

# 第1章 绪论

## 1.1 选题依据及研究意义

老君山锡锌多金属矿集区已发现的锡锌多金属矿(床)点达数十个,其中曼家寨、铜街矿床已达大型、超大型规模,它们均分布在老君山岩体周围强烈变质变形带中,矿体多呈层状或似层状产于中寒武统田蓬组受变质岩中。这些矿床的形成和定位究竟受哪些因素控制?它们与地层沉积成矿作用、变质变形作用及花岗岩热液成矿作用的关系等关键性问题至今尚未进行过详细研究,直接影响到对本区已有矿山深边部以及外围找矿潜力的评价和找矿靶区的确定。

为确保“云南华联锌铟股份有限公司可持续发展矿产资源战略”的实施,云南华联锌铟股份有限公司立项开展“云南马关老君山锡锌多金属矿集区控矿条件、成矿规律与勘查靶区优选”研究,并委托中南大学承担其中“老君山矿集区寒武系地层变质作用及其与成矿关系研究”课题。

本书作为“老君山矿集区寒武系地层变质作用及其与成矿关系研究”课题的一部分。以活化构造成矿理论及成矿系列理论为指导,以老君山矿集区内不同类型矿床(体)成矿地质地球化学特征、矿床成矿作用以及控矿因素等方面的研究为切入点,结合区域成矿演化背景分析,总结矿床成矿的时、空分布规律、划分矿床成矿系列、建立成矿演化模式,并采用地、物、化、遥多种新技术和多元成矿信息综合集成开展隐伏矿定位预测研究和示范,以期在新的层面上进一步深化老君山锡锌矿的成矿与找矿理论研究,指导该区的地质找矿预测和隐伏矿定位预测实践。

## 1.2 老君山锡锌多金属矿集区研究现状评述

### 1.2.1 老君山锡多金属矿集区研究现状

都龙老君山矿集区具有悠久的采铜历史,现今仍遗留有少量小规模炉渣<sup>[1]</sup>。矿集区于1956年经群众报矿,由云南有色地质局308队开展普查找矿,首次发现了北起花石头,经铜街、曼家寨、辣子寨,南至南当厂,长约9 km的锡、锌、铜、铅矿化带,从而揭开了地质找矿的序幕。1957年9月至1962年底云南有色地质

勘查局 310 队、1970 年 12 月至 1973 年 308 队、1978 年至 1989 年 317 队分别进行了物化探普查及详查工作(见表 1-1)。

20 世纪 90 年代以来,许多学者从不同角度对老君山矿集区进行了深入广泛的研究。其中忻建刚等<sup>[2]</sup>、官容生<sup>[3,4]</sup>、薛步高<sup>[5]</sup>、陈吉深等<sup>[6]</sup>及杨世瑜<sup>[7]</sup>对本区花岗岩的特征及其与成矿的关系进行了研究;曾志刚等<sup>[8]</sup>、刘玉平等<sup>[9]</sup>对矿层状砂卡岩及其与成矿关系进行了研究;吕伟等<sup>[10]</sup>、张世涛等<sup>[11]</sup>及郭利果<sup>[12]</sup>对本区变质作用及其生成时代等进行了研究;颜丹平等<sup>[13]</sup>、刘玉平等<sup>[14]</sup>、王义昭等<sup>[15]</sup>及杨世瑜<sup>[16]</sup>对矿区构造及其与成矿关系进行了研究;宋焕斌等<sup>[17,18]</sup>、刘玉平等<sup>[19,20]</sup>、周建平等<sup>[21,22]</sup>、罗君烈<sup>[23,24]</sup>、付国辉<sup>[25,26]</sup>、张世涛等<sup>[27]</sup>、戴福盛<sup>[28]</sup>、吴根耀等<sup>[29]</sup>、晏建国<sup>[30]</sup>、史清琴<sup>[31]</sup>、范成均<sup>[32]</sup>、杨世瑜<sup>[33]</sup>、张志信等<sup>[34]</sup>对矿床分布规律、成矿系列以及矿床成因等进行了广泛研究;罗鉴凡<sup>[35]</sup>、刘玉平等<sup>[36]</sup>、锺大赉等<sup>[37]</sup>、夏萍等<sup>[38]</sup>、周祖贵<sup>[39]</sup>、李文尧<sup>[40]</sup>、杨学善,秦德先等<sup>[41]</sup>对矿区同位素地球化学、岩石矿物、成矿预测等进行了广泛研究。

表 1-1 调查区地质研究史

序号	工作时间	工作单位	工作性质	主要成果
1	1964	云南省地质局区测队	区域地质调查	1:100 万凭祥幅地质图说明书
2	1976	云南省地质局二区测队	区域地质调查	1:20 万马关幅区域地质调查报告
3	1980	云南省地质局第二地质队	水文地质普查	1:20 万马关幅区域水文地质调查报告
4	1962	云南有色地质勘查局 310 队	普查	云南省麻栗坡县瓦渣含铍花岗岩伟晶岩矿床评价报告
5	1962	云南有色地质勘查局 310 队	普查	云南省麻栗坡县南秧田砂卡岩白钨矿床普查评价报告
6	1984	云南有色地质勘查局 317 队	勘探	云南省马关县都龙锡锌矿区铜街矿段勘探报告
7	1996	云南有色地质勘查局区调所	普查	云南省麻栗坡县大丫口绿柱石(祖母绿)矿产普查报告

### 1.2.2 以往研究中存在的主要问题

尽管前人对都龙老君山矿集区有过较多的研究,取得了一些重要的成果,但仍存在不少值得深入研究之处,诸如成矿来源、矿床成因、成矿演化模式以及成矿构造背景和成矿预测等问题。这些问题主要表现在以下几个方面:

(1)都龙老君山矿集区的矿床成因历来就颇有争议,其成因观点主要有如下

3种: ①岩浆热液成矿(黄廷燃<sup>[42]</sup>、李家和<sup>[43]</sup>、彭程电<sup>[44]</sup>、汪志芬<sup>[45]</sup>、伍勤生等<sup>[46, 47]</sup>、姚金炎<sup>[48]</sup>、於崇文等<sup>[49]</sup>、张志信等<sup>[50]</sup>); ②热水沉积—热液改造成矿(周建平<sup>[21, 22]</sup>); ③沉积—变质—热液改造成矿(刘玉平等<sup>[19, 20]</sup>)。

(2)在成矿物质来源方面,仍然争议较大。一些学者认为成矿金属主要来源于基底前寒武系变质岩和老君山花岗岩;硫主要来源于中寒武世热水沉积期还原的海水硫酸盐和深部岩浆房,同时,燕山期老君山花岗岩为后期叠加成矿作用提供了硫源,变质围岩也提供了一部分成矿物质。另一部分学者认为燕山晚期花岗岩浆热液是主要的物质来源,都龙矿区的矿质来源及成矿母岩是花岗岩。

(3)随着近几年矿床的开采和研究程度的加深,矿集区露天开采已经揭露出许多同生或准同生硫化物矿石组构或矿物学特征,但仍未引起足够重视和深入研究。例如层状、似层状矿体与围岩往往同步褶曲,且与围岩界线清晰,围岩蚀变弱或无蚀变;矿体中常见顺层发育的由硫化物纹层与碳酸盐岩或火山岩纹层互层产出构成的纹层状、波纹状构造,以及沉积滑脱变形构造和顺层发育的蜂窝状构造,并见有胶状黄铁矿、鲕状黄铁矿等。

(4)在成矿预测方法方面也存在明显不足,尤其是随着非线性统计学、空间统计学、计算机技术、空间信息学以及其他相关学科的交叉渗透,成矿预测评价已经由传统的定性预测评价发展为现在以模型为基础的定量预测评价,由传统的简单类比发展为现在以复杂地学综合数据的挖掘和融合为主的地学综合信息的利用。这也是目前国际矿床地质、数学地质、勘查地质、勘查地球化学、勘查地球物理、遥感信息等地学领域中倍受关注的研究领域。但这些方法在本区研究甚少。

## 1.3 研究内容及工作量

### 1.3.1 主要研究内容

针对都龙矿集区多年来地质研究工作中存在的薄弱环节,尤其是争议最大的矿床成因、成矿大地构造属性等问题,结合近几年来在该区科研找矿工作中所观测、收集到的最新资料以及室内测试分析结果,本书以多因复成成矿理论(地洼成矿理论)为指导,按成矿时空演化的思路,系统地分析了都龙及邻域壳体大地构造演化运动特征;对不同类型矿床成矿地质条件、矿床成因、控矿规律以及地球化学特征等进行了详细的研究,并在此基础上开展成矿系列研究,建立更加完善的矿床成矿演化模式,以期进一步深化理论认识,以此为指导,优选找矿潜力靶区,应用地、物、化、遥等综合手段,开展综合信息成矿预测工作。具体内容包括:

(1)都龙老君山矿集区沉积建造特征、地层地球化学及其控矿性研究,矿集区构造演化特征研究。

(2) 都龙变质岩区岩石分类, 各类变质岩的岩石学及岩石化学特征, 原岩恢复及与成矿关系等研究。

(3) 矿集区岩浆活动分析, 燕山期花岗岩产出特征、岩石学特征、岩石化学特征以及花岗岩与成矿关系特征分析。

(4) 矿床稳定同位素特征分析, 花岗岩、围岩、矽卡岩稀土特征分析, 微量元素特征分析及各种统计方法的应用研究, 尤其是传统统计方法与多重分形方法的应用以及成矿流体包裹体成分分析。

(5) 矿床成矿系列的划分及主要矿床类型分析、多因复成成矿机制、成矿演化模式以及矿床空间定位综合模式研究。

(6) 老君山遥感信息解译及找矿远景分析。

(7) 老君山数字矿山空间信息成矿预测模型的建立和评价研究, 包括模型的设计、模型的应用以及利用 BP 神经网络的评价, 成矿信息有利单元的划分和成矿预测模型的实现。

### 1.3.2 完成的工作量

自 2005 年 6 月至 2007 年, 笔者作为主要成员先后多次同课题研究组成员一起前往老君山矿集区进行实地调研, 累计工作时间超过 100 天, 分三个阶段开展了资料收集、综合分析研究和编写报告等工作(见表 1-2)。

表 1-2 实物工作量一览表

序号	工作内容	单位	工作量	备注
1	地球化学剖面	km	32	共 7 条剖面
2	岩、矿石标本采集	件	192	铜街—曼家寨、新寨、南秧田、坝脚等
3	野外地质现象拍摄	张	238	铜街—曼家寨、新寨、南秧田、富宁等
4	岩矿鉴定	件	80	薄片 45 件, 光片 15 件
5	显微照相	张	252	光、薄片及包体片
6	硅酸盐全分析	件	6	花岗岩 1 件, 矽卡岩 3 件, 片麻岩 2 件
7	稀土元素分析	件	13	花岗岩 2 件, 矽卡岩 4 件, 围岩 7 件
8	岩、矿石微量元素分析	件	112	测试元素 17 个
9	矿物流体包裹体成分分析	件	8	石英样品 7 件, 萤石样品 1 件
10	单矿物电子探针分析	件	14	透辉石 7 件, 绿泥石 7 件
11	遥感蚀变信息提取与统计	km <sup>2</sup>	1680	线性构造、硅化、铁化、泥化
12	数据分析和数据成图	机时	600	

(1)选题设计阶段:结合课题研究的内容,检索查阅和综合分析了与研究区相关的国内外研究文献、论文、专著等500余篇(份、部),并制定了详细的野外、室内工作计划。

(2)野外工作阶段:实际野外调研分两个阶段实施,第一阶段于2006年11—12月开展,具体工作包括勘探线剖面踏勘、地表蚀变构造调研、矿点调查;第二阶段野外工作于2007年10—11月完成,主要针对研究工作中的关键性问题和第一阶段野外工作的不足,补充开展了调研和资料收集。具体工作量见表1-2。

(3)室内研究及撰写阶段:主要开展了岩矿鉴定、硅酸盐全分析、稀土元素和微量元素分析、矿物流体包裹体成分分析、单矿物电子探针分析等测试,并开展了矿区地球化学数据统计、多重分形、遥感解译以及矿床空间定位预测等方面的研究,取得了丰富的第一手资料。在此基础上完成了本书的撰写。

## 1.4 主要研究成果与认识

本书以都龙老君山区域成矿背景,研究领域的最新进展和老君山锡锌矿集区研究中存在的问题为切入点,引入多因复成、多重分形、信息统计单元、成矿有利度等概念,应用岩石学、矿物学、岩石地球化学、构造地球化学、微量元素地球化学、稀土元素地球化学、同位素地质学、遥感地质学以及分形几何学、BP神经网络等多学科知识与现代地学前沿理论,对老君山成矿地质条件、矿床稳定同位素、稀土和微量元素及包裹体成分特征、矿床成矿系列、矿床多因复成成矿机制与成矿演化模式以及数字矿床空间信息成矿预测模型进行了深入研究。本书的研究成果与创新认识主要体现在以下几个方面:

(1)通过对矿集区内各种构造交汇格局、构造形迹及其配套构造发育特征的研究,全面系统地分析了不同构造演化阶段及构造体系的发展、演化特征,其中以老君山穹隆、文山—麻栗坡断裂及马关—都龙断裂最为重要,对该区成岩及成矿作用具有明显控制作用。

(2)在因子分析、聚类分析的基础上,应用多重分形方法对老君山矿集区17个微量元素进行分形统计,根据分维值 $b_2$ 的大小,可以把元素分为三类。I类中数值 $b_2$ 小于2,包含了As、Co、Bi元素;II类 $b_2$ 值范围在2~3之间,包含Sn、Ag、Zn、Pb、Cu、W元素,是主要成矿元素;III类数值 $b_2$ 大于3,包含了Mn、Sb、Mo、Ti、V、Ni、Cr、Hg元素。从分形曲线的拐点和间断性也可以判断矿区存在多期次成矿活动。

(3)在详细研究矿床的同生与后生特征的基础上,通过与国内外同类矿床的对比分析,并按成矿演化的时、空分布特征以及矿床的主导成矿作用,将老君山矿集区内矿床系统地划分为三大成矿类型:①喷流沉积—变质改造—岩浆热液叠

加富集成矿类型；②高温岩浆热液类型；③燕山晚期中低温热液成矿类型。突破了传统的“唯花岗岩成锡”的观点，拓宽了找矿思路。

(4)从成矿系列研究出发，依据矿床成因及矿物组合特征，将老君山矿集区内所有矿化类型进行了重新分类，划分出七种与成矿类型相联系的矿床，即：层状锡石-硫化物矿床；层状锡多金属矿床；层状钨多金属矿床；长英岩脉型锡钨矿床；长英岩型锡钨矿床；石英脉型锡钨矿床；似层状铅锌矿床。并对各种类型矿床成矿地质条件、成矿作用、控矿规律以及地球化学特征等进行了详细的研究。

(5)首次将矿床成矿作用与壳体大地构造(递进)演化-运动相联系，详细阐述了老君山矿床成矿的多大地构造演化阶段、多成矿物质来源、多控矿因素、多成矿方式以及多种成矿作用的特点。建立了完整的矿床多因复成成矿(递进)演化综合模式，分析了矿床多因复成成矿作用的内在机制。

(6)首次是老君山矿区应用遥感信息提取技术，对老君山地区进行遥感线性信息解译和矿化蚀变信息提取，进一步分析了老君山矿集区遥感信息成矿特点以及构造与蚀变的分形特征，并将其与其他地区线性构造对比，认为老君山矿集区断裂分形结构偏于复杂，活动性偏强，成矿更为复杂。

(7)首次利用空间分析方法和信息统计方法对老君山矿集区进行了数字矿床空间信息成矿预测模型的研究。研究得到了每个网格信息单元的成矿有利度，按成矿有利度( $f$ )0.5、0.6和0.7为异常分界点，对找矿预测单元进行了分级，预测单元可分为3级，即A级、B级和C级，其中A级预测单元( $f > 0.7$ )为成矿条件最有利、找矿标志明显、并具有寻找大型多金属矿床的潜力的单元；B级预测单元( $0.7 \geq f \geq 0.6$ 之间)为成矿条件比较有利、找矿标志较明显、具有寻找中型多金属矿床的潜力的单元；C级预测单元( $0.6 \geq f \geq 0.5$ )为成矿条件较一般、但仍有成矿可能、具有寻找小型多金属矿床的潜力的单元。

(8)为了检验矿床空间信息成矿预测模型的有效性，引入BP神经网络对成矿有利区进行评价。评价模型反演结果发现网络学习效果良好，输出的值与期望的值满足评价要求，表明利用BP神经网络进行成矿有利区评价是可行的，从而也说明空间信息成矿预测模型得到的成矿有利度是正确的，成矿预测单元的划分是合理的。作者在这些认识的基础上对老君山矿集区进行了找矿预测综合评价。

## 第2章 研究领域综述

### 2.1 活化构造成矿学理论研究综述

活化构造成矿学从1956年陈国达先生创立地洼学说之日起开始萌芽<sup>[51, 52]</sup>, 后经扩充并系统化。它将大地构造与成矿作用紧密结合, 从地壳大地构造演化与运动递进发展规律的新角度, 阐明与之同步的成矿作用也依从和遵循递进发展演化的客观规律, 为探索地壳中矿产形成与产出的时空定位规律, 以及有效地指导找矿, 开辟了新的思路。

#### 2.1.1 活化构造成矿学理论的形成

1956年, 陈国达在《地质学报》上发表《中国地台“活化区”的实例并着重讨论“华夏古陆”问题》这篇奠基性论文, 论述了中国地台“活化”的事实, 打破了传统的“槽-台”学说的思想束缚, 揭开了活化构造学说这一大地构造新理论的序幕, 被国际上公认为是“活化构造及成矿理论在中国诞生的标志”。1959年, 陈国达又进一步针对“槽-台”说的缺陷, 创造性地提出地壳的第三基本构造单元——地洼区的概念<sup>[53]</sup>, 论证了地壳发展演化的一般规律——地壳动“定”转化递进律<sup>[54]</sup>。此后, 陈国达陆续发表了一系列论(著)文, 阐述了活化区成矿的多样性和综合性<sup>[55]</sup>, 从地壳动“定”转化递进的角度, 论证了矿产形成的继承性和专属性, 创立了成矿构造学<sup>[56, 57]</sup>、构造地球化学<sup>[58]</sup>、壳体大地构造与成矿学以及多因复成成矿<sup>[59-64]</sup>等新的衍生学科和研究领域, 对造盆作用和超大型矿床进行了系统研究<sup>[65, 66]</sup>, 并以活化构造理论为指导编制了《亚洲陆海壳体大地构造图》<sup>[67]</sup>和《中国成矿大地构造图》<sup>[68]</sup>, 提出“地幔蠕动热能聚散交替假说”<sup>[69]</sup>。

#### 2.1.2 活化构造成矿理论组成内容

活化构造成矿理论, 是一种建立在大地构造学理论与方法的基础上, 探究地壳矿产的形成机理和时空分布及其历史演化规律性的成矿学理论<sup>[70-72]</sup>。就目前的发展来看, 活化构造成矿理论的研究内容主要体现在以下几个方面:

(1) 大陆地壳新型成矿构造单元——后地台活化造山成矿区即活化(地洼)成矿区。

- (2) 地壳成矿演化的动“定”转化递进成矿论。
- (3) 多因复成矿床及其构造类型。
- (4) 壳体大地构造与成矿学。
- (5) 地幔蠕动热能聚散交替假说。

此外,近年来正在形成且尚待充实和完善的相关衍生学科包括壳体大地构造学、构造地球物理学以及壳-幔成矿学等。

### 2.1.3 活化构造成矿理论研究的若干重要进展

活化构造成矿学的主要进展主要在于活化构造成矿理论阐述了成矿构造与地壳演化的一般规律之间的关系。大地构造单元对矿产的控制和改造,特别是多因复成矿床理论的提出是对现代成矿学的一个重大贡献。该理论在我国华南的贵金属、有色金属矿产成矿规律研究中得到了进一步的应用和发展,特别是在构造与金成矿研究和应用中取得了许多重大突破。如中南大学彭省临、刘亮明等应用活化构造成矿理论在铜陵凤凰山矿区已发现新的铜资源量和后备基地;原中科院长沙大地构造研究所黄瑞华等在锡矿成矿预测与找矿中,按照矿床多因复成理论和构造成矿作用的认识,指出中国东南地洼区仍存在着寻找锡矿的巨大前景,并在香花岭矿区指导发现了新而富的多个锡铅锌矿体,扩大了矿区远景。此外,彭省临、戴塔根主编的《地洼学说研究与应用》以及陈国达等著的《活化构造成矿学》从不同侧面反映了现今活化构造的理论研究及应用成果<sup>[73-83]</sup>。

在深部地质研究方面,许多地球物理和地球化学学者对中国中生代含油气盆地的研究,给地幔蠕动、热能聚散交替假说提供了佐证,揭示了中国大地构造演化和构造活动强度与中国区域深部地质作用过程的密切关系。地壳及上地幔中低速、高导层多分布于目前尚处于地洼剧烈期的中国西部,反映了地洼剧烈期的深部地质特征。如:刘代志在《论壳体的地球物理研究》<sup>[84]</sup>一文中讨论了各种地球物理方法在壳体研究中的应用及成果,拓宽了活化构造理论研究深部地质过程的视野。

对中-新生代岩浆岩的构造-地球化学研究说明:地洼区的形成演化与来源于地幔的碱性玄武岩浆同下地壳发生作用有关<sup>[85-87]</sup>。地幔来源的轻而热的地幔物质聚集于地壳下部形成壳-幔混熔层,地壳均衡隆起,导致了岩石圈内界面的拉伸滑动;由于地壳块体的不均匀性,造成了各种类型的地洼盆地。这些研究成果进一步论证了地幔蠕动、热能聚散交替过程是大地构造演化和构造单元转化的主要因素。

原中科院长沙大地构造研究所对中国东部的东亚壳体的结构、深部的物质交换与能量转换作用过程,构造热演化及动力学模拟,进行了详细研究;中南大学地洼成矿学研究所彭省临对湘南地洼型多因复成铅锌矿形成机理也进行了详细研究,从时、空、物、因等多维空间,探讨了湘南多因复成铅锌矿的形成过程,提出



了湘南地洼型多因复成铅锌矿形成过程概念模式和形成模式图<sup>[88]</sup>；戴塔根对澳大利亚维多利亚州金矿的大地构造成矿学特征及其与中国的金成矿特征进行了对比研究<sup>[89]</sup>；中国科学院广州地化所为纪念陈国达院士，特把《大地构造与成矿学》2005年第一期作为专集出版，收录了陈国达院士的科研成果和国内一些专家对地洼学说的最新认识和应用<sup>[90-95]</sup>。

## 2.2 成矿系列研究现状及发展趋势综述

矿床成矿系列研究是当代矿床学研究的发展趋势和矿床学研究的前沿内容之一<sup>[97, 98]</sup>。矿床系列研究扩大了人们的思维和想像空间，不但能较全面地认识不同地质单元中一系列矿床时空演化规律和形成过程，而且对矿产勘查工作起到了重要的指导作用<sup>[100-108]</sup>。

这一领域的研究已初步建立了成矿系列的层次和分类方案，并研究了成矿系列内部结构特征，成矿系列间的关系，建立了成矿系列模式，在应用成矿系列理论、成矿预测和找矿评价方面取得了初步成效<sup>[109-113]</sup>。

### 2.2.1 成矿系列概念的有关问题

成矿系列的概念起源于矿床成因系列与岩石建造的一致性研究，目前公认的真正具有理论和实践意义的矿床成矿系列概念，是由我国地质学家程裕淇、陈毓川等于20世纪70年代后期首次提出的<sup>[114]</sup>。

随后，程裕淇、陈毓川等于1983年<sup>[115]</sup>又发表《再论矿床的成矿系列问题》的文章，进一步补充了矿床成矿系列概念。此后，不少学者对成矿系列概念做了进一步注释，深入探讨了有关成矿系列的问题。如：章崇真<sup>[116]</sup>（1983）认为成矿系列是“由两个或更多的不同矿种（或矿石相）或不同类型的矿床组成，它们形成于同一成矿期，具有相似的矿质来源，经历了相似的富集途径，只是由于主要控矿因素的演化或成矿环境的差异而形成的一系列具有一定生成顺序和分布规律的矿床，在空间上紧密伴生，构成一个成矿系列”。

翟裕生等<sup>[117]</sup>（1987）对成矿系列研究后，认为成矿系列指的是一个理想的矿床组合（相当于构造型式），因此，强调矿床成因与岩石建造的联系，提出“成矿系列是与同一建造有成因联系的各种成因类型矿床构成的四维整体”。

雷新民<sup>[118]</sup>（1989）指出成矿系列在成因上具有矿质多源性，认为“成矿系列是指产出在一定地质单元内，受一定地质作用所制约，在时间上多期演化，在空间上复合共生，在成因上矿质多来源的一组矿床”。

郑明华（1988）<sup>[119]</sup>则认为“成矿系列也称矿床组合，系指在一定的地质环境中形成的，在时间、空间和成因上有密切联系的一组矿床类型，它们常由一种或

数种成矿元素组成,且包括两种以上的矿床成因类型,当强调矿床各类型之间的时间关系时,通常又将它们称为成矿序列”。

王润民<sup>[120]</sup>(1988)将成矿区内矿床系列理解为:某种地质事件直接影响下,发育在一定区域内不同的地质构造格局中的,有相同或相似的地球化学特征和共同成因联系的若干成矿类型在空间上的组合分布。

吕志成等<sup>[122]</sup>(2000)将成矿系列理解为同一种元素或相关一组元素以多种成因类型在同一地区出现的一系列矿化,多种成因矿化之间彼此有生成联系,是同一种成矿作用在不同的空间部位、不同的构造和围岩条件下形成的不同形式的矿化。

成矿系列的理论研究已渐趋成熟,并在找矿实践中发挥着越来越大的作用。但是,仍存在以下几个方面的问题需要深入研究和统一。

- (1)成矿系列的概念、定义不统一;
- (2)对成矿系列的划分原则和依据不统一;
- (3)对于多成因叠加改造矿床的系列问题看法不统一;
- (4)关于成矿系列的级别序次划分不统一;
- (5)目前的成矿系列研究工作较偏重于内生金属矿床;
- (6)成矿系列研究中的建造分析不够彻底。

### 2.2.2 成矿系列理论研究的基本思路及研究内容和方法

成矿系列理论目前仍处于不断发展阶段。因此,依据前人的研究成果,仅就成矿系列研究的基本思路、成矿系列的分类问题、成矿系列的结构、成矿系列间的关系以及成矿系列与含矿建造、构造环境间的关系等内容及其研究现状进行归纳总结。

#### 1)成矿系列研究的基本思路

就目前公开发表的有关成矿系列的文献<sup>[123-133]</sup>来看,矿床成矿系列研究着重以区域构造-地球化学为环境背景,以构造-成岩-成矿作用为统一体系、以矿床的时空演化为主线(四维结构),研究一定区域范围内与一定的成矿事件有关的、在不同演化阶段、不同控矿条件下形成的各类型矿床之间在时、空、物、成因等方面的关系,研究这些矿床的总的区域成矿背景及其发展历史,研究各种控矿因素(包括地质构造、沉积建造、岩浆岩、变质作用等)的相互联系和相互作用。

#### 2)成矿系列的分类问题

1983年程裕淇等<sup>[125]</sup>提出了矿床成因类别的4级分类方案,即成矿系列组合、成矿系列、成矿亚系列、矿床类型。1994年陈毓川<sup>[131]</sup>在此基础上,又增加了三个层次,即矿床成矿系列类型、矿床、矿床成因类型。

翟裕生<sup>[102]</sup>(1992)认为除了岩浆、沉积、变质三大岩类的岩石建造及有关成

矿系列外,自然界中尚存在与水热流体成因蚀变岩建造有关的热液成矿系列和与风化岩石建造有关的成矿系列。

翟裕生等(1996)<sup>[125]</sup>在上述矿床成矿系列组合中,共分出42个成矿系列。其中除金属矿床、能源矿床系列外,还列举了重要的非金属成矿系列。又相应地补充了两个成矿系列组合——热水沉积成矿系列组合和生物成矿系列组合<sup>[134]</sup>。

何建泽(1994)<sup>[135]</sup>按照矿床形成过程中的主导地质作用,将湖南省内的银矿床和伴生银矿床划分为与岩浆侵入作用有关的成矿系列和与沉积-成岩作用有关的两个成矿系列;罗均烈(1995)<sup>[133]</sup>对云南矿床成矿系列进行了详细研究;代双儿(2001)<sup>[136]</sup>从板块构造演化与成矿作用时空分布和演化序列的关系方面,探讨了甘蒙北山地区铜多金属矿床成矿系列。

因此,正确地划分成矿系列,无论是对于了解成矿系列的成因联系和成矿作用的本质,还是用来指导找矿,都具有重要意义。

### 3) 成矿系列的内部结构

2003年翟裕生等将矿床系列的内部结构概括为成矿系列的物质结构、成矿系列的空间结构和成矿系列的时间结构三个方面<sup>[137]</sup>,其中:

(1)成矿系列的物质结构是指矿源供应、矿化强度、矿种、矿床类型和规模等的有序配置。具体内涵见表2-1。

表2-1 成矿系列的物质结构(各矿种、矿床类型之间的物质关系)

结构性质	内涵	典型事例	矿床实例
同源性	一个成矿系列中不同类型矿床具有全部或大部分相同的物质来源	绿岩带中石英脉型金矿和构造蚀变岩型金矿	招远金矿
多样性	同一成矿系列中各成矿元素组合的多种多样	如热液型 Cu, Mo, Fe, Au 系列中的 Cu - Mo, Cu - Fe, Cu - Mo - Fe, Cu - Au 等元素组合	鄂东-九瑞矿带的铜山口、铜绿山、城门山、武山等
继承性	在成矿演化过程中,主成矿元素(组合)具有一致性,即继承演化关系	富镁碳酸盐型成矿系列中的菱镁矿转化为滑石、水镁石	辽宁海城
互补性	成矿物质在一个系列内各矿床类型间的数量分配关系及主要成矿元素间数量消长关系	铜陵矿集区中主要铜矿量产在层控砂卡岩和矽卡岩型矿床中,其他矿床类型则少;丰山洞 Cu - Au 矿田中在不同矿床中 Cu、Au 具此消彼长关系	铜陵和鄂东的 Cu、Au 矿床

据翟裕生等,2003。

(2) 成矿系列的空间结构指矿床在空间上的有序分布, 即成矿要素、成矿强度的空间分布、变化及所形成的矿化分带和矿化网络。它是由成矿要素、成矿方式、成矿强度及其他控矿因素的空间分布和变化所决定的。成矿系列的空间结构特征如表 2-2 所示。

(3) 成矿系列的时间结构指成矿作用过程和矿化阶段, 见表 2-3。

表 2-2 成矿系列的空间结构(各矿种、矿床类型的空间关联)

结构性质	内涵	典型事例	矿床实例
共生性	成矿系列内不同类型矿床、矿种间的共生, 常与某一地质体相伴	花岗闪长斑岩内外的斑岩型、矽卡岩型	铜山口(Cu, Mo)
分带性	不同矿种、矿床类型在空间上有序分布	围绕次火山岩体 Cu, Au, Pb, Zn 矿等成带状分布	银山(Pb, Zn, Ag, Au, Cu)
过渡性	成矿系列内各矿床类型或矿种在空间上的过渡关系	矿浆-热液型过渡型铁矿	大冶灵乡(Fe)
集约性	矿床系列中各矿床之间的排列的紧密程度(与松散性相对应)	高: 较小空间汇集巨量多种矿种矿石; 低: 沉积成矿系列	柿竹园(W, Sn, Mo, Bi)
重叠性	成矿系列内不同矿床类型在同一空间的重叠交叉关系	晚期矿浆贯入型叠加在早期浸染型矿体之上	河北大庙(Fe, Ti, V)

据翟裕生等, 2003

表 2-3 成矿系列的时间结构(各矿种、矿床类型之间的时间关系)

结构性质	内涵	典型事例	矿床实例
时限性	一个成矿系列的形成局限在一定的时段, 系列内部各类型矿床或矿种间可有早晚的差别	玢岩铁(硫)系列中: 早期 Fe(V, Ti); 中期 Fe, S; 晚期 Cu, Au	招远金矿
阶段性	成矿过程中因某一(些)要素的显著变化而表现出阶段性, 导致矿种或矿化类型的差别(脉动性)	如因温度变化而形成高温热液、中低温热液阶段	热液矿床 铁山、铜绿山
渐进性	成矿过程是缓慢渐进的, 作用过程漫长	沉积成矿, 风化成矿	滨海砂矿 风化矿床(Ni)
突发性	成矿作用是突发的, 成矿过程短暂	火山喷溢、陨石撞击	拉科铁矿 肖德贝里(Ni, Cu)

据翟裕生等, 2003。

#### 4) 成矿系列间的相互关系

翟裕生等<sup>[125]</sup>(1996)初步提出过不同的成矿系列之间存在以下几种关系: 其

中包括共存关系、物质来源、时间交替、分裂、复合与叠加的关系。

### 5) 成矿系列与含矿建造、构造环境问题

岩石建造是有成因联系的岩石的共生组合体,通过建造分析,可以恢复和识别成矿环境及其演化历史。建造分析在成矿系列理论研究中越来越受到广大地质学家们的重视<sup>[138, 139]</sup>。

## 2.2.3 成矿系列研究的重要进展

自程裕淇等(1979)<sup>[114]</sup>提出矿床成矿系列概念至今,成矿系列研究普遍受到矿床地质学家们的关注,从现有资料的总结来看,这主要表现在以下两个方面:

(1) 成矿系列概念及理论在找矿工作中的应用方面,成矿系列理论被广泛应用于一些重要成矿区带的找矿研究中,包括南岭、长江中下游、西南三江、桂北、阿勒泰、秦岭等地区,进行了比较深入的矿床成矿系列的研究,建立了一批可供参考的典型例子。

如:陈毓川、裴荣富等(1980—1985)<sup>[140, 141]</sup>应用矿床成矿系列概念,对南岭地区与花岗岩有关的有色、稀有金属矿床,开展了矿床成矿规律的研究,提出了与花岗岩类有关的5个矿床成矿系列,首次编制了南岭地区成矿系列图;翟裕生等<sup>[123, 129, 142, 143]</sup>(1985, 1990, 1992)在研究长江中下游地区铁铜矿床时,对成矿系列的结构、成矿模式等进行了多次探讨,建立了长江中下游地区与燕山期火山-侵入活动有关的铁、铜等矿床的成矿系列;叶庆同、石桂华等(1991)<sup>[144]</sup>研究了西南三江成矿带的矿床成矿系列,建立了11个矿床成矿系列、16个亚系列,并编制了三江地区成矿系列图;陈毓川、毛景文等(1993)<sup>[145]</sup>在桂北地区进行了从元古宙至燕山期的成矿研究,确定了各地质历史阶段的5个矿床成矿系列,并且探讨了它们的时、空及成矿物质的演化规律,编制了区域成矿系列图。此外,对阿尔泰成矿带的成矿系列研究(叶庆同等,1998)<sup>[146]</sup>、对秦岭地区矿床成矿系列的研究(陈毓川,王平安等,1994)<sup>[147]</sup>以及全国非金属矿产成矿系列的研究(陶维屏等,1994)<sup>[148]</sup>,均取得了很好的成果。

(2) 在成矿系列理论研究方面,矿床成矿系列概念随着研究工作正在不断地发展与完善,矿床成矿系列研究不断得到深化、成矿系列的理论研究不断丰富与提高。

如:矿床成矿系列组合,最初程裕淇等<sup>[114]</sup>(1979)只划分出沉积成矿作用、变质成矿作用、岩浆成矿作用3个组合。而翟裕生等<sup>[125]</sup>(1996)根据近几年的最新研究资料,认为热水沉积和生物作用是相对于岩浆、沉积、变质以外的系统,分别有其各自特征和成矿作用特点,形成相应的矿床,因此可分别分解出两个成矿系统,相应地补充了两个成矿系列组合,即热水沉积成矿系列组合和生物成矿系列组合;并在其专著《成矿系列研究》(1996)中,不但论述了成矿系列研究的基

本问题、方法和特点,而且详细地论述了与同熔型花岗岩有关的成矿系列、重熔(S)型花岗岩有关的成矿系列、陆相火山-次火山岩系的金、铜、(银、铅、锌)成矿系列、与斜长岩-辉长岩有关的成矿系列、与古生代沉积盆地有关的成矿系列的特征和有关实例。王世称等<sup>[149]</sup>(1994)依据矿床与矿产资源体两者之间界限的动态性<sup>[152]</sup>,认为矿产资源和矿床一样同样具有系列性,提出矿化系列的概念。在非金属矿床成矿系列的研究方面,陶维屏等<sup>[133, 140, 150, 151]</sup>、章少华<sup>[152, 153, 115, 138]</sup>、陈从喜<sup>[154, 155, 109, 119]</sup>等对非金属矿床成矿系列进行了系统的研究,根据非金属矿床成矿的特点,提出了非金属矿床成矿系列的定义和划分原则,划分了三大成矿系列31个非金属矿床系列。此外,李人澍<sup>[156]</sup>(1991)、翟裕生<sup>[116]</sup>(1992)、金伟<sup>[157]</sup>(1993)、章少华<sup>[115]</sup>(1993)、王世称<sup>[151]</sup>(1994)、陈从喜<sup>[119]</sup>(1998)等对综合成矿系列的研究方法和有关问题进行了专门讨论。

### 2.2.4 成矿系列研究的发展趋势展望

从长远的发展趋势上看,矿床成矿系列理论研究仍有许多方面有待深化,理论内容仍须进一步丰富和完善。

(1)成矿系列实质上是成矿系统与外部环境发生物质和能量的交换所形成的一系列矿产<sup>[158, 159]</sup>。

(2)成矿系列的内部结构、层次、分类方案,成矿系列之间的相互关系以及成矿系列与含矿建造、构造环境的关系问题将进一步查明和完善,以便人们更有效地应用成矿系列理论进行成矿预测和找矿评价。

(3)成矿系列研究将向更深层次上拓展,与区域壳-幔结构、岩石圈演化和成矿动力学研究相结合,拓展研究的深度和广度。

(4)新技术、新方法、新思维在成矿系列研究中将得到广泛应用。

(5)从矿带(区)、省(区)至全国建立矿床成矿系列系统,总结区域及全国的成矿规律;同时重视同国外重要成矿区(带)的对比分析,逐步地开展全球性的矿床成矿系列研究,探讨区域与全球的地质演化及其规律。

## 2.3 空间信息成矿预测理论综述

随着现代科技的迅速发展和人类对矿产资源需求的日益增长,找矿工作已由地表矿、浅部矿、易识别矿转向寻找隐伏矿、难识别矿,矿床综合信息成矿预测因此而成为成矿学研究领域中的前沿和热点<sup>[161-171]</sup>,成矿预测理论和方法也得到了迅速的发展。

於崇文<sup>[189-192]</sup>将复杂性理论及非线性科学与矿床地质学相结合,提出成矿动力系统混沌边缘分形生长的成矿理论,认为成矿系统总体上是开放的、远离平

衡的、时空延展的动力学系统。地洼成矿理论是陈国达创立并发展起来的成矿学理论<sup>[78-94]</sup>，用历史-因果论、发展演化与改造相结合的观点，研究地壳结构和演化规律。该理论在国内外成矿理论研究、地质找矿等方面得到了较广泛的应用。特别是“大地构造多阶段、多物质来源、多成矿作用、多成因类型和多控矿因素”的“五多”为特征的“多因复成矿床”理论的提出，使广大地质工作者耳目一新、走出了“单一成矿”理论的误区，在国内外矿床学研究领域取得了理论上的重大突破和实践上的丰硕成果。

成矿预测理论方面，相似类比理论是最重要和最基本的理论。自20世纪90年代以来，赵鹏大等<sup>[193-200]</sup>倡导以“求异”原理为基础，提出地质异常致矿的新的成矿预测理论。张均等<sup>[201-207]</sup>提出了应用成矿场理论和矿化时空结构分析方法进行隐伏矿体定位预测的基本思路。赵鹏大、王世称等<sup>[208-214]</sup>在矿产资源预测的多年科研实践中，基于地、物、化、遥等综合信息解译和有机关联的基础上，提出了综合信息矿产预测理论，通过综合信息找矿模型的建立，圈定最佳找矿有利地段。

在成矿预测方法上，模型预测方法一直占据主导地位，成矿预测方法的发展主要体现在模型的发展上。早期的概念模型和经验模型是以相似类比理论为基础，结合矿床学和成矿学的相关理论而建立起来的成矿预测模型。概念模型预测方法亦称矿床模型法，该方法代表性的研究工作主要有Cox、Singer、Hondgson、Wyborn等人的论著以及美国地质调查局1996年对美国境内距地表1km以上范围内的金、银、铜、铅、锌等矿产的估计<sup>[215-219]</sup>。典型代表是“三部曲”矿产资源评价方法，该方法是在20世纪80年代开始的美国本土固体矿产资源评价计划中，由美国矿床学家D. A. Singer等人经十多年的研究和实践而提出来的<sup>[220-223]</sup>。模型找矿方法的发展趋势是将概念模型方法和经验模型方法有机地结合起来，强调找矿信息、找矿经验和找矿理论的融合<sup>[224-226]</sup>，利用地质、地球物理、地球化学、遥感以及矿床(点)的分布特征、矿床勘探史等多源信息，以矿床模型为前提，建立区域成矿与多元地质信息的定量预测模型，进行资源潜力的定量预测。数字矿床模型评价方法正是这种发展趋势的具体体现<sup>[227]</sup>。在我国，王勇毅等<sup>[228]</sup>参考“三部曲”成矿预测方法的基本思路，以经验模型方法的多元信息综合评价为基础，以矿床模型和勘查数据共同驱动，初步建立起了中国铜矿的数字矿床模型。

目前国外隐伏矿预测的理论与方法研究，主要集中表现为两个方向<sup>[229-234]</sup>：其一是在深入研究成矿地质环境和成矿机制的基础上，建立不同层次的矿床勘查模型来指导找矿靶区优选和隐伏矿预测。美国学者S·亚当斯等以卡林型金矿为例，提出了隐伏矿预测的“资料—过程—准则”模型的思路与方法，导致了在已知矿带深部及外围找矿的重大突破。法国学者C. Castaing等开始研讨流变不均一性和力学不变性在脉状矿床定位中的作用。其二是强调综合应用地质和物化探方

法,建立与“阶段—目标—方法”相匹配的“预测普查组合”来指导不同层次的隐伏矿预测和评价。

新技术、新方法和其他学科(如数学、非线性科学、GIS等)的介入,使成矿预测方法得到了长足的发展。数学方法除了常规的多元统计方法之外,在成矿预测中运用较多的主要有:找矿信息量法、模糊数学方法、层次分析法、成矿有利度法、杨氏复杂矿床评价法等。

地理信息系统(GIS)主要研究将计算机技术和具有空间分布特征的地理数据相结合,通过对地理数据的管理和一系列空间分析操作,为地球科学、环境科学和工程设计等提供对规划、管理和决策等有用的信息<sup>[235-238]</sup>。地理信息系统<sup>[239, 240]</sup>是在20世纪60年代,加拿大的Roger F. Tomlinson利用数字计算机处理和分析大量的土地利用地图数据的基础上提出的,并建议加拿大土地调查局建立加拿大地理信息系统(CGIS),以实现专题地图的叠加、面积量算等。与此同时,美国的Duane F. Marble利用数字计算机研制数据处理软件系统,以支持大规模城市交通研究,也提出建立地理信息软件系统的思想<sup>[241-243]</sup>。

GIS具有强大的管理和分析空间数据的功能,因而在很多领域都得到了广泛的应用<sup>[244-253]</sup>,使人们认识到GIS在对地理信息的获取和应用方面的巨大作用。

在矿产资源评价领域,GIS提供了在计算机辅助下对地质、地理、地球物理、地球化学和遥感等多源地学信息进行集成管理、有效综合和分析的能力,成为改变传统矿产资源评价方法的有力工具。它的应用始于20世纪80年代初<sup>[254-262]</sup>。加拿大地调所(GSC)在20世纪80年代后期开展了用GIS进行矿产资源潜力填图的研究。GSC著名的地质统计专家F. A. Agterberg和Graeme. F. Bonham-Carter教授提出了利用条件概率与贝叶斯准则相结合的证据加权模型,实现二元模式图综合新方法,在矿产资源评价中首次将GIS的空间分析与定量模拟结合起来。Bonham-Carter教授较先运用GIS多源信息综合分析技术进行火山块状硫化物矿床的评价。

在我国,国土资源部应用GIS进行矿产资源预测始于20世纪80年代中期。1986年,由地矿部遥感中心主持,长春地院、中国地质大学、地矿部遥感所等单位参加,开展了“遥感图像与其他地学数据综合图像处理技术及应用研究”,系统地研究了地质勘查数字图像处理与综合的主要技术环节,并开发了多种图像软件包。“八五”期间,中国地质大学、北京物化探研究所、北京计算中心、成都理工学院等通过各种项目的实施进行应用GIS技术的综合成矿预测研究。国家“九五”地质科技攻关项目更是强调运用新技术、新方法开展研究,其中就包括GIS技术的应用。当前,国土资源部正在实施的新一轮国土资源大调查项目,强调以GIS技术为基础,实现矿产勘查跨世纪工程等主流程的信息化。



## 第3章 区域成矿背景

### 3.1 地理位置

云南老君山矿集区位于云南省东南部，行政区划跨文山壮族苗族自治州的马关、麻栗坡和西畴三县，南与越南接壤，地理坐标：东经  $104^{\circ}00' \sim 105^{\circ}14'$ ，北纬  $22^{\circ}36'17'' \sim 23^{\circ}17'$ 。矿集区面积  $5745 \text{ km}^2$ ，拐点坐标见表 3-1。

表 3-1 马关-麻栗坡锡钨铅锌矿集区拐点坐标表

序号	坐标	
	经度	纬度
1	$105^{\circ}14'00''$	$23^{\circ}17'07''$
2	$105^{\circ}14'00''$	$23^{\circ}30'00''$
3	$104^{\circ}47'05''$	$23^{\circ}30'00''$
4	$104^{\circ}00'00''$	$23^{\circ}00'00''$
5	$104^{\circ}00'00''$	$22^{\circ}36'17''$
6	$105^{\circ}01'10''$	$22^{\circ}36'17''$
面积	$5745 \text{ km}^2$	

### 3.2 大地构造位置

云南都龙老君山锡钨多金属矿集区，是滇东南锡矿带上最重要的锡多金属矿集区之一，属于我国著名的南岭纬向成矿带的西延部分<sup>[263]</sup>。其大地构造位置位于东南地洼区、云贵地洼区、中蒙南北地洼区及滇西地洼区的交汇部位，属于中亚壳体与东亚壳体的过渡地带<sup>[62, 264]</sup>（图 3-1）。