / 黑色页岩铀钒（镍钼）系列 / 沉积的鲕状铁矿和锰矿 / 碳酸盐岩中的铅锌-重晶石系列

7) 大陆内部热点构造环境中的成矿系列

与花岗岩类有关的锡、钨和锂、铍、铌、钽系列 / 与浅色花岗岩有关的铀矿 / 与碳酸岩及共生的碱性岩和超基性岩有关的磁铁矿—磷灰石—蛭石和烧绿石矿床

8) 与大陆线性构造有关的成矿系列

与金伯利岩和钾镁煌斑岩有关的金刚石成矿系列 / 与碳酸岩有关的稀土—磷—铌系列

8. 地质历史上的成矿系列

全球主要成矿期和矿床类型

成矿期(Ma)	全球及大地构造	成岩环境及岩石建造	主要成矿系列
中—新生代成矿期（<230）	联合古陆解体，形成全球性洋盆张裂体系和地中海—环太平洋挤压造山体系。陆内构造活跃	陆海交接带构造—岩浆活动显著。高等生物迅速繁殖，出现全球性(环太平洋)火山岩带	石油、煤和天然气；斑岩型和矽卡岩型矿床(Cu、Mo、W、Sn……)；浅成低温热液 Au—Ag 矿；黑矿型，Hg-Sb，菱铁矿等
古生成矿期(600—230)	大陆边缘分、合、破、移。边缘地槽旋回。地壳加厚，大陆扩展	生物上陆，种属数量大大增加。晚古生代时，岩浆热液活动剧烈	Fe、Mn、Al、P 沉积矿床；火山成因块状硫化物矿床；海底喷流热水沉积多金属矿床；黑色岩系中 U-V-Cu 矿床。鲕状赤铁矿矿床
晚元古代成矿期(1000~600)	1000~800Ma，地台形成阶段，晚元古代后期，全球性造山褶皱。800~570Ma，发育震旦系盖层	高等生物出现，沉积物中有机炭增加。黑色页岩，硅质岩，磷块岩发育	P、Mn 沉积矿床；层状铜矿(砂页岩型)；海相块状硫化物铜矿床等；含 W、Sn 石英岩；钛磁铁矿矿床

中元古代成矿期 (1800~1000)	稳定地台最终形成, 内部、边缘发育裂陷槽(裂谷), 拉伸应力场为主	水圈和气圈中 O_2 增加 (大气 $O_2>10\%$), 红层开始出现, 基性—超基性杂岩体多见	海底喷流热液型矿床; 层状铜矿; 岩浆型 $Cu-Ni$ 及铂族矿床; 岩浆型 $V-Ti$ -磁铁矿矿床(斜长岩); 奥林匹克坝及白云鄂博矿床
古元古代成矿期 (2800~1800)	原始稳定地台形成期. 硅铝质陆壳加厚, 形成宽广大陆架	继续缺氧, 大气、水体、沉积性质、生命类型均有重要改变, 宽广大陆架。杂砂岩和砾岩发育; 原地台中有层状火成岩杂岩体发育; 出现富钾花岗岩, 形成花岗岩及玄武岩层圈	含金-铀砾岩型; 苏必利尔条带状铁矿; 南非布什维尔 $Cr-Pt-Ti-V$ 矿床; 早期的块状硫化物矿床. 包括层控 $Pb-Zn$ 矿床
太 古 宙 成 矿 期 (>2800)	陆核形成阶段, 出现若干个陆核	原始气圈含大量 $C、H$ 化合物及 NH_3 , 显著缺氧, 原始地壳薄, 地热梯度大, 表层热流值高, 成分偏基性, 火山活动普遍。绿岩带发育	绿岩带中阿尔戈马型铁矿; 绿岩带中含金石英脉层控 Au 矿; 火山岩块状硫化物型矿床; 稀有金属伟晶岩(超变质花岗-伟晶岩)矿床; 科马提岩中的硫化镍矿床; 混合岩化气液交代型 Mg -矽卡岩型 $B、Fe、TR$ 矿床

9. 矿床类型在地质时代上的演化

各地质时代的主要成矿系列

太古宙	元古宙	古生代	中生代	新生代
1. 超镁铁质(含科马提岩)熔岩和侵入岩中 $Cr、Ni、Cu$ 石棉、菱镁矿、滑石成矿系列; 2. 玄武岩-安山岩-流纹岩中块状硫化物 $Au-Ag(Pb-Zn-Cu)$ 成矿系列; 3. 绿岩中条带状含铁建造中 $Fe、Mn、Au$ 系列 (Algoma 型); 4. 混合岩化花岗岩伟晶岩中 $Li-Ta$ -	1. 石英质砾岩中 $Au-U$ 系列; 2. 陆相区条带状含铁建造 $Fe-Au$ 系列; 3. 页岩中 $Pb、Zn$ (Ag)系列; 4. 中酸性钙碱性火山岩中 $Zn-Pb-Ag-Cu-S$ 系列; 5. 裂谷环境白云岩中 $Cu-Pb-Zn$ 系列; 6. 层状铜矿(非	1. 黑色页岩中 $V、U、Ni、Co、Mo$ 系列; 2. 滨海相碳酸盐岩-碎屑岩中 $Fe、Mn、P、Al$ 系列; 3. 海相碳酸盐岩、蒸发岩中岩盐-钾盐-石膏系列; 4. 海相火山-沉积型及喷流沉积型 $Cu、Pb、Zn、S$ 系列; 5. 海陆过渡相	1. 陆相及海陆交互相蒸发岩类盐类矿床系列; 2. 碳酸盐岩中赤铁矿-菱铁矿系列; 3. 红层 $Cu-U-V$ 系列; 4. 碳酸盐岩中 $Pb-Zn$ 系列; 5. 石油—天然气系列; 6. 煤—油页岩系列; 7. 花岗岩类	1. 岛弧中酸性火山-次火山岩 $Cu-Zn-Pb-S$ 系列; 2. 陆相火山一次火山 $Cu-Au-Ag$ 系列; 3. 碎屑岩-蒸发岩 $Pb、Zn$ 矿床系列; 4. 洋底热卤水 $Pb-Zn-Fe-Mn$ 系列; 5. 洋底 $Fe-Mn$ 结核系列; 6. 河流砂矿系列;

Be-Sn-Mo-Bi- 白云母系列; 5. 混合岩化气液交代 Mg-矽卡岩中 B-Fe-TR 系列	洲)系列; 7. 大型层状镁铁-超镁铁质杂岩中 Cr、Ni、Pt、Cu 系列; 8. 斜长岩中含 Ti 磁铁矿系列; 9. 玄武岩中的 Cu-沸石系列; 10. 碳酸盐岩-碱性杂岩中的 U、Th、Nb、Be、Zr、TR 系列; 11. 不整合面的 U 矿系列; 12. 变质泥岩建造(富 Al 结晶片岩)中的红柱石-矽线石系列; 13. 镁质碳酸盐岩菱镁矿、滑石、海泡石系列	煤、油页岩系列; 6. 红层铜矿系列; 7. 碳酸盐岩中 Pb-Zn 系列; 8. 镁铁-超镁铁质岩中 Cr-(Pt)-石棉系列; 9. 镁铁—超镁铁质岩中 Fe、V、Ti 系列; 10. 闪长岩类有关 矽卡岩 Fe-Cu-Co 系列; 11. 碳酸盐岩和碱性杂岩 Nb-P-TR 系列; 12. 花岗岩类稀有金属系列	W-Sn-Mo-Bi-Nb-Ta 系列; 8. 花岗闪长岩 Cu-Mo-Au 系列; 9. 闪长岩类 Fe-Cu(Co)系列; 10. 陆相火山-次火山 Cu-Au-Ag 系列; 11. 陆相中酸性火山岩沸石-膨润土-明矾石系列	7. 滨海砂矿系列; 8. 花岗岩类风化壳成矿系列; 9. 镁铁—超镁铁质风化壳成矿系列; 10. 陆相湖泊、蒸发、盐类矿床、K、芒硝系列; 11. 砂岩型 Cu、U-V 系列
-------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------

例 长江中下游与 I 型花岗岩有关的成矿亚系列

成矿亚系列		矽卡岩—斑岩型 Cu-Mo-Au 亚系列	矽卡岩型、矿浆-矽卡岩复合型 Fe、Fe-Cu 亚系列	玢岩铁矿亚系列
含矿岩浆岩亚系列		高碱富钾中酸性岩亚系列	高碱富钠中酸性岩亚系列	富钠偏基中性岩亚系列
岩石组合		闪长岩、石英闪长岩、石英正长闪长岩、花岗闪长(斑)岩、花岗岩、石英斑岩	辉石闪长岩、闪长岩、石英闪长岩、石英二长岩、花岗岩	辉长闪长玢岩-闪长玢岩、钠长岩、粗安岩等; 辉石粗安玢岩—粗面岩、正长岩等
岩石	SiO ₂ (%)	<u>56.44~65.83</u> 63.16	<u>59.33~70.23</u> 64.18	<u>50.44~54.14</u> 52.45

化学成分	K ₂ O+Na ₂ O(%)	<u>6.79~8.30</u> 7.73	<u>7.56~9.10</u> 8.23	<u>6.13~7.02</u> 6.61
	K ₂ O / Na ₂ O	<u>0.56~1.21</u> 63.16	<u>0.33~0.89</u> 0.61	<u>0.23~0.54</u> 0.37
	钙碱指数	54~56	55~58	53
就位时代		170~130Ma	160~120Ma	130~90Ma
侵位深度		3~1km	3~1.5km	<1.5km
主要围岩		Є—T ₂ 碳酸盐岩、碎屑岩	T ₁ —T ₃ 碳酸盐岩、(碎屑岩)	陆相火山岩
矿床类型		接触交代型、斑岩型、热液型	接触交代型、矿浆性、矿浆-热液过渡型、热液型	次火山热液型、矿浆型、伟晶型、热液型
成矿元素组合		Cu、Mo、S、Au、Fe、Pb、Zn、Ag、W	Fe、Cu、S、Au、Co	Fe、S、P、V、Ti、后期 Au、Cu
构造背景		褶皱隆起区	隆起与坳陷过渡区	断陷火山岩盆地
分布地区		铜陵、九-瑞、阳新宁镇	大冶、繁昌、当涂	宁芜、庐木

* 岩石化学成分中 56.44~65.83 上位变化区间，下为平均值
63.16

十六、区域成矿学的发展

1. 绪论

区域成矿学的研究对象、内容、研究意义和研究简史以及基本观点和研究思路

2. 成矿系统分析

- 1) 成矿系统的定义、结构和特性
- 2) 成矿系统、成矿系列、成矿区带的联系与区别
- 3) 成矿系统的基本要素与作用过程
- 4) 成矿系统作用产物
- 5) 成矿系统后期变化与保存
- 6) 成矿系统类型划分

3. 全球矿床时空分布与地球动力演化背景

- 1) 全球主要金属矿床分布特点
- 2) 全球成矿时空结构与地球动力演化
- 3) 全球成矿演化趋势

4. 区域成矿的基本控制因素

- 1) 区域岩石圈组成、结构、演化与成矿
- 2) 区域构造与成矿

- 3) 岩石建造与成矿
- 4) 区域地球化学与成矿
- 5) 地质流体与成矿
- 6) 区域地质-成矿史研究要点

5. 区域成矿作用过程

- 1) 成矿物质来源和供应
- 2) 成矿流体的输运
- 3) 流体-岩石作用及蚀变-矿化网络
- 4) 成矿物质的富集与储存

6. 矿床形成后的变化与保存

- 1) 矿床变化与保存的研究意义
- 2) 矿床的变化过程和控制因素
- 3) 矿床环境的变化
- 4) 矿床经受的变化和改造
- 5) 矿床变化的结果
- 6) 不同类型和不同时代矿床的变化和改造

7. 区域成矿系统的物质、时空结构

- 1) 区域成矿系统物质结构
- 2) 区域成矿系统空间结构
- 3) 区域成矿系统时间结构

8. 中国主要成矿域及其特征

- 1) 中国成矿域的划分
- 2) 天山-兴蒙成矿域
- 3) 塔里木-华北成矿域
- 4) 秦-祁-昆成矿域
- 5) 扬子成矿域
- 6) 华南成矿域
- 7) 喜马拉雅-三江成矿域

9. 中国区域成矿规律探讨

- 1) 中国大地构造演化与矿床形成
- 2) 中国区域成矿特征
- 3) 复合大陆成矿体系

十七、成矿作用新认识和新假说

1. 边缘成矿学说

成矿边缘级别	空间分布	时间分布	成矿规模
I 级	板块边缘 大陆边缘	构造运动期早、晚期 地质时期“代”的早、晚期	全球性成矿带
II 级	地台、地槽边缘 地层“系”的顶、底部	地质时期“纪”的早、晚期	区域性成矿
III 级	地层“统”的顶、底部 海盆边缘 陆盆边缘	地质时期“边”的早、晚期 海侵初期、海退末期	矿田

	地台、地槽二级构造边缘 深、大断裂两侧		
IV级	地层“组”的顶、底部 岩体边缘 火山岩韵律顶部 褶皱、断裂形态边缘	地质时期“期”的早、晚期 岩浆结晶阶段早、晚期 火山喷发阶段早、晚期	矿床 大的矿体
V级	岩体、褶皱、断裂形态 产状变化部位 不同岩性、岩石胶接面		小矿体 富矿段

2. 热水成矿作用

热水沉积成矿作用（hydrothermal sedimentary minevalization）

沉积喷流成矿作用（Sedimentary Exhalative mineralization）简称 SEDEX

海水下渗，流经火山岩、沉积岩，逐渐受热。因酸度较大和含挥发成分，可溶解岩石中的一些金属并形成环流。当它们在海底构造软弱处（如大洋中脊）溢出海底时，因与海水遭遇骤冷，发生金属硫化物、二氧化硅等沉淀，形成矿化。

依据：① 大量海底热液成矿现场的观察；② 各种测试；③ 成矿模拟实验

3. 成矿作用动力学

4. 构造动力学成矿

构造动力成矿的类型（引张/挤压/剪切）/ 动力成矿机理及动力成矿模式

5. 其它

1) 同生成矿

金属矿床是与沉积围岩同时或近于同时生成的

层控矿床（同生矿石层，同生矿石条带，同生层纹……）

2) 浅生成矿

过去认为是在地壳深部形成的一些矿床，现在被认为是在当时的地壳或近地表附近，即在浅部形成的。

海底热液成矿 / 智利克拉、中国梅山、姑山铁矿（矿浆）

3) 纬度分带成矿学说

Nobel 1989 年补充提出形成各类矿床按纬度分带的可能原因。

磷块岩矿床——低纬度带

早第三纪铝土矿——赤道线

泥炭——北半球寒带、寒温带

铜镍硫化物——北纬 40° ~50°

4) 建造分析成矿理论

认为成矿作用是在含矿建造形成和演化过程中某一特定条件下的产物。通过建造分析确定成矿过程。

5) 软硬酸碱成矿理论（皮尔逊，1984）

6) 成岩作用促使沉积成矿理论

7) 改造成矿作用

改造成矿作用是指地质体、基底或深部的某些呈分散状态存在的成矿元素在后期地质作用或地壳运动中受到活化迁移，然后在构造软弱部位富集成矿。即成矿发生于后期成矿作用。

8) 冲击（陨击）成矿作用（意义局限）

9) 滑动构造控矿

10) 成矿物质来源多样化的见解被普遍接受

(1) 物源类别

- ① { 沉积成矿 海水、大陆风化搬运物质
 岩浆成矿 岩浆本身
 变质矿床 变质岩本身
- ② 古老基底 { 成矿场所仍在元古宇内 浙江八宝山金矿、龙泉金矿
 一元古宇 { 成矿地层在上覆地层
- ③ 下地壳和 { 与基性超基性岩有关的矿床
 上地幔 { 海底热水沉积矿床

(2) 物源鉴别

铅同位素、氦同位素、锆钨同位素、O、H、C、S

(3) 定性、定量，巨量物质供应，活动态金属

11) 热液不只是岩浆热液和变质热液复杂化

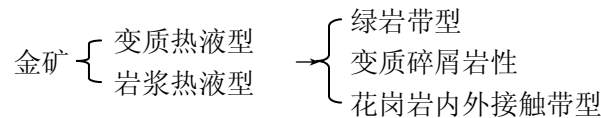
12) 矿床多成因理论的确立与发展

在不同地质背景、不同成矿时代、不同控矿因素等的宏观背景下，同一类型矿床也可以有不同的物质来源、成矿介质和成因。

铜镍硫化物矿床—岩浆熔离与岩浆期后热液复合成矿物质来自基性—超基性岩浆 / 加拿大 Thompson 与澳大利亚的 Kambalda 铜镍硫化物矿床赋存与科马提岩中，但硫来自沉积地层（硫同位素）。

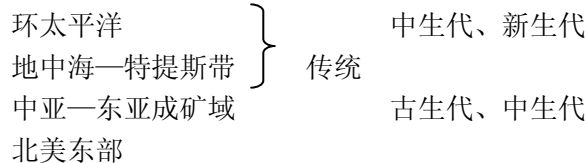
矽卡岩矿床—岩浆热液矿床 华北大湾、八家子矽卡岩矿床成矿物质至少部分来自被岩浆岩侵入的围岩地层（铅同位素、矿物学、元素含量）（涂光炽）

13) 矿床成因类型划分的逐渐被以含矿建造为主的划分取而代之



原因：① 找矿需要；② 含矿建造易于确定（野外观察与镜下工作即可）；
③ 成因类型划分带有主观色彩；④ 矿床类型的多成因使之复杂化；⑤ 确定成因类型的方法有局限性和多解性（同位素、微量元素）

14) 全球性巨型成矿域有两个发展到多个



15) 成矿演化突变理解的加深

稀土：太古宙—早元古几乎没有，17 亿年土时北有白云鄂博，南有 Olympic Dam Cu-Au-U-REE

铅：太古宙—早元古几乎没有，中元古时有澳大利亚、南非、加拿大以及内蒙东升庙

★. 重要相关领域

1. 成岩成矿实验
2. 成矿预测理论与方法
3. 找矿理论与方法

第五篇 当前国内矿床学领域研究动态

一、“九·五”国家攀登预选项目

《地质流体作用及其成矿效应研究》

流体是一种把地球内部各系统相互联系在一起的最活跃的媒介和因素。它使人们能够把地球内部各系统相互联系起来并从整体上进行研究和认识,为建立新一代地球科学知识体系提供了机遇。

本研究的主要思路是:① 把流体体系置于大陆岩石圈演化过程中进行动态四维研究;②将深部流体与地壳表层流体、现代流体与古代流体结合起来研究;③ 追踪在盆地演化、造山作用以及盆山转换过程中地质流体时空演化全过程,系统探讨岩石矿物—流体—有机质—金属成矿元素之间的多元耦合作用及其成岩成矿效应。

课题 1. 壳幔相互作用中的流体作用

课题 2. 沉积盆地流体系统与烃类—金属成矿耦合过程及成藏作用研究

课题 3. 盆—山转换过程中流体大规模运移机制及其成矿作用

课题 4. 碰撞造山过程中的流体作用

课题 5. 地球表层流体系统化学动力学过程及其资源和环境效应研究

专题(独立) 高温高压溶体化学动力学与成矿过程动力学实验与理论研究

二、“九·五”国家攻关项目

《紧缺矿产资源快速勘查评价的新方法、新技术研究》

1. 大区域铜、金等矿产资源快速勘查评价的新方法、新技术研究

1) 大区域示矿要素提取与综合快速评价新方法、新技术研究

地理信息系统技术与物化遥数据处理解释技术(大区域地物化遥综合示矿信息图)

大区域示矿要素提取及多元信息综合空间分析技术(大区域矿产资料快速评价的计算机辅助决策系统)

2) 中高山区高精度航磁和微波遥感方法技术研究

3) 西南“三江”中南部试验区铜、金等矿产快速勘查评价的综合示范研究

4) 西秦岭试验区金、铜快速勘查评价的综合示范研究

2. 找矿靶区快速优选与评价的新方法、新技术研究

1) 轻便电法方法技术研究

2) 区域化探异常筛选评价新方法、新技术研究

3) 多光谱(成像光谱)快速识别铜、金矿化带的技术研究

4) 主要成矿区带铜、金等矿产找矿靶区优选综合示范研究

(1) 玉龙----芒康 (2) 德钦-----中甸 (3) 兰坪-----景洪

(4) 礼县----太白 (5) 玛曲-----勉略宁

3. 矿床(体)快速定位预测新方法、新技术研究

1) 矿床(体)三维空间定位预测的物探方法技术研究

(1) 中高山区复杂地形重磁异常三维正、反演技术

(2) 电磁法、激电法、高密度电阻率法矿体定位技术研究

(3) 高精度磁梯度测量和解释技术

(4) 矿床(体)快速定位的物探方法组合

- 2) 矿床(体)快速追踪的地球化学新方法、新技术研究
 - (1) 气体测量偏提取定位预测新技术研究
 - ① 常观气体测量定位预测技术研究; 纳米金属微粒测量定位预测技术研究
 - (2) 成矿流体活动踪迹的地、物、化、遥结合标志识别与固定技术
- 3) 重要类型铜矿床(体)快速定位预测的综合示范研究
 - (1) 海底火山喷气—沉积型铜及铜多金属矿床快速定位预测示范研究
 - ① 德钦羊拉铜矿区; 甘肃筏子坎铜矿区
 - (2) 斑岩型铜矿床(体)快速定位预测的综合示范研究(玉龙)
 - (3) 甘肃白银厂铜矿深部及外围的矿体定位预测研究
- 4) 重要类型金矿床(体)快速定位预测的综合示范研究
 - (1) 构造蚀变岩型金矿床(体)—煎茶岭金矿
 - (2) 微细浸染型(沉积岩容矿的)金矿床(体)—八卦庙、马鞍山
 - (3) 碱性斑岩型金银矿床三维综合模型—北衙金矿
- 5) 重要类型银多金属矿床快速定位预测的综合示范研究
 - (1) 陕西老厂银多金属
 - (2) 川西呷村银多金属矿床与夏塞银矿

4. 有重要前景的固体矿产勘查专门技术研究

- 1) 复杂条件下固体矿产地震勘查技术与方法研究
- 2) 高精度弹性波与电性层析成像方法研究
- 3) 大功率深部激发极化勘查系统的研究

5. 金属矿产资源勘查评价分析系统

- 1) 矿产勘查多元地学信息系统规范与标准建立
- 2) 空间分析模型与空间分析方法解释
- 3) 金属矿产资源评价分析系统开发

三、国家重点基础研究发展规划“973”项目

《大规模成矿作用及大型矿集区预测》

大规模成矿时代年龄精测和成矿谱系(陈毓川、李献华)

中国东部构造大转折、岩石圈减薄和大规模成矿作用(高山、郭峰)

西南部新生代碰撞、伸展和走滑过程与大规模成矿(王登红)

★中国西部古生代小陆块开合过程与大规模成矿(郑永飞)

大陆地幔柱成矿效应(范蔚茗)

长江中下游铜陵和宁芜大型矿集区(吴淦国、杜杨松)

胶东-小秦岭大型矿集区(翟明国)

兰坪盆地铅锌多金属大型矿集区(刘家军)

与不同源花岗质岩浆有关的成矿系统(华仁民)

扬子地块西(南)大面积低温成矿系统(胡瑞忠、马东升)

深部流体成矿系统(毛景文)

深穿透地球化学与隐伏大矿-巨矿的识别(王学求)

△大型矿集区分布规律和综合预测(朱炳泉、王安建)

★隐伏大矿-巨矿的综合定位方法（吕古贤）

△地球化学块体大型矿集区多元信息集成与预测的可视化研究（向运川）

★现代矿床学研究的前沿领域

成矿理论	新理论引入	非线性•金属成矿作用与自组织
		非平衡热力学•开放体系成矿过程
		系统论•成矿系列和成矿系统
		大陆动力学•壳幔相互作用与成矿
		构造地球化学•金属成矿作用动力学
	新领域开拓	非传统矿产
		生物成矿
		流体成矿
		海洋 / 月球成矿作用
		矿床新类型
	新概念引入	超大型矿床
		大型矿集区
		边缘成矿
		低温成矿
	新技术发展	成矿年代学
		成矿实验
		成矿过程模拟
找矿预测	新方法应用	地质异常与找矿
		地物化遥综合信息找矿
		矿床（体）定位