

“我国典型金属矿科学基地研究”项目系列丛书

云南金顶超大型铅锌矿床

薛春纪 池国祥 陈毓川 等著



地质出版社

“我国典型金属矿科学基地研究”项目系列丛书

云南金顶超大型铅锌矿床

薛春纪 池国祥 陈毓川 王登红 杨建民 曾 荣
高永宝 薛 伟 王晓虎 高炳宇 李足晓 顾 浩 著
陈颖辉 代志杰 亚夏尔亚力坤 李成厚 佘向阳

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

金顶铅锌矿床是全球形成时代最新且是唯一陆相沉积岩容矿的超大型铅锌矿床,它在成因上有别于世界其他地区以沉积岩为主岩的铅锌多金属矿床,代表着沉积岩容矿铅锌矿床的一种新类型。对其研究不仅具有重要的成矿学理论意义,还能为在其他地方寻找类似矿床积累知识,有可能是人类 21 世纪铅锌矿勘查的新方向。本书在搜集各方面资料的基础上,在金顶铅锌矿科学研究基地建设过程中,以成矿流体、矿石硫铅同位素、有机岩相学及有机地球化学和沥青 Re-Os 等时线年龄等为着手点,建立了矿床的壳幔流体混合成因模型,确定了勘查找矿标志。

本书可供从事铅锌等贱金属矿床科学研究的技术人员及研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

云南金顶超大型铅锌矿床 / 薛春纪等著. —北京:
地质出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-116-10158-6

I. ①云… II. ①薛… III. ①铅锌矿床—研究—云南
IV. ①P618.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 317879 号

Yunnan Jinding Chaodaxing Qianxin Kuangchuang

责任编辑: 李 莉 于又华

责任校对: 王素荣

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京市海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 66554653 (邮购部); (010) 66554629 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010) 66554629

印 刷: 北京地大彩印有限公司

开 本: 889 mm × 1194 mm 1/16

印 张: 8 图 版: 3 面

字 数: 225 千字

版 次: 2017 年 3 月北京第 1 版

印 次: 2017 年 3 月北京第 1 次印刷

定 价: 80.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-10158-6

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

总 前 言

矿产资源是一种不可再生的自然资源，是人类社会赖以生存和发展的物质基础。中国是世界上地质演化历史悠久、成矿作用具有多样性的国家之一，自太古宙以来的各个地质历史时期的构造运动在中国都或多或少地留下了记录并伴随有不同规模的成矿作用。世界上最重要的三大成矿域（古亚洲成矿域、滨太平洋成矿域和特提斯—喜马拉雅成矿域）在空间上交汇于中国。多期复合造山铸就了中国独具特色的成矿体系。对于深化中国特色成矿规律的研究，亟须一套代表中国各类矿床的“字典”和科学研究基地作为矿产地质研究的示范区，并成为创新研究基地以及文化普及的园地。

我国已成为世界上最大矿产品进口国和生产国，而且随着国民经济的高速发展，矿产资源短缺的形势将更加严峻，迫切需要破解矿产资源不足之“瓶颈”。只有加大勘查力度，才能有效保障矿产资源供给。迄今，越来越多的老矿山面临资源枯竭或“硐老山空”的严峻局面。在过去 10 多年，我国部署了一系列国家计划项目，例如，“973”计划、科技支撑计划和地质调查专项等，开展区域成矿规律、勘查技术方法以及新区的矿产调查和勘查等。相比之下，对于典型大型矿床，尤其是正在开采的大型老矿山缺乏系统解剖研究，而这些大型矿山揭露出的地质现象极其丰富，往往是成矿新理论和新思维的发源地，对其进行立典性解剖研究，将会大大提升成矿理论。一个大型—超大型矿床从发现—勘查—开采以及开采过程中的多次补充勘查，都拥有一部史诗，包括运用不同勘查技术方法组合开展地质勘查，既有成功的经验，也有失败的教训，对其进行挖掘和总结，不仅能促进对该矿床深部及外围找矿，而且可以运用这些新认识和技术组合在相同景观下有效地开展找矿勘查。

目前，不少大型矿山经过多年的开采资源逐渐枯竭，甚至即将闭坑。一旦关闭和掩埋，许多丰富的地质现象，特别是独一无二的现象将荡然无存。因此，迫切需要在闭坑之前，把每一个重要矿床的地质特征客观地记录下来，以便后人参考。同时，将闭坑老矿山建成博物馆或科普旅游基地向社会开放，必将提高普通民众认识地球、了解资源及其形成过程的认知水平，有益于提升全民保护环境和节约资源的意识。因此，开展大型矿床的立典研究，既是科技创新研究和推动找矿勘查的需要，也是保护“历史科学资料”和提高全民科学素质之必须。

典型矿床科学基地有机地融合了创新、教学和科普，在推动全民科学文化素质和科技普及方面越来越发挥着重要作用。典型矿床基地既是科学研究的基地，也是专业教学和科学普及的园地。一些发达国家的矿山在开采阶段乃至闭坑后，都以矿石、岩石和开采历史及其相应的图集和图册为主体建立了一座座矿山博物馆或科技馆。这些博物馆和科技馆逐渐被开发为地球科学技术培训以及古矿业遗迹的参观基地，极大地促进了旅游业的发展和矿业科学技术的普及。

为此，国土资源部于 2009 年启动公益性行业科研专项经费项目“我国典型金属矿科学基地研究”，对我国重要矿种 29 个大型—超大型金属矿床开展立典研究，并建立科学基地。具体包括江西德兴斑岩型铜矿、西藏甲马斑岩—矽卡岩型铜钼矿、云南北衙斑岩—矽卡岩型金（铜）矿、安徽铜陵矽卡岩型铜多金属矿、新疆阿舍勒块状硫化物矿床（VMS 型）铜锌矿、云南东川砂岩型铜矿、甘肃金川岩浆型铜镍矿、河南南泥湖—三道庄斑岩—矽卡岩型钼钨矿、陕西金堆城斑岩型钼矿、新疆可可托海伟晶岩型锂铍铌钽矿、湖南柿竹园矽卡岩—云英岩钨锡钼铋矿、云南个旧矽卡岩型锡多金属矿、广西大厂锡石硫化物型锡矿、湖南锡矿山中低温热液型锑矿、辽宁弓长岭 BIF 型铁矿、甘肃镜铁山海底喷流沉积型铁矿、安徽凹山玢岩型铁矿、湖北大冶矽卡岩型铁矿、内蒙古白云鄂博铁稀土建造矿、云南会泽密西西比型（MVT）铅锌矿、甘肃厂坝—代家庄热液型铅锌矿、内蒙古东升庙 SEDEX 型铅锌矿、云南金顶热液型铅锌矿、海南石碌沉积变质型铁矿、四川攀枝花岩浆型钒钛磁铁矿、福建

紫金山浅成低温热液型铜金矿、山东焦家—玲珑石英脉—蚀变岩型金矿、贵州烂泥沟卡林型金矿、江西冷水坑次火山岩热液型银铅锌矿。这些矿床都是储量巨大、成矿类型具有代表性、成矿方式具有特殊性的矿床，而且在我国国民经济建设中曾经或正在发挥重要作用。

此次工作对矿床的矿石组合、结构构造、成矿期次和阶段、围岩蚀变、找矿标志、形成时代、成矿物质来源、成矿物理化学条件、同位素地球化学特征、成矿环境等开展了系统研究，同时，针对各种不同类型矿床研究中存在的关键科学问题开展攻关研究：斑岩型铜矿形成期间从岩浆凝固晚期到成矿流体析出转变过程中组分演变特征与相应的物理化学条件；斑岩铜矿和斑岩钼矿形成环境和物质来源的异同性；古盆地流体来源和运移的驱动力，流体汇聚的规律性；与A型或高分异性I型花岗岩有关的稀有和钨锡矿床的物质来源，地幔对成矿的贡献及含矿岩体的主要辨别要素；变质古海底喷流型矿床的环境恢复等方面，取得了一系列重要创新成果，在综合研究的基础上，建立了矿床模型。通过收集和整理典型矿床勘查、开采过程中所采用的勘查技术和方法，梳理出不同类型矿床勘查的有效方法组合，提供了矿床成功勘查的范例。

在国土资源部公益性行业科研专项经费的支持下，基于前人找矿勘查和研究成果，结合此次补充研究，编著了“我国典型金属矿科学基地研究”项目系列丛书，既客观地反映这些大型—超大型矿床的基本特点和勘查开发与研究的历史，也充分展示了最新的研究水平。

历时5年，项目的顺利执行以及丛书的及时出版，得到了各级主管部门、承担单位和有关矿山企业的大力支持，得益于陈毓川、李廷栋、裴荣富、叶天竺、吴淦国等专家的殷切指导和同行们的热情帮助，值此谨代表项目执行团队200余位同仁深表谢忱。

矿床学的研究是一个不断探索、不断深化的过程，尽管编著者付诸很大努力，仍然存在一些不足或错误之处，请读者批评指正。

毛景文 张作衡 吕志成
“我国典型金属矿科学基地研究”项目首席科学家
2014年11月

前言

在成矿理论的建树方面,超大型矿床所起到的作用是不容忽视的,超大型矿床不仅是矿业界关注的对象,而且也对矿床学家具有巨大的吸引力,由于它们有庞大的规模、曲折的发现历史并经过长时间的开发,可以对它们进行持续的、系统的观察、测试、剖析并从中不断得到启迪,不少学说、理论、观点和见解等的提出都是研究超大型矿床的产物,而矿床学研究水平的不断提高在一定程度上也得力于超大型—大型矿床的研究(涂光炽,2000)。

金顶铅锌矿床是目前中国规模最大的铅锌矿床,也是世界上铅锌金属储量 >1000 万 t 的 17 个超大型铅锌矿床之一,还是世界上最年轻的以沉积岩为主岩的矿床(Xue et al., 2003)。它的铅锌累计控制储量为 1500 万 t,矿石平均品位 Pb 1.29%, Zn 6.08%, Pb:Zn = 1:4.7,预测深部尚有 100 万 t 的铅锌金属潜在资源量,此外,还有 600 万 t 以上的铅锌金属量被剥蚀掉,实际成矿的总金属量要 >2200 万 t(朱上庆等,1995)。同时, Tl (8167 t)、Cd (17 万 t)、Ag (1722 t)、S (513 万 t)、Sr (147 万 t) 均已分别达到大型矿床规模。

金顶铅锌矿床是全球形成时代最新且是唯一陆相沉积岩容矿的超大型铅锌矿床(Xue et al., 2003),它在成因上有别于世界其他地区以沉积岩为主岩的铅锌多金属矿床,如密西西比河谷型(MVT)、喷流沉积(Sedex)型及砂岩型(SST)矿床。MVT 矿床产在(古生代)浅海台地碳酸盐岩层序中,是一组从盆地流体中沉淀出的后生矿床,矿体是层控的而不是层状的,矿物成分简单,成矿温度在 75~200℃之间。Sedex 型矿床形成于拉张(裂谷)盆地,主要的成矿时代是元古宙、古生代及现代洋底,成矿流体沿生长断裂上升到海底同生沉积或早成岩期成矿,矿体上部表现为层状,下部往往表现为反映成矿流体上升过程中与围岩交代蚀变的漏斗状矿体,伴有热水沉积(如硅质岩、重晶石、钠长石岩、电气石岩等)。SST 铅锌矿床产在相对长期稳定的构造背景下,稳定的构造环境有利于背景铅高的 Si-Al 质基底及长石砂岩风化,与砂岩铀矿或红层铜矿的形成方式相似,矿床沉淀于不同化学障之间稳定边缘的还原环境,成矿元素以铅为主,方铅矿在石英砂岩中呈浸染状;大多数矿床学家认为它们由铅(锌)背景较高的古陆经风化剥蚀,地下水搬运金属元素在濒邻海滨的砂质层下遇到具有还原作用的渗入海水而发生金属硫化物沉淀,矿床无疑具有(准)同生性质。尽管都是以沉积岩为主岩的铅锌多金属矿床,但金顶矿床的成矿背景、矿体产状及 Zn/(Zn+Pb) 值等都与 SST 铅-锌矿床不同;金顶矿床以非海相碎屑岩为主岩亦不同于以海相碳酸盐岩为主岩的 MVT 矿床;金顶矿床矿石的产状、微细结构及 Zn/(Zn+Pb) 值虽与 Sedex 型矿床相似,但没有可以肯定的成矿特征,并且成矿背景不同于后者。以沉积岩为主岩的铅-锌矿床在成因上主要与海盆演化中沉降(如 Sedex 型矿床)、稳定台地(MVT 矿床)及前陆盆地(SST 矿床)等不同阶段发展起来的盆地流体系统有关,但金顶矿床成矿流体形成于受压陆相盆地环境。所以,金顶铅锌矿床可能代表了沉积岩容矿铅锌矿床的一种新类型(Xue et al., 2003, 2007a),对其研究不仅具有重要的成矿学理论意义,还能为在其他地方寻找类似矿床积累知识,有可能是 21 世纪人类铅锌矿勘查的新方向(Kyle and Li, 2002; Xue et al., 2004)。

基于以上特点和原因,云南兰坪金顶铅锌矿野外科学观测研究基地才成为按照《关于组织开展国土资源部野外科学观测研究基地命名和建设的通知》(国土资发〔2010〕213号)要求,由专家严格评审,经国土资源部批准,特命名和建设的野外基地之一。金顶铅锌矿是国土资源部批准命名和建设的第一批野外科学观测研究基地。

在金顶铅锌矿基地建设过程中,主要取得以下成果和认识:

(1) 建成了金顶铅锌矿野外科学观测研究基地, 包括野外观测路线 3 条、观测点 15 处、博物馆及其相关标本陈列和图片展示、反映矿床发现—勘查—研究和当前研究认识的视频 (11 min) 等, 充分地反映了金顶铅锌矿地质和地球化学性质。

(2) 研究认为, 金顶矿床的成矿流体为中低温度、中低盐度的流体, 而且成矿流体温度与盐度呈现负相关关系 (从矿区东部向西部均一温度明显降低, 而盐度趋于升高), 这种负相关关系可能指示主成矿阶段发生了一种高温低盐度流体与另一种低温高盐度流体的混合。

(3) 金顶矿区不同矿化阶段流体包裹体微量元素 (包括 REE) 的配分曲线和含量分布, 不因寄主矿物种类而明显变化, 不同矿化阶段矿物流体包裹体微量元素组成可以为大规模成矿过程提供约束; 金顶矿床大规模成矿从第一到第三矿化阶段, 内生成矿流体 $\sum \text{REE}$ 逐步升高 ($1.34 \times 10^{-9} \rightarrow 6.28 \times 10^{-9} \rightarrow 297.03 \times 10^{-9}$), 轻重 REE 分异越趋显著, 系统从还原性演化为氧化性, 微量元素组合趋于复杂, 流体中成矿元素 (Zn 在 $13.594 \times 10^{-9} \sim 29331.810 \times 10^{-9}$ 之间) 不断富集 (Zn 依次是中国陆壳的 $0.16\% \sim 0.20\%$ 、 $0.041 \sim 0.193$ 、 $0.028 \sim 0.341$); 而且可以看出在早—中阶段的流体成矿可能是快速的, 中—晚阶段趋缓, 深、浅部两种不同性质流体的混合可能是流体成矿的基本过程。

(4) 金顶铅锌矿成矿流体中含 $2.6\% \sim 11.5\%$ 的地幔 He ($^3\text{He}/^4\text{He} = 0.19 \sim 0.81 \text{ Ra}$), 明显的地幔 Ne ($^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 10.57 \sim 10.82$, $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 0.03$), Xe 同位素组成 ($^{129}\text{Xe}/^{130}\text{Xe} = 5.8 \sim 6.86$, $^{134}\text{Xe}/^{130}\text{Xe} = 2.26 \sim 2.71$) 表现显著的地幔 Xe 特征, 成矿流体中存在一定比例地幔成因的 He、Ne、Xe 同位素。

(5) 金顶铅锌矿矿石硫同位素组成变化大 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}} = -48.43\% \sim -1.71\%$), 硫可能主要源于有机质或细菌参与下的硫酸盐还原 (BSR); 矿石铅同位素组成 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.138 \sim 18.60$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.267 \sim 15.684$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 37.802 \sim 39.046$) 表现出壳幔混合铅的特征。

(6) 金顶铅锌矿成矿流体含烃富 CO_2 , 流体包裹体反映曾出现 $513 \times 10^5 \sim 1364 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的流体超压; 但兰坪盆地流体数值模拟揭示的流体超压出现在推覆体构造发生时仅为 $170 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。高达 $1364 \times 10^5 \text{ Pa}$ 的流体超压很可能是深部富 CO_2 含矿流体注入引起的。

(7) 金顶铅锌矿以古新统云龙组含砾砂岩和砂砾岩为主岩的铅锌矿石中沥青的 Re—Os 等时线年龄为 $68 \pm 5 \text{ Ma}$, 指示了金顶古油气成藏时代。金顶古油气藏形成于古新世, 先于铅锌硫化物大规模成矿, 烃类物质具有通过热化学还原硫酸盐提供铅锌成矿所需硫化氢的客观条件。油气成藏与铅锌成矿在金顶矿区很可能是一个先后发生的连续地质过程, 成藏为成矿奠基, 成矿伴随着油气藏的破坏。

(8) 建立了矿床的壳幔流体混合成因模型, 即高盐度低温盆地流体与来自地幔深处的低盐度高温流体在金顶穹隆中混合, 以生物为主成因的还原硫与金属离子快速集中反应而成矿。

为更好地促进云南兰坪金顶铅锌矿的研究以及野外科学观测研究基地的建设, 结合本项目研究, 提出以下建议:

(1) 稀有气体元素以及铅同位素表明成矿流体是壳幔不同性质流体系统混合的结果, 铅可能主要是上地幔和下地壳铅, 但混合了少量上地壳铅, 是一种壳幔混合铅, 但目前仍存在一些争议。建议从非传统同位素方法着手, 研究矿区 Zn、Fe、Cu 等同位素分馏机制及金属元素来源, 以佐证铅同位素反映的信息。

(2) 关于硫化氢的形成机制, 主要观点认为是由硫酸盐还原作用形成。而本次研究认为是原地细菌硫酸盐还原作用 (BSR) 形成, 也有学者认为是非原地 BSR 作用形成。建议作进一步的研究工作来论证该矿区的细菌硫酸盐还原作用 (BSR)。

(3) 硫同位素组成表明, 硫具有多来源的特征, 主要来自沉积硫, 少部分可能为地幔硫, 但不同来源的硫各自的贡献尚不清楚。建议今后加强这一方面的研究工作。

(4) C、O 同位素联合示踪表明, 金顶矿集区某些形成方解石的热液中 CO_2 的起源可能与地幔流体或沿断裂, 或随岩浆活动向盆地浅部脱排事件相关。但不清楚幔源流体是通过地幔脱气作用沿着兰坪—思茅断裂直接运移到矿化部位, 还是通过幔源岩浆的侵入转运而来。建议依此为着手点, 深入探

讨论幔源流体的来源问题,进而促进矿床成因的研究。

(5) 对热液成矿期金属硫化物黄铁矿利用 Re-Os 法测定的等时线年龄为 67.6 ~ 76.4 Ma (即 72 ± 4.4 Ma), 这个年龄并不能代表成矿年龄。建议在成矿年龄测定方面, 结合区域及矿床地质特征, 应用多种手段综合判定。

通过对金顶铅锌矿的立典研究, 建立了矿产资源科研基地, 可望推动在三江成矿带实现相关矿床找矿的新突破, 有助于部分缓解我国的资源瓶颈问题, 从而实现经济和社会的可持续发展。通过矿产资源野外基地的建设, 形成了国家矿产资源成矿理论的原创性成果, 提出大型矿床找矿勘查的找矿范例, 随着矿山资源枯竭, 逐渐推动建成矿山博物馆或科技馆。

初步构建公共平台, 并逐步形成科技创新研究、专业教学和科学普及教育基地。推动攀登科学高峰, 提升地学教学水平, 提高全民素质, 逐渐形成我国矿业文化。产生的创新性成矿理论与找矿勘查模型将无偿推广应用, 为全社会服务。创新研究、教学和科普基地面向全社会开放。系统采集的标本存放于承担单位标本馆, 供学者和民众参观。金顶铅锌矿野外科学观测研究基地目前已经接待过美国、加拿大等世界各地和中国地质科学院、昆明理工大学等团体和个人数十次, 已成为我国铅锌矿科研-教学-科普基地。

本专著是集体智慧的结晶, 各章编写分工为: 前言薛春纪、陈毓川, 第 1 章薛春纪、陈颖辉、代志杰, 第 2 章薛春纪、陈毓川, 第 3 章薛春纪、曾荣、高永宝、陈颖辉, 第 4 章薛春纪、李足晓、亚夏尔亚力坤、陈颖辉, 第 5 章薛春纪、池国祥、薛伟、曾荣, 第 6 章薛春纪、高永宝、高炳宇、陈颖辉, 第 7 章薛春纪、高炳宇、李足晓、顾浩, 第 8 章薛春纪、池国祥、顾浩, 第 9 章薛春纪, 第 10 章薛春纪。在专著的编写过程中还得到王登红、杨建民、王晓虎、李成厚的指导和帮助。

研究工作中, 得到了国土资源部、中国地质科学院矿产资源研究所、云南省国土资源厅、云南省兰坪县国土资源局和云南金鼎锌业有限公司、中国地质大学(北京)“地质过程与矿产资源国家重点实验室”, 以及中国地质科学院“国家地质实验测试中心”等有关单位、部门、领导和相关科技人员的支持与帮助, 课题组向这些单位和个人表示衷心感谢!

目 录

总前言 前 言

第 1 章 矿床发现勘探和科学研究史	1
1.1 金顶铅锌矿床发现勘查史	1
1.2 金顶铅锌矿床科学研究史	2
第 2 章 区域地质	17
2.1 “三江”铅—锌成矿带成矿背景	17
2.2 兰坪盆地在滇西区域构造中的位置	17
2.3 兰坪盆地区域地层	18
2.4 区域构造	25
2.5 火成活动	33
2.6 近代构造活动、地热和地震	35
2.7 区域构造发展和兰坪盆地的演化	36
2.8 兰坪盆地成矿地质背景	37
第 3 章 矿区地质	39
3.1 矿区地层	39
3.2 矿区构造	45
第 4 章 矿床地质特征	49
4.1 含矿带特征	49
4.2 矿体产状	50
4.3 矿石矿物特征	53
4.4 矿化分带与成矿阶段划分	54
4.5 有机质特征	55
第 5 章 成矿流体系统特征	56
5.1 金顶铅锌矿床流体包裹体研究现状	56
5.2 流体包裹体的岩相学特征	57
5.3 流体包裹体冷热台观测及结果	57
5.4 流体包裹体的基本化学成分	60
5.5 流体包裹体同位素组成	69
5.6 矿田内超压成矿流体系统的发现及意义	75

第 6 章 硫、铅、氧、碳同位素和有机地球化学 80

6.1 矿石硫化物硫、铅同位素特征 80

6.2 矿区碳酸盐矿物碳、氧同位素特征 96

6.3 有机地球化学特征 98

第 7 章 成矿年代学 101

第 8 章 成矿模式 105

第 9 章 勘查标志与成矿预测 107

第 10 章 结论 108

参考文献 110

图版说明及图版 116

第1章 矿床发现勘探和科学研究史

1.1 金顶铅锌矿床发现勘查史

云南兰坪金顶矿区开采历史悠久。据传明、清两代已有古人在此采矿炼银，目前在金顶北厂和跑马坪一带仍可见到遗留下来的老硐和矿渣遗迹。

1949年前曾有德国人米士到金顶—营盘一线进行过路线地质调查，其与马祖望亦曾到区内踏勘汞、锑矿点，但均未发现金顶铅锌矿床。

1957~1959年，云南省地质局区测队在该区开展重砂测量时，发现铅锌矿化线索。

1960年5月，云南省地质局区测队依据测区获得的线索，派地质普查组衡思清等人前往金顶地区开展普查，取回了含铅砂岩矿石标本，技术负责人范承钧认为矿石类型较好，值得进一步开展普查工作。1960年10月，区测队（队长高瑞亭及队技术负责人范承钧）派矿普四分队（技术负责人雷又生）前往金顶开展评价，其后大队又决定五分队技术负责人黄仕锐前往金顶矿区接替雷又生的工作。黄仕锐与李高富等先后对西坡、南厂、北厂等地进行矿检，发现了北厂铁帽露头附近有古人开采的老硐及矿渣遗迹，随即在老硐洞内微弱方铅矿化的黄色砂岩中采了两个样品，经分析铅锌含量均达工业品位要求；经半年左右的野外工作，施工少量探槽，对铅锌矿化的岩层进行连续刻槽取样，从而发现了砂岩型厚大铅锌矿体。1962年，由黄仕锐执笔编写了《矿区地质简报》，估算了铅锌地质储量，具中型以上远景规模。

1965年7月至1966年为初步普查阶段，1967年进入详细普查，开展了北厂、架崖山、西坡、南厂、白草坪、蜂子山矿段的评价，完成主要工作量有：槽探 77 789 m³、浅井 1466 m、坑道（13个）1673 m、钻探 8343 m（36个钻孔）以及地形测量、地质测量、水文地质、实验分析等工作。1967年，地质部地矿司总工程师岳希新来到矿区，对矿床评价及下一步的勘探做了部署指导。1968年5月，由邓万猷、王鲁伯、何世章、杨荣生、戴兴乾等人执笔编写了《兰坪金顶铅锌矿区详查报告及勘探设计书》，计算了铅锌金属储量 914.46 万 t，已达到大型铅锌矿床的规模。

1968~1972年，矿区转入初勘，由于受“文革”的影响，勘查工作受到严重的干扰。1972年开始，转入详查。在此期间，杜明达识别出地层倒转，理清了推覆构造，为顺利探明矿床做出了贡献。1975年，王鲁伯任第十一地质队技术负责人。1972年秋，西坡矿段经省计委批准，划归兰坪县开采，1975年对该矿段单独勘探，1976年由龙祥符、魏永乐、杜培颀执笔编写了西坡矿段勘探报告，共探明铅锌金属储量 99 741 t，同年12月经云南省储委审查批准。1977年开始筹建兰坪县办铅厂，设计年生产能力为 3 万 t。1978年投产，实际年开采 2 万 t，并相继建成选厂、冶炼厂。

1978年2月，在队技术负责人王鲁伯和矿区技术负责人孙廉的主持下，系统总结了矿区普查勘探以来十多年的地质成果，编制了矿区最终勘探设计，计算北厂、架崖山、蜂子山3个主矿段的铅锌金属储量 1388.85 万 t。在详查阶段，云南省地质局副局长工程师李希勳、总工程师何发荣、副总工程师和志强等，先后到矿区，就如何提高矿床勘探和研究程度方面提出建设性意见。

1979年，云南省第十一地质队与第七地质队合并成八〇一队，1981年又组建成第三地质大队。同年12月，由第三地质大队结束金顶矿区的详勘施工。

1982年1月至1984年10月，由王鲁伯、孙廉主持，共有 64 人（以王鲁伯、孙廉、陈式房、王强、杨荣生、阳承厚、包育秀、杜培颀、陈荣欣、许宗劬为主）编制《金顶铅锌矿最终（详勘）报

告》。1983年5月,全国储委在云南下关召开了金顶详勘报告的审查会议,提出补12个钻孔,补采各类实验样品,对灰岩型氧化矿的钻探取样准确性进行验证。1984年10月,完成上述野外补勘和详勘报告的修改稿,于同年12月经全国储委审查批准。

金顶铅锌矿的勘查从1965年开始至1984年12月详勘报告批准,历时19年之久。累计完成主要工作量:槽探16.1万m³、浅井2402m、坑探17个2488m、钻探420个孔计10.83万m,及其他各项地质、水文地质、岩矿测试等工作。除西坡、跑马坪矿段外,累计探明铅锌金属储量1433万t,铅+锌平均品位9.63%;共生矿储量:天青石(矿物量)61.40万t,硫铁矿(硫)40.03万t,石膏407.06万t,重晶石(矿物量)3.83万t;伴生组分储量:镉17.62万t,铊8166.99t,银1722.13t,硫铁矿(硫)513.84万t,锗147.11万t,钼2.25万t。累计投入费用1720.77万元,以探明的储量来衡量,勘查效益较好。

为了解北厂矿段北东侧的隔水边界,1981年施工了2个专门水文地质钻孔,在钻进中发现了跑马坪隐伏矿体。1983年开始对跑马坪矿段进行评价,投入钻探工作量38个孔,22251.55m,地勘费用584.3万元。1990年2月由王强、龙志、李国才、张永泽、习有林等执笔编写了《金顶铅锌矿跑马坪矿段详细普查地质报告》,经云南省地矿局审查批准。该矿段铅+锌金属储量100.63万t,共生硫铁矿矿石量201.52万t,天青石矿石量298.77万t,石膏矿石量14148.33万t;伴生矿储量:硫铁矿(硫)46.25万t,锗14.56万t,镉1.17万t,铊1535.71t,银62.91t。

1984年,对作为首采地段的架崖山矿段,在云南省地质局地矿处具体指导下,进行了开发前期的勘探工作,地质工作和钻探施工分别由第三地质大队八分队和八〇二队完成,共投入坑探1167m(5个坑道),钻探5026m(41个钻孔),总地勘费用120万元。1986年9月由陈式房、王强执笔编写了《架崖山矿段开发前期勘探说明书》,经云南省储委批准。计算了铅、锌金属储量297.41万t。

金顶铅锌矿从普查到勘查前后30余年,到1990年累计探明铅+锌总储量1500万t以上,加上深部预测的100万t和被剥蚀掉的600万t以上的金属量,实际生成时的金属量>2200万t。

金顶特大型铅锌矿床,是当今已知的我国乃至亚洲最大的铅锌矿床。云南省地质局区测队和第十一地质队,对矿床做出正确评价和探明储量做出很大贡献。

1.2 金顶铅锌矿床科学研究史

自20世纪60年代金顶矿床发现以来,人们在兰坪盆地开展了大量矿床地质和地球化学研究。

20世纪80年代,形成了对金顶铅锌矿研究热潮,具体如下:

施加辛等(1983)对矿区15件天青石、方解石及石英样品流体包裹体测定的均一化温度为140~309℃;收集他人108件方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、白铁矿、天青石、石英及方解石等矿物的起爆温度为215~441℃(少部分爆裂频数甚低,可能为胶体重结晶所致)。测定结果可以说明成矿温度属于中低温,根据矿石矿物包裹体测温结果、硫同位素计算的温度,以及矿物相平衡得到的温度判断矿区成矿热卤水的温度约为220±130℃。矿床的成矿热液是富含NaCl、CO₂及有机质的热卤水。获得金顶矿床中33件硫化物方铅矿、闪锌矿和黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围:方铅矿(17件)-0.29‰~-30.43‰,闪锌矿(4件)-1.71‰~-14.59‰,黄铁矿及白铁矿(12件)-3.84‰~-21.43‰,均为负值,说明硫主要是外生成因。据33件铅同位素资料,²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb为18.138~18.5228,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb为15.271~15.6343,²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb为37.8000~38.4808,属于正常铅,Pb-Pb法的模式年龄为3~123Ma。综合分析认为兰坪金顶铅锌矿的成因,基本上是属于沉积成岩作用加热卤水再造的层控矿床。

白嘉芬等(1985)根据矿石中微量元素(一般Sr>Ba,Sr/Ba=0.5~3;Mn在矿石中的含量比较高,在0.1%~0.4%之间;有机碳含量均在0.1左右,个别可达0.47%);硫同位素组成特征($\delta^{34}\text{S}$ 值全为负值,变化范围为-1.71‰~-30.43‰,相对富集轻硫,具有以生物作用为主的沉积矿床特征);铅同位素特征(²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb平均值为18.355;²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb值一般为38.4,个别为37.80;

$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 15.40, 铅同位素模式年龄为 22 ~ 82 Ma); 包裹体特征 (包裹体测温结果为 140 ~ 354 °C, 其中方铅矿、闪锌矿主要形成于 280 ~ 350 °C, 而天青石、石英、石膏形成温度为 140 ~ 280 °C; 包裹体的含盐度进行了测定, 结果为 5.05% ~ 14.6% (NaCl_{eq}) 以及包裹体气相色谱分析 (矿物包裹体中一般含 CO_2 , 在 0.01% ~ 0.7% 之间, 而方铅矿、闪锌矿和黄铁矿中含 CO_2 在 0.2% 以上, 说明含矿热水溶液富含 CO_2 。包裹体中 H_2O 的含量变化范围稍大, 为 0.08% ~ 1.21%, 一般在 0.1% ~ 0.3%, 含 H_2O 最高者为石英和节壳状的天青石), 结合矿体特征、矿石组构等, 认为该矿床是由早期沉积成岩 (成矿) 作用与后期 (含矿) 地下热水叠加改造所形成, 属同生沉积后期改造的层控铅锌矿床。

高广立 (1989) 研究认为金顶的硬石膏不是古近纪陆相红色碎屑岩系中的蒸发岩, 而是三叠纪海相碳酸盐岩系中的蒸发岩。从而说明金顶的灰岩角砾岩是膏溶 - 构造角砾岩, 即三叠系含碳酸盐岩角砾和岩块的硬石膏岩, 作为推覆构造的润滑层构造定位后, 断层活动引来地下水, 在地下水和细菌作用下, 经过溶解、崩塌和交代作用形成灰岩角砾岩。铅锌等硫化物和天青石在穹隆顶端和翼部大量沉淀富集成矿, 形成中 - 低温热液 (非岩浆热液) 矿床。

吴淦国等 (1989) 从构造变形分析入手, 论述了金顶矿床构造形成和演化的特征, 探讨了铅锌矿化富集的规律, 提出成矿作用主要表现为建造形成期的同生沉积带来了成矿元素并使其初步富集, 而构造变形期则由于断裂沟通地下热卤水和天水的渗透, 使成矿物质运移到受推覆构造和穹隆构造控制的高孔隙度、高渗透率的砂岩、角砾岩和构造剥离带而富集成矿。

赵兴元 (1989a, 1989b) 认为矿床的矿石硫主要来自有机质及硫化物, 其次来自生物分解硫酸盐及深源硫。与矿区以外区域硫来源不同 (区域硫主要为深源硫); 矿石铅主要来自经多次地质事件物化后的低铀钍源区上地幔, 很少来自壳源及壳幔混合铅。全岩铅主要来自地壳; 碳主要来自海相和陆相有机碳, 部分胶结物碳可能来自深源原始碳; 氧来自混合热液; 铋来自壳幔混合源。氢氧显示成矿溶液来自岩浆水与大气降水的混合热液, 以后者为主, 氢锶反映成矿溶液来自以岩浆水和大气水为主, 演化水 (同生 + 建造 + 变质水) 为次的混合热液。碳氧显示古、新近纪碳酸盐岩为淡水相沉积。结合对金顶铅锌矿床的成矿地质背景、矿床地质特征及其他成矿信息进行了分析, 初步认为该矿床成因是以幔源去气 - 热液沉积作用为主, 成岩定位后期改造而形成的层控矿床。

胡明安 (1988, 1989) 认为当碳酸盐类岩石位于地下水的活动带时往往发生岩溶。在云南金顶岩溶作用改造了古近纪热液期形成的原生铅锌矿石, 而金顶穹隆促进了这种作用的进行。最后, 在岩溶系统中重新形成了岩溶型矿石。碳酸盐岩石的溶蚀改造, 为其后的成矿作用提供了有利的容矿空间, 也能提供成矿物质, 形成这类特征的矿床——岩溶型矿床。

孙勇等 (1989) 认为在金顶铅锌矿床的成矿时期, 其含矿岩层的成岩状态以半胶结状为主, 为一导水性和含水性较好的古含水层。区域地质发展史和区域古水文地质发展史的恢复结果表明晚云龙期末为本区唯一可能的成矿时期。通过对矿床古水文地质痕迹分析, 并结合含矿层的岩性岩相分析, 矿液运移行为可描述为: 矿液来源于深部, 因受沉积湖盆边缘的外来推覆体的阻挡, 而沿导水性好的粗粒岩相带向湖中的穹隆流动。

综上, 在 20 世纪 80 年代, 关于金顶铅锌矿成矿的主要认识归类如下: 同生沉积 - 后期改造层控矿床 (施加辛等, 1983; 白嘉芬等, 1985); “中低温非岩浆热液成矿” (高广立, 1989)、“同生沉积 - 变形叠加成矿” (吴淦国等, 1989)、“喷气 (热液) 沉积成矿” (赵兴元, 1989a)、“岩溶成矿” (胡明安, 1989) 等。

20 世纪 90 年代, 在前期的研究工作基础上, 研究者们从不同角度对金顶矿床以及兰坪盆地又做了大量工作, 取得了重要进展。

尹汉辉等 (1990) 通过对金顶矿床中各种金属硫化物和硫酸盐矿物的硫同位素分析结果表明, 其中硫酸盐矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 +6.30‰ ~ +21.66‰ 之间变化; 金属硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 -1.71 ~ -30.43‰ 之间变化, 与一般陆相砂 (砾) 岩型金属矿床的硫同位素组成一致。硫来源于湖水硫酸盐和与生物有关的有机质硫化物, 没有明显的岩浆硫的加入。矿石铅同位素组成表明矿床不同部位、不

同类型矿石的铅同位素比值十分接近。 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的平均值和离差分别为 18.281、0.09, 15.455、0.09, 38.203、0.233。 μ 值平均为 8.75, 低 μ 值、均匀的铅同位素组成说明铅来源于深部, 成矿过程中没有明显的地壳放射成因铅加入。各类矿石、岩石中矿物包裹体的研究表明, 矿床的形成温度较高。在沉积阶段形成的矿石, 温度在 280 ~ 330℃ 之间, 以至更高。改造阶段形成的矿石基本上在 280℃ 以下。在角砾岩中天青石中包裹体盐度为 14.6%; 砂岩中天青石包裹体盐度为 9.5% ~ 6.6%; 改造阶段形成的矿石的包裹体盐度为 7.4% ~ 7.0%。说明成矿热液具有较高的盐度, 且沉积水体的盐度高于改造阶段热液的盐度。矿物包裹体成分分析结果表明气体成分中富含 CO 、 CH_4 、 CO_2 、 H_2S 、水蒸气等。综合地质、同位素组成、包裹体特征以及与区域构造演化关系等方面分析认为, 金顶铅锌矿是一种独特的具有深源(幔源)物质加入的幔-壳复合成矿作用的产物。

王京彬等(1990) 早先根据所收集的资料与研究, 初步提出了陆相喷流沉积成因的认识。后来对矿石、蚀变围岩和热水沉积岩 REE 的研究表明, 金顶矿床成矿流体的 REE 分布特征为 LREE 高度富集型, 具有不明显的 Eu 异常和清楚的负 Ce 异常。结合同位素及其他微量元素资料, 提出其成矿物质主要来源于富 CO_2 的地幔流体, REE 和部分金属可能是以碳酸配合物的形式搬运的, 成矿溶液为弱碱性。而蚀变过程中 REE 的地球化学特征可作为“金顶式”矿床的一种勘查标志(王京彬等, 1991)。最后综合矿体产状、矿石结构、热水沉积岩、矿床分带及围岩蚀变等方面论证了矿床是热水沉积成因, 并结合现代湖底热水沉积成矿作用明确指出了金顶矿床以产于陆(湖)相环境而有别于一般海底热水沉积矿床, 代表了热水沉积矿床的一个新类型——陆(湖)相碎屑岩容矿的热水沉积矿床或称为“金顶式”矿床。矿床中百余件单矿物(黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、石英、方解石、天青石)爆裂温度集中在 220 ~ 340℃ 之间, 峰值为 300℃, 代表了成矿温度上限。石英、天青石、方解石均一温度集中在 220 ~ 260℃ 之间, 峰值为 240℃, 对架崖山块状闪锌矿石中闪锌矿测定的均一温度(12 件)为 231 ~ 246℃, 因此金顶矿床主要成矿温度为 220 ~ 250℃, 在大部分沉积岩容矿的海底热水沉积矿床的温度范围之内, 同时也进一步表明了金顶矿床是一种热液矿床。

覃功炯等(1991) 根据矿区硫铅锑等同位素、微量元素、含盐建造以及流体包裹体特征, 对形成金顶矿床一系列特殊的成矿背景和成因机理进行论述, 建立了矿床的成因模式。认为金顶超大型铅锌矿床的形成与喜马拉雅期的板块构造活动有关: 是在次一级的陆相断陷盆地封闭时期受推覆-滑覆圈闭, 以滑塌角砾岩和冲积扇粗碎屑岩为容矿岩石, 为深部含矿热卤水与地下水混合而形成的后生层控矿床。矿床的形成又与丰富的有机质、有机硫的产出有关。金顶铅锌矿床成因模式有别于沉积-喷溢(Sedex)型铅锌矿床模式, 也有别于密西西比铅锌矿床(MVT)模式。

高广立(1991) 据 11 个硬石膏样品硫同位素测试结果, $\delta^{34}\text{S}$ 值在 +14.18‰ ~ +15.38‰ 之间, 变化范围很窄, 与三叠纪末期古大洋硫酸盐 $\delta^{34}\text{S}$ 值(15‰) 十分相近。结合其他地质条件, 认为硬石膏岩中岩石角砾不是陆源碎屑, 而是硬石膏岩中的夹层, 在构造运动中碎裂, 由于石膏在压力作用下产生塑性流动, 使岩石碎块发生不同程度位移, 形成角砾状硬石膏岩。

杨友华等(1991) 认为金顶超大型铅锌矿床是在长期活动的地质构造环境、良好的聚矿陆内地堑盆地、喷溢沉积作用的成矿机制、同生断裂的长期活动、有利成矿的岩相及古水文条件、推覆构造的掩埋作用等特定条件下形成的。

陈式房(1991, 1992) 分析金顶矿床铅同位素组成变化范围: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.5430 ~ 18.1383; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.767 ~ 15.352; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 39.046 ~ 37.803。其比值变化不大, 较为稳定。根据源区特征值计算, 结果显示金顶矿区幔源铅约占 40%、壳幔混合铅(含岛弧铅)占 55%、壳源铅约占 5%。幔源铅同位素 H. H 模式年龄为 1 ~ 68 Ma, 平均为 34 Ma, 与区域上喜马拉雅期岩浆活动的时期非常相似。硫同位素测试结果表明硫同位素变化范围很大, 除个别方铅矿($\delta^{34}\text{S}$ 值为 +3.5‰), 黄铁矿($\delta^{34}\text{S}$ 值为 +5.37‰) 为正值, 绝大部分为负值, 分布在 -0.9‰ ~ -30.47‰ 之间。认为以生物成因硫为主、热卤水成因硫为次。结合铅同位素研究, 将金顶铅锌矿床金属硫化物硫同位素分为两组: 第一组, 为早期成岩-交代成矿阶段形成的金属硫化物, 约占矿区金属硫化物量的 77%, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -10.5‰ ~ -30.43‰, 硫源以细菌和有机质还原硫酸盐为主。第二组, 为晚期胶状沉淀阶段以

脉状充填为主的金属硫化物, 约占矿区金属硫化物的 23%, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-9.7\text{‰} \sim +3.5\text{‰}$, 硫源以深源为主。究其同位素表现形式与幔源硫不同的原因, 主要是由于深源含矿溶液进入矿区这样富含生物还原硫的环境而发生了硫同位素动力学分馏或同位素平衡交换所致。

金顶矿床金属硫化物主要来自细菌和有机质对硫酸盐的还原作用, 含矿主岩富含有机质, 而共生石膏矿产在 1 亿 t 以上, 为矿床形成提供了得天独厚的硫源。其次, 硫源系来自深部, 此外, 由闪锌矿、方铅矿交代硫铁矿的现象较为常见, 硫铁矿为铅锌沉凝提供了部分硫源。矿区石膏岩以沉积成因硬石膏为主, 4 件硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+14.59\text{‰} \sim +15.81\text{‰}$, 均值 $+15.07\text{‰}$ 。天青石硫同位素 11 件, $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+11.20\text{‰} \sim +18.79\text{‰}$, 均值 $+13.43\text{‰}$, 分布范围较硬石膏显得稍离散, 而均值则接近, 说明天青石的 SO_4^{2-} 直接来自石膏岩的溶解。金顶铅锌矿床方解石脉的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值多在 $-18.00\text{‰} \sim +24.52\text{‰}$ 之间, 与围岩含沥青灰岩角砾岩相似, 为轻碳同位素, 显示穹隆富含有机质; 部分方解石脉的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-11.88\text{‰} \sim -6.13\text{‰}$, 与含矿围岩不同, 可能为深源碳。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值均在 $-8.26\text{‰} \sim -6.57\text{‰}$ 之间, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 $+21.99\text{‰} \sim +23.31\text{‰}$, 说明成矿溶液曾与围岩发生过氧同位素剧烈交换。而天青石锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.7105 \sim 0.7124$, 判断锶的来源可能与隐伏的火成活动有关。

周维全等 (1992) 对矿区硫酸盐 (石膏、重晶石、天青石) 9 件以及金属硫化物 33 件进行了硫同位素测试。其中硫酸盐的硫同位素变化在 $+18.8\text{‰} \sim -21.6\text{‰}$ 之间, 以正值为主; 金属硫化物的变化在 $-1.8\text{‰} \sim -30.4\text{‰}$ 之间。并认为该矿床硫化物 ^{34}S 的富集顺序为闪锌矿 > 方铅矿 > 黄铁矿 > 白铁矿, 说明硫化物不是在硫同位素平衡交换条件下形成的, 而是形成于不同的成矿阶段。硫同位素组成特征表明硫可能有两个来源: 一是沉积盆地硫酸盐的细菌还原作用形成的沉积硫; 二是热卤水携带的深源硫。

对于铅的来源, 张乾 (1993) 认为金顶矿床存在两种不同的铅同位素组成: 一为组成均一的低 μ 值铅, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $15.252 \sim 15.550$, 铅同位素比值与洋中脊玄武岩一致, 说明该类型的铅可能为上地幔来源的铅; 二为同位素组成变化较大的高 μ 值铅, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值 > 15.6 , 与海洋化学沉积及锰结核铅接近, 为壳源铅。并以此为特点, 探讨金顶矿床的形成可能经历了同生沉积、沉积改造及后期幔源铅叠加成矿作用。

王江海等 (1993) 在前人研究基础上提出了一种新的喷流成因机制以阐明矿床和矿石的时空分布及砂岩型矿石的成矿机理。

罗君烈等 (1994) 研究表明, 金顶铅锌多金属矿床方解石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2, \text{PDB}}$ 值介于 $-24.5\text{‰} \sim -6.1\text{‰}$ 、平均 -18.6‰ , $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2, \text{SMOW}}$ 值相当一致, 介于 $22.4\text{‰} \sim 23.7\text{‰}$, 平均 23.3‰ 。

燕守勋等 (1994) 研究认为, 自东向西的区域性滑覆事件是兰坪盆地古新世重大地质事件之一, 滑覆的区域动力可能也是发育巨厚红层的兰坪盆地内铅、锌、铜等多金属热液矿化的动力; 高孔隙度、低固结度、高钙质的滑塌—冲积物和具有盖层作用的滑覆体的“储、盖”组合条件, 是形成金顶式超大型矿床的重要因素。喜马拉雅 I 幕自西向东的推覆运动, 可能是含多金属的热液再次矿化的又一动力。本次运动形成的弧形构造顶端、背斜核部、逆断层带等, 都是矿化发生的良好部位。上新世末期自南向北的推覆作用所形成的构造形迹对始新世末期自西向东推覆形成的构造形迹的叠加作用, 形成了叠加构造格局。金顶穹隆构造恰是这两期背斜相叠加的产物。其主要控制了矿床形成后的保存状况, 与高原隆升一起, 使矿体遭受强烈剥蚀, 易于发现并适于露天开采。建议今后应注意研究叠加盆地或“鞍”型构造中找寻金顶式超大型矿床的可能性。

朱上庆等 (1995) 研究表明, 金顶矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化极大, 在 $-32\text{‰} \sim +16\text{‰}$ 之间, 峰值在 $-10\text{‰} \sim -22\text{‰}$ 之间。这种硫同位素组成, 显然反映了成矿流体中的硫应具地壳成因。

温春齐等 (1995) 通过对流体包裹体的温度、压力、盐度、密度、成分、氢氧同位素及流体性质等地球化学研究表明, 金顶矿床具有浅成 ($0.91 \sim 1.45 \text{ km}$) 中—低温 ($260 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$)、中—低盐度 ($11.41\% \sim 6.70\%$) 矿化的特点; δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素及流体成分分析表明, 成矿流体源于沉积盆地热卤水和古大气降水的混合, 部分源于深部。从热卤水矿化的早期到晚期, 随着古大气降水的加入,

流体的温度 (T), 压力 (P) 和 $\delta^{34}\text{S}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 f_{O_2} 、 f_{CO_2} 、 f_{S} 值均具降低趋势, 而 pH、Eh 值略有增大。

胡瑞忠等 (1998b) 对金顶铅锌矿床成矿阶段形成的黄铁矿中流体包裹体的氦、氩同位素的研究结果表明, 成矿流体的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 $301.7 \sim 385.7$, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.03 \sim 0.06 \text{ Ra}$, 成矿流体属于饱和空气的表生水。在此基础上, 对氦、氩、硫、铅同位素耦合关系的研究进一步确定出该矿床成矿流体的形成演化过程为: 饱和空气的大气成因地下水下渗增温→通过水-岩作用从盆地地层中获取硫和氯以及放射成因的氦和氩→浸取盆地底部幔源火成岩中的铅和锌→含矿流体回返上升成矿。由于这一过程的结果, 而使成矿流体留下了地壳放射成因氦、(叠加有部分放射成因 ^{40}Ar 的) 大气氩、地壳成因硫和幔源铅的同位素组成特征。

薛春纪等 (1999) 把金顶和新发现于其北 30km 的白秧坪多金属矿床作为一个矿带, 通过对成矿主期成矿热液矿物内原生流体包裹体的 He、Ar 同位素研究, 发现成矿流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值高达 2.7×10^{-6} (变化于 $0.19 \sim 1.97 \text{ Ra}$ 之间), $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}$ 值 ($0.24 \sim 3.12$) 接近地幔特征值, 表现出明显的壳幔混合 (地幔 He 所占比例高达 32%) 特征。深部作用明显参与了成矿。地幔成矿流体很可能沿大型构造上升并与盆地流体混合导致成矿。

朱上庆等 (2000) 指出有迹象表明地幔流体参与了金顶矿床的成矿作用。

综合该阶段的研究, 主要集中在兰坪-思茅盆地演化深部控制因素研究指出盆地内存在幔-壳复合成矿作用 (尹汉辉等, 1990), 矿床 REE 地球化学指示成矿物质可能来源于富 CO_2 的地幔流体 (王京彬等, 1991), 矿床属于“层控后生型” (覃功炯等, 1991), 铅同位素组成反映硫化物矿石铅主体为幔源铅 (周维全等, 1992; 张乾, 1993), 认为矿床具有“同生沉积—沉积改造—后期幔源铅叠加”的复杂形成过程 (张乾, 1993; 叶庆同等, 1992); 部分研究者把金顶矿床理解为“陆相热水沉积”成因 (王京彬等, 1992; 罗君烈等, 1994; 王江海等, 1998), 认为大气成因地下水萃取盆地地层 (特别是三叠系火山岩) 中金属形成的含矿流体沿断裂上升到地表同生沉积成矿 (罗君烈等, 1994; 王江海等, 1998; 温春齐等, 1995; 胡瑞忠等, 1998); 同期的研究还提出成矿卤水在成岩过程中沿大断裂向上移动, 矿质通过交代碳酸盐岩地层和断层附近的沉积物质, 沉淀成巨大的矿床 (Li, 1998)。惰性气体同位素地球化学示踪在金顶矿区成矿流体中发现地幔流体 (薛春纪等, 1999; Xue et al., 2000)。

在前人的研究基础上, 近年来新的研究发现主要包括以下几个方面:

1.2.1 流体包裹体地球化学、微量元素地球化学及同位素地球化学研究

1.2.1.1 流体包裹体、微量元素及碳-氧同位素地球化学

薛春纪等 (2002d) 在对兰坪盆地金顶、白秧坪矿床翔实矿相学和流体包裹体研究的基础上, 分析了热液成因方解石 O、C 同位素组成和流体包裹体内 CO_2 的碳同位素组成。成矿主阶段热液方解石氧、碳同位素组成 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = -2.5\text{‰} \sim +5.5\text{‰}$, 平均 0.2‰ ; $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -0.0 \sim -0.6\text{‰}$, 平均 $+1.9\text{‰}$) 与超基性—基性岩浆、火成碳酸岩及地幔岩包体的相应值重合或接近; 成矿主阶段热液天青石流体包裹体内 CO_2 的碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -20.0\text{‰} \sim -2.2\text{‰}$, 平均 -10.4‰) 部分样品具有幔源 CO_2 特点。成矿主阶段之后与粗晶自形黄铁矿、方铅矿及天青石、石膏共生的方解石 O、C 同位素组成 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = +19.4\text{‰} \sim +22.6\text{‰}$, 平均 $+20.8\text{‰}$; $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -8.1\text{‰} \sim +2.7\text{‰}$, 平均 -4.5‰) 反映晚阶段流体主要起源于沉积地层和大气水。后又在流体包裹体显微冷热台系统观测基础上, 通过显微激光拉曼探针揭示出兰坪中-新生代盆地内金顶及外围矿床成矿主阶段原生流体包裹体含烃富 CO_2 , 成分变化大。流体成分的耦合关系研究, 并配合 O、C 同位素分析认为成矿流体中部分 CO_2 来自地幔, 部分是沉积地层中碳酸盐岩和有机质分解成因, H_2O 和烃主要起源于大气成因盆地卤水和地层有机质。地幔源 CO_2 对贱金属元素的搬运可能贡献突出, 而烃类对金属元素的沉淀意义重大 (薛春纪等, 2002a)。成矿流体成分具有幔源 (富 CO_2 和金属元素) 和壳源 (盆地流体富烃类和

H₂O) 两种流体混合的特征, 推测幔源成矿流体升至地壳与盆地卤水混合可能是大规模基本成矿方式。

薛春纪等 (2003) 对金顶及其外围的白秧坪矿床成矿主阶段热液矿物 (黄铁矿、闪锌矿、天青石及重晶石) 内流体包裹体 He、Ne、Xe 同位素的研究表明, 大规模成矿主阶段流体的惰性气体同位素组成及演化显示成矿流体中混有 2% ~ 32% 的地幔 He ($^3\text{He}/^4\text{He} = 0.19 \sim 1.97 \text{ Ra}$), 50.1% 的地幔 Ne ($^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 10.45 \sim 10.83$, $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 0.03$) 以及显著的地幔 Xe ($^{129}\text{Xe}/^{130}\text{Xe} = 5.84 \sim 6.86$, $^{134}\text{Xe}/^{130}\text{Xe} = 2.26 \sim 2.71$), 地幔流体具有重要成矿意义。金顶矿区 4 件黄铁矿 Re-Os 法等时线年龄 $72 \pm 4.4 \text{ Ma}$, 最小 67 Ma; 白秧坪金属成矿作用开始时强硅化作用形成的石英 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测定坪年龄 $62.78 \pm 0.60 \text{ Ma}$, 代表了热液硅化石英形成, 即开始成矿的年龄, 主阶段成矿年龄稍晚 (60 Ma), 与金顶的接近, 都晚于矿化主岩, 与喜马拉雅期幔源和壳-幔源碱性岩浆活动开始的时间 (68 Ma) 一致。地幔流体或随岩浆活动或沿穿壳断裂系统上至地壳并与大气成因盆地卤水混合是大规模成矿基本方式。

王彦斌等 (2004) 对金顶铅锌矿床成矿阶段形成的热液矿物中原生流体包裹体的 He、Ar 同位素研究结果表明: 成矿流体的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $0.19 \sim 1.02 \text{ Ra}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值为 274 ~ 305 单位, 成矿流体中可能含有地幔 He。

李春辉等 (2011) 对跑马坪矿段和架崖山矿段中成矿主阶段热液矿物成矿主阶段热液矿物黄铁矿和天青石体的流体包裹体内 He 和 Ne 同位素进行研究, 结果表明 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值变化较大, 在 $0.04 \sim 0.82 \text{ Ra}$ 之间, 除一件样品外均高于地壳特征值, 而又明显低于地幔特征值, 说明地壳流体参与成矿的作用是客观存在的, 且有较大贡献。 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 值除一件样品 (17.82) 外, 其余为 $10.57 \sim 10.93$, 较为集中, 高于饱和大气 $^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 值 ($^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 9.8$) 和地壳 Ne 同位素组成 ($^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 0 \sim 0.3$), 接近于地幔流体端元同位素组成 ($^{20}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 9.8 \sim 13.2$); $^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne}$ 值除一件样品 (0.05) 外, 其余均为 0.03, 明显低于饱和大气同位素组成 ($^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 0.29$) 和地壳同位素组成 ($^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 0.1 \sim 0.47$), 而与地幔同位素组成接近 ($^{21}\text{Ne}/^{22}\text{Ne} = 0.058 \sim 0.068$)。说明在矿物包裹体形成过程中受到了明显的大气降水以及地壳流体的影响。由此可见, 稀有气体 He 和 Ne 的同位素组成在不同程度上显示含矿流体的幔源特征的同时, 表现出强烈的地壳特征。

唐永永等 (2011a) 以金顶铅锌矿床成矿早期脉状方解石和晚期结核状方解石为研究对象, 系统开展了微量元素流体包裹体和碳-氧同位素地球化学研究, 在此基础上探讨了该矿床成矿流体的性质和可能的来源。研究发现, 流体包裹体均一温度分布范围为 $54 \sim 370 \text{ }^\circ\text{C}$, 大体上呈现出 4 个峰, 分别是 $80 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $120 \sim 140 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $170 \sim 210 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $250 \sim 280 \text{ }^\circ\text{C}$ 。前 3 个均一温度峰值代表了热液成矿 3 个阶段的温度 (薛春纪等, 2002c)。而本书揭示了 $250 \sim 280 \text{ }^\circ\text{C}$ 均一温度峰值的存在, 包裹体主要是有机包裹体, 其寄主矿物为天青石、方解石。虽然 2 种产状方解石都以轻稀土富集轻重稀土显著分异配分模式向右陡倾为特征, 并且具有相似的 Mg、Fe 和 Mn 含量, 但它们在微量元素流体包裹体和碳-氧同位素地球化学特征上亦存在显著差异脉状方解石相对于结核状方解石稀土元素总量较高, 富集 Co、Ni、(W)、Mo、Bi; 脉状方解石流体包裹体显示相对高温高盐度的特征 ($T_h > 250 \text{ }^\circ\text{C}$, 盐度 $> 8.0\%$), 而结核状方解石流体包裹体相对低温低盐度 ($T_h < 200 \text{ }^\circ\text{C}$, 盐度 $< 8.0\%$); 脉状方解石的碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -22.95\text{‰} \sim -2.56\text{‰}$) 较分散, 具有多源性, 而结核状方解石碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -7.02\text{‰} \sim -6.18\text{‰}$) 相对集中, 两者的氧同位素组成 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = +20.16\text{‰} \sim +23.49\text{‰}$) 与沉积岩类似综合分析认为, 金顶铅锌矿成矿期脉状和结核状方解石虽然均属热液成因, 但它们分别代表了两类不同性质的热液体系, 早期成矿流体为多源的混合流体, 成矿过程中可能有深源组分的加入, 而晚期成矿流体以大气降水为主。金顶铅锌矿应为“壳幔流体混合成矿”。

唐永永等 (2013a) 对该矿床主矿化期和矿化后期方解石进行了系统的碳、氧、锶、铅同位素分析, 结果表明, 主矿化期脉状方解石碳同位素变化范围大 ($\delta^{13}\text{C} = -23.0\text{‰} \sim -2.6\text{‰}$), 显示有机沉积物与海相碳酸盐岩混合碳的特征, 氧同位素相对集中 ($\delta^{18}\text{O} = 22.1\text{‰} \sim 23.5\text{‰}$), 类似于沉积岩, Sr 含量较高 ($\text{Sr} = 163 \times 10^{-6} \sim 1920 \times 10^{-6}$), 富放射成因锶 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.709860 \sim 0.710362$); 而矿