

云南金顶铅锌矿床云龙组内碳酸盐岩构造岩片的演化与成矿系统探讨

张金学¹, 罗洪昌¹, 梅朴莲¹, 杨元珍²

¹云南省有色地质局三一〇队, 云南 大理

²云南金鼎锌业有限公司, 云南 兰坪

Email: 1286010953@qq.com

收稿日期: 2021年2月1日; 录用日期: 2021年3月10日; 发布日期: 2021年3月18日

摘要

笔者以金顶铅锌矿床古新统云龙组内“碳酸盐岩构造岩片”为主要对象, 从的成矿构造地质背景、矿区推覆造系统和穹窿构造系统的演化以及相伴的成矿系统等方面论述了矿床的复合成矿过程。提出金顶铅锌矿床云龙组内碳酸盐岩系是始新世由推覆楔入的三叠系上统三合洞组碳酸盐岩构造岩片, 经复合造山作用演化的不同阶段形成不同类型、不同成因的角砾岩构造组合。在矿区逆冲推覆构造系统演化过程中三合洞组灰岩为能干岩层, 前锋带容易形成“楔状岩片”楔入到云龙组非能干岩层中。晚渐新世-中新世兰坪盆地转入走滑拉分盆地演化阶段, 在大规模的剪切走滑背景下伴随南北向挤压推覆以及盐丘底辟作用, 推覆系组与原地系组融合形成穹窿构造系统, 云龙组内碳酸盐岩构造岩片再次应变, 并经过膏溶坍塌、砂岩灌入体和水力压裂构造等作用的叠加改造复合成矿, 主要矿化样式叠加有推覆构造型、盐丘构造型、层间断裂带热液脉型等。金顶铅锌矿床云龙组内碳酸盐岩角砾岩为经推覆构造→穹窿构造→膏溶构造→后期岩溶改造等形成的一套特殊多成因角砾岩组合。

关键词

成矿系统, 构造演化, 碳酸盐岩构造岩片, 云龙组, 金顶铅锌矿床

Evolution and Metallogenic System of Carbonate Tectonic Slices in the Unryu Formation of Jinding Pb-Zn Deposit, Yunnan Province

Jinxue Zhang¹, Hongchang Luo¹, Pulian Mei¹, Yuanzheng Yang²

¹Yunnan Provincial Bureau of Nonferrous Geology Team 310, Dali Yunnan

文章引用: 张金学, 罗洪昌, 梅朴莲, 杨元珍. 云南金顶铅锌矿床云龙组内碳酸盐岩构造岩片的演化与成矿系统探讨[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(3): 257-269. DOI: 10.12677/ag.2021.113022

²Dept. Yunnan Jinding Zinc Industry Co., Ltd., Lanping Yunnan
Email: 1286010953@qq.com

Received: Feb. 1st, 2021; accepted: Mar. 10th, 2021; published: Mar. 18th, 2021

Abstract

The main object of this paper is “carbonate tectonic slices” in the Palaeocene Yunlong formation of the Jinding lead-zinc deposit, the complex mineralization process of the deposit is discussed in terms of its tectonic setting, the evolution of nappe system and Dome Structure System, and the associated metallogenic system. It is suggested that the carbonate rocks in the Unryu formation of the Jinding lead-zinc deposit are tectonic slices of carbonate rocks in the upper triassic Sandong formation of the Eocene, wedged by NAPPE, bRECCIA tectonic assemblages of different types and origins were formed in different stages of the evolution of composite orogeny. During the evolution of the thrust nappe structural system in the mining area, the limestone of the Sanhe Cave formation is a capable rock stratum, and the front zone is easy to form “wedge-shaped rock slices” and wedge into the non-capable rock stratum of the Unryu formation. The late oligocene-miocene Lanping Bai and Pumi Autonomous County basin turned into a strike-slip pull-apart basin evolution stage, accompanied by north-south compressional Nappe and Salt Dome diapir under the large-scale Shear strike-slip background, the tectonic slices of carbonate rock in Yunlong formation are re-strained, and the composite ore-formation is formed by superimposition and reformation of gypsum solution collapse, sandstone infilling body and hydraulic fracturing structure, the main mineralization styles superimposed are nappe structure, Salt Dome Structure, interlayer Fault Zone hydrothermal vein type and so on. The carbonate Breccia in the Unryu formation of Jinding lead-zinc deposit is a set of special multi-genetic breccia assemblage formed by nappe structure, dome structure, gypsum dissolution structure and later karstification.

Keywords

Metallogenic System, Tectonic Evolution, Carbonate Tectonic Slices, Unryu Formation, Jinding Lead-Zinc Deposit

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

金顶超大型铅锌矿床一直是地学界理想的天然课堂之一，在众多地学工作者的接力探索中积累了丰富的研究资料。关于矿床主要含矿岩石之一“云龙组内碳酸盐岩角砾岩”的成因机制，长期存在着分歧，也是争论的焦点之一。归纳起来，主要有两种成因观点：一是同生沉积成因，认为矿区云龙组地层(Ey)受沱江同生断层控制，云龙组外来推覆体转换成滑覆体作为云龙组中的碎屑沉积物，原地含矿系统是由滑塌角砾岩与冲积粗碎屑岩相构成的[1] [2] [3] [4]；二是认为矿区新生代推覆构造发生在云龙组后，云龙组内碳酸盐岩为推覆构造楔入的构造岩片，灰岩角砾岩为膏溶垮塌、底辟侵位等构造成因[5] [6] [7] [8] [9]。金顶矿床中见有大量角砾岩类型繁多，成分复杂、成因多样，难于用单一来源解释，随着研究工作的不断深入，云龙组内灰岩角砾岩为构造岩片经多期次构造演化具复合特殊成因观点，被越来越多的研

究者所认同。本文在梳理前人研究成果的基础上,以2018~2019年度生产勘探项目为依托,围绕云龙组内碳酸盐岩构造岩片,结合地质填图、坑道与钻探编录等基础地质工作,以复成矿系统理论为指导,以新生代盆地演化及相伴成矿系统为主线,以厘定矿区推覆构造的时代为重点,尝试将以往从不同角度分散的研究成果融入构造岩片演化与成矿系统,为推进上述地质问题的探索做出努力。

2. 区域地质背景

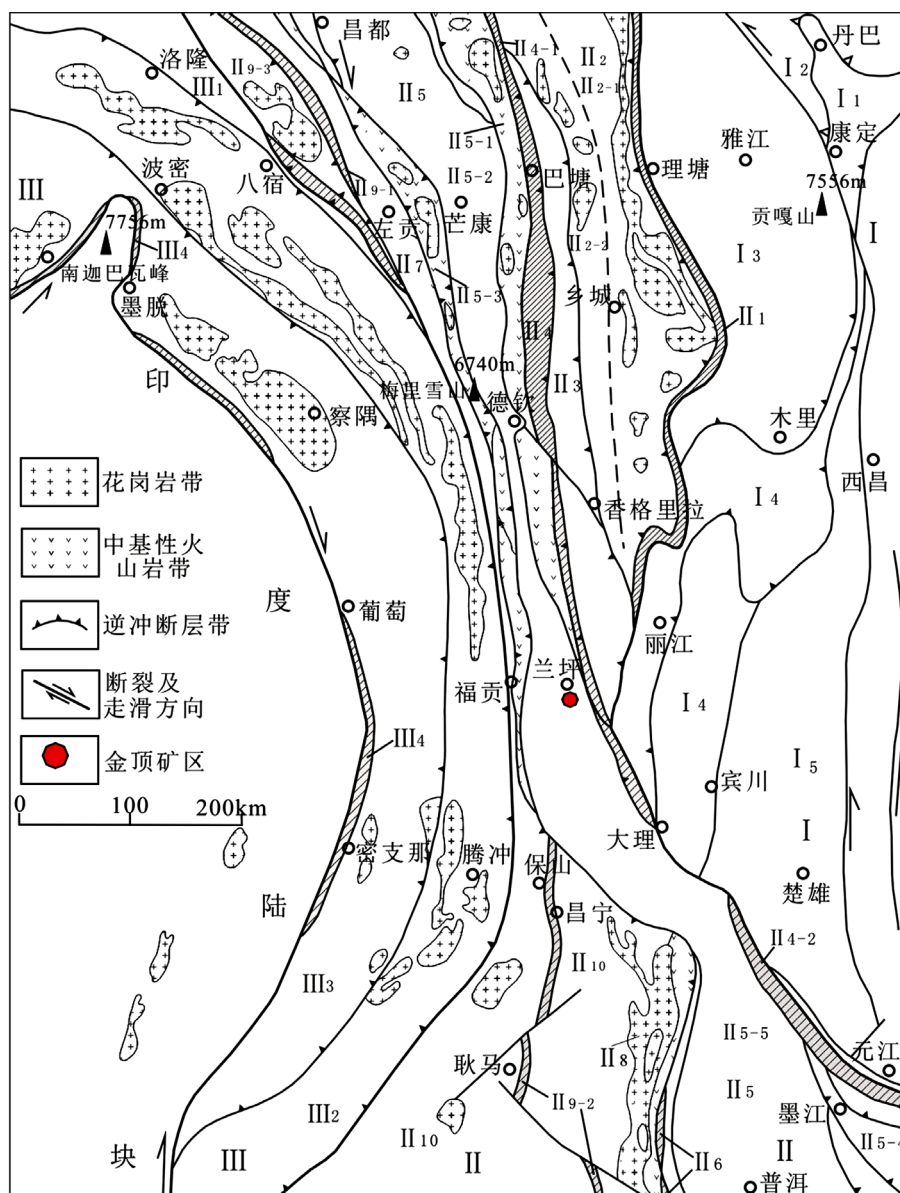
兰坪金顶铅锌矿床大地构造位于羌塘-三江造山系昌都-兰坪-思茅地块之兰坪-普洱双向弧后前陆盆地北端,隶属于特提斯-喜马拉雅构造域。兰坪盆地处于冈瓦纳大陆与华夏古陆接合地带,北起维西,南至云县,与思茅盆地相接,东以金沙江断裂为界与扬子陆块西南缘的金沙江-哀牢山造山带相邻,西以澜沧江断裂为界与藏滇板块北东缘的碧罗雪山-崇山造山带相邻,中部还有兰坪-思茅中轴断裂,具有大规模有效沟通地幔的盆地动力机制[10][11][12](图1)。

受古-新特提斯及新生代欧亚-印度板块碰撞等过程影响影响,三江造山带构造格架经历多期继承、复合、改造和重置过程,复合造山作用突出[14]。兰坪盆地具有复杂演化历史,富集了众多重要成矿类型和成矿过程构成了如今复杂的复合成矿系统。从早奥陶世,昌宁-孟连和金沙江-哀牢山古特提斯洋开启,思茅地块从华夏古陆分离出来。海西末期(P_2-T_1),古特提斯洋封闭,使本区与扬子板块和藏滇板块的保山陆块相互拼接,构成了北部劳亚大陆的一部分,兰坪盆地开始演化[15]。自中生代早期以来,三江地区经历了印支期东西向挤压、燕山期东西向拉张和喜马拉雅早期(早第三纪晚期)东西向挤压、喜马拉雅晚期东西向拉张的大规模构造运动,铸就了现今以南北向褶皱、断裂和堑沟构造为主体,并有近东西向构造与其复合的构造格局[5]。古新世-早渐新世受印度-亚洲大陆对接碰撞的影响,盆地两侧的中生代地层作为构造岩片,由盆地两侧向中央推进,推覆于古近系地层之上,形成近平行的东、西两大逆冲推覆构造系统,分别为东部的金沙江造山带和西部的澜沧江造山带[16]。

盆内出露地层主要为中上三叠统、侏罗系、白垩系和第三系,区内缺失下三叠统[17]。兰坪中新世代盆地广泛发育盐岩层系,中、上三叠统三合洞组普遍发育以硫酸盐为主蒸发岩建造,局部达到石盐沉积阶段,如云龙县的宝丰乡和兰坪县的马登乡、河西乡及洱源乔后盐矿等地;中、上侏罗统膏盐沉积主要沿澜沧江东侧展布,如兰坪县阿尼戛、大华,永平四角田等地;上白垩统-古新统盐系分布较广,石盐矿床、矿点及盐泉、卤井随处可见,且岩盐储量丰富,已经开采的有兰坪的拉井镇、乔后等地。研究区盐岩层系具有多期、多阶段运动的特点,厚度分布极不均一,它们作为区域推覆构造作用的滑脱层,对盐上层构造变形起着重要控制作用,形成一系列储矿构造[10]。侏罗系中统一白垩系上统灰绿色灰质砂岩是其中突出的标志,常见含植物碎屑、黄铁矿星点及孔雀石薄膜,是滇西地区一个重要含铜砂岩类型铜矿的赋存层位。在新生代陆陆碰撞造山背景下,复合造山驱动了复合成矿系统形成金顶超大型铅锌矿床。

3. 兰坪盆地新生代构造演化与成矿系统

进入新生代,古新-始新世印度板块与欧亚板块碰撞,兰坪盆地发展为前陆盆地,晚渐新世以来,印度板块继续发生NNE向推挤,三江地区进入挤压走滑阶段,盆地发展为走滑拉分盆地[18][19][20]。青藏高原大陆碰撞造山具有主碰撞(65~41 Ma)、晚碰撞(40~26 Ma)和后碰撞(25~0 Ma)三阶段连续演化模式[18]。西南特提斯碰撞造山新生代构造演化划分为挤压褶皱期(>45 Ma)、拆沉伸展期(44~32 Ma)、挤压走滑期(31~13 Ma)、伸展旋扭期(12~0 Ma)四期交替式演化过程,构造应力环境依次以挤压、伸展、压扭和张扭为特征[14][21]。在不同时期构造环境作用下,在矿田与矿床范围内形成了复杂多样的叠加成矿作用[22]。兰坪盆地发育3个与碰撞造山盆地有关的Pb-Zn-Cu-Ag-Au-Sb-Hg成矿系统,1)中低温热液脉型Cu-Ag多金属成矿系统,以金满-连城铜钼矿床为代表;2)浅成低温热液Sb-Au-Hg-As多金属成矿系统,以笔架山锑矿床为代表;3)密西西比河谷型Pb-Zn多金属成矿系统,以金顶超大型铅锌矿床为代表[16]。



I—扬子陆块：I₁—龙门山逆冲带，I₂—巴颜喀拉前陆盆地，I₃—雅江残余盆地，I₄—盐源—丽江陆缘拗陷带，I₅—楚雄前陆盆地；II—三江多岛弧盆地：II₁—甘孜—理塘结合带，II₂—德格—乡城岛弧(义敦岛弧)：II₂₋₁—雀儿山—稻城外弧带，II₂₋₂—结古—义敦弧后盆地，II₃—中咱—香格里拉地块；II₄—金沙江—哀牢山结合带：II₄₋₁—金沙江蛇绿混杂带，II₄₋₂—哀牢山蛇绿混杂带，II₅—昌都—普洱地块：II₅₋₁—江达—几家顶—维西陆缘火山弧，II₅₋₂—昌都—芒康双向弧后前陆盆地，II₅₋₃—杂多—东达山陆缘火山弧，II₅₋₄—墨江—绿春陆缘火山弧，II₅₋₅—兰坪—普洱双向弧后前陆盆地，II₅₋₆—云县—景洪晚陆缘火山弧；II₆—澜沧江结合带；II₆—左贡地块；II₈—临沧岩浆弧；II₉—班公湖—怒江—昌宁—孟连结合带：II₉₋₁—班公湖—怒江结合带，II₉₋₂—昌宁—孟连结合带，II₉₋₃—嘉玉桥残余弧带，II₁₀—保山地块；III—冈底斯—高黎贡山—腾冲弧盆地：III₁—沙丁—洛隆弧前盆地，III₂—波密—腾冲岩浆弧，III₃—下察隅岩浆弧，III₄—雅鲁藏布江结合带。

Figure 1. The geotectonic zoning map of the “three rivers” (South Section) area in the southwest (adapted from data [13])

图 1. 西南“三江”(南段)地区大地构造分区图(据资料[13]改编)

3.1. 前陆盆地阶段

古新世—始新世印度板块与欧亚板块碰撞，三江地区进入挤压褶皱和拆沉伸展期(65~32 Ma)，兰坪

盆地演化为以发育褶皱-逆冲构造和挤压构造为特点的新生代前陆盆地阶段。印度板块向东移动, 扬子板块向西挤压, 兰坪盆地受到金沙江造山带与澜沧江造山带的双向挤压, 从而形成对冲推覆构造, 使得盆地巨厚的中、新生代地层强烈褶皱, 三叠系-侏罗系逆冲到古新统和渐新统之上, 以始新统宝相寺组和渐新统金丝厂组磨拉石砾岩为前陆盆地的代表岩石[18] [19] [23] [24]。在盆地以北德钦燕门至白济汛一带, 对冲推覆构造甚至将盆地完全覆盖, 东部中生代地层大规模向西逆冲推覆, 形成众多的倒转地层或飞来峰。自中三叠世至始新世末期兰坪盆地共形成了厚达 2 万余米的红层建造, 地层间不存在明显角度不整合, 以整合及平行不整合相接触, 表明其间不存在明显的褶皱运动; 盆地沉积层序资料反映古新统果朗组碎屑岩与其上覆始新统宝相寺组碎屑岩呈区域不整合接触, 表明兰坪盆地西部逆冲-推覆构造的活动时代晚于古新统(~53.0 Ma), 强烈的褶皱运动发生在始新世末, 席卷整个滇西, 使红层强烈褶皱[25]。

挤压褶皱阶段与推覆系统相伴成矿系统主要为以盆地西缘的金满-连城铜钼矿、白秧坪西矿带李子坪铅锌矿、水泄铜矿和盆地东缘的老群山-菜子地铅锌矿、剑川文华铅锌矿等为代表的一系列中低温热液脉型 Cu-Zn-Pb-Ag 矿床。白秧坪西矿集区 Pb-Zn-Ag-Cu 多金属矿床受逆冲断裂平行的次级断裂系统控制, 主要沿逆冲断层破碎带填充展布[16]。该成矿系统成矿年龄主要集中于古新世-早始新世(63.0~46.0 Ma)(表 1)。薛春纪等, 获得金顶矿区景星组钙质砂岩黄铁矿 Re-Os 法等时年龄 72 ± 4.4 Ma, 与喜马拉雅期慢源和壳慢源碱性岩浆活动开始的时间(68 Ma)一致。脉状热液脉型 Cu-Ag 多金属矿床的成矿时代晚于逆冲推覆系统的起始时间, 大于 53 Ma 很可能为其他热液事件的年龄。金顶、白秧坪、金满矿床金属矿物的铅同位素组成总体显示壳-幔混合铅的特征, 反映了板内构造体制下的深大断裂和岩浆活动、地幔流体上涌、地层中不整合及壳幔相互作用等所体现的大陆地壳强烈运动是成矿基本地质背景, 本阶段成矿受构造控制[31]。

兰坪前陆盆地西侧发育有古近纪-早始新世与大陆汇聚有关的岩浆岩(65~45 Ma), 东侧发育有中始新世-早渐新世(45~32 Ma)与岩石圈拆沉有关的岩浆岩[16] [21] [41]。其中拆沉伸展期(44~32 Ma)在兰坪盆地的南部巍山-永平县地区分布有浅成低温多金属矿床, 包括展布有莲花山、扎村 Au 矿、笔架山 Sb 矿等低温热液型矿床/矿点, 成矿年龄集中在 34.11~38.7 Ma(表 1)。下地壳拆沉作用的结果, 导致兰坪盆地地下有一个热的上隆区, 对盆地内的流体起到热机的作用[42]。

3.2. 走滑拉分盆地

晚渐新世-中新世(32~10 Ma)碰撞造山过程中构造体制转换, 三江地区处于挤压走滑阶段。晚渐新世以来, 印度板块继续发生 NNE 向推挤, 同时太平洋俯冲使扬子陆块向西推进, 导致三江地区各微地块发生顺时针旋转与南东向逃逸, 形成了大规模 NNW 向断裂走滑, 如红河和高黎贡断裂等以大型右行走滑断裂, 盆地分化为多个走滑拉分盆地[14] [16] [20] [23] [43]。

崇山剪切断裂带内糜棱岩 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄为 28.3 ± 0.1 Ma、 31.5 ± 0.2 Ma [44]。哀牢山-红河断裂带糜棱岩 Ar/K 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 的年龄值 30~20 Ma, 反映了大规模的剪切活动发生在渐新世和中新世之间[45]。在 26.5°纬线附近的兰坪-鹤庆产生近东-西构造带, 可能是碰撞挤压环境下, 深部物质向东南方向“逃逸”而引发浅部伸展构造或老构造的再活化, 产生裂谷构造[46]。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, 并伴随始新世至渐新世期间的热隆成拱作用形成了金顶穹隆构造[15] [47]。有研究认为近东西向构造所切割的最新的地质层为始新统宝相寺组, 并被渐新世地层所覆盖, 说明区域上东西向构造的拉张或伸展大约形成在区域大规模挤压缩短的峰期大约 33~34 Ma [6] [7] [48]。沿近东西向构造侵位的卓潘和大理正长斑岩分别获得 34 Ma 和 30.8 Ma [49]的年代学数据为此提供了佐证, 同时也暗示进入渐新世近东西向的垂向构造仍然继续活动[7]。

Table 1. The metallogenic system of CENOZOIC Lanping Bai and Pumi Autonomous County Basin represents ore deposits
表 1. 新生代兰坪盆地成矿系统代表矿床情况表

演化阶段	成矿系统	矿床/矿点	矿种	围岩	年龄及方法
前陆盆地阶段	中低温热液脉型 Cu-Zn-Pb-Ag 矿床	金满-连城	Cu-Mo	开左组紫红色砂岩、泥岩、砂板岩	石英 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 58.1 $\pm$ 0.5 Ma [26]; 方解石 Sm-Nd 58.2 $\pm$ 5.3 Ma [27]; 辉钼矿 Re-Os 47.8 $\pm$ 1.8 Ma [28]、48.14 $\pm$ 0.87 Ma [27]; 磷灰石裂变径迹 46.1 $\pm$ 5.8 Ma [29]
		李子坪	Pb-Zn	Pb-Zn 中侏罗统花开左组泥岩、泥灰岩	$^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄 55.9 $\pm$ 0.3 Ma [30]; 62.8 $\pm$ 0.6 Ma [31]
		菜子地	Pb-Zn	上三叠统三合洞组灰岩	石英 ESR 分析 59 Ma [32]
		水泄	Cu	上三叠统麦初箐组砂岩	石英 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 59.2 $\pm$ 0.8 Ma [33]
		金顶	Pb-Zn	白垩系景星组钙质砂岩	黄铁矿 Re-Os 72 $\pm$ 4.4 Ma [31]、65 $\pm$ 10.0 Ma [34]
前陆盆地阶段	低温热液 Sb-Au-Hg-As 矿化	永平卓潘		辉石正长岩	黑云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 36.70 Ma [35]
		莲花山	Au	石英二长斑岩	钾长石 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 38.81 Ma [35]; 锆石 U-Pb 34.11 $\pm$ 0.36 Ma [36]
		扎村	Au	麦初箐组石英砂岩、粘土岩	中伊利石 K-Ar 38.7 $\pm$ 0.6 Ma [37]
走滑盆地阶段	MVT Pb-Zn 型矿床	金顶	Pb-Zn	云龙组灰岩角砾岩、上三叠统灰岩角砾岩	磷灰石裂变径迹 21.0 $\pm$ 3.8 Ma、22.3 $\pm$ 4.4 Ma、28.7 $\pm$ 2.8 Ma、32.1 $\pm$ 5.1 Ma [16] [29] [38]
		燕子洞	Pb-Zn-Cu-Ag	三合洞组白云岩 (Pb-Zn)、古近系砂岩 (Cu)	磷灰石裂变径迹 19.9 $\pm$ 2.3 Ma [39]
		白秧坪(吴底厂和李子坪、富隆厂)	Pb-Zn	景星组细砂岩、粉砂岩	闪锌矿 Rb-Sr 29.002 $\pm$ 0.034 Ma、方解石 Sm-Nd 29.9 $\pm$ 1.1 Ma [40]

走滑拉分盆地阶段发育一系列 MVT Pb-Zn 矿床主要分布于金顶矿区及白秧坪东矿带,是金顶铅锌矿床的主成矿系统。三江地区东缘发育大规模的走滑和块体旋转,形成一系列走滑断裂系统,导致逆断层张开而形成低压区,从而使得深部的成矿流体得以沿其侧向和向上流动[14]。世界上 MVT 型铅锌矿床多形成于前陆盆地演化的碳酸盐岩台地和大陆伸展环境中,成矿地质体为碳酸盐岩盆地和陆内裂谷环境中含卤水盆地与同期构造的复合[50]。结合区域地质和热事件分析,金顶成矿时代应该在 21~32 Ma 之间[7] [34]。在弯隆构造形成时,推覆面再次产生滑动,尤其是砂岩中的滑动面易形成破碎带和剥离带,造成有利矿液运移和沉淀的物理环境[5]。在白秧坪东矿集区华昌山断裂控制河西、东至岩、下区吾、燕子洞和三山等一系列 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床,矿体出现在断裂带内及两侧的裂隙发育部位[51]。获得成矿年龄数据为 29.5 $\pm$ 1.7 Ma,与研究区其他 MVT Pb-Zn 成矿系统矿床年龄比较吻合[16] [40]。

伸展旋扭期(12~0 Ma)拉伸作用引发三江地区裂陷,系列 NE 向断裂发生左行张扭性活动,地壳物质顺时针旋扭。三江褶皱带内伸展旋扭期成矿系统主要包括:1) 热泉型 Au 成矿系统,发育于腾冲地块和

思茅地块西侧临沧地区, 包括两河 Au 矿床、勐满 Au 矿床等; 2) 盆地热卤水型稀有金属成矿系统, 发育于思茅地块西侧临沧地区, 如大寨、中寨 Ge 矿床等; 3) 红土型 Co-Ni-(Au)成矿系统, 发育于哀牢山缝合带与临沧地区等, 如墨江 Au-Ni 矿床、勐满红土型 Au 矿床等。兰坪盆地金顶矿区同位素测试研究中曾出现模式年龄小于 5 Ma 的粗晶方铅矿样品[52]。

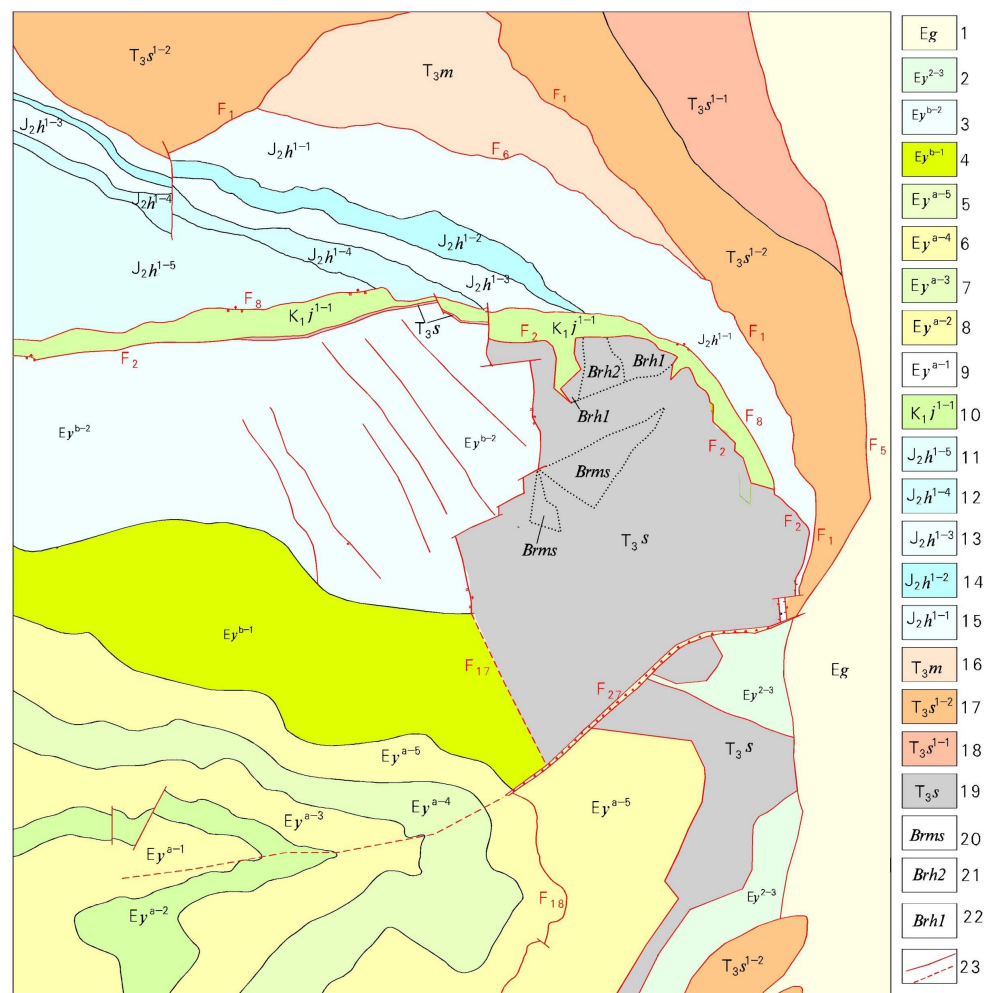
4. 金顶铅锌矿床地质特征

矿区位于高坪-老母井向斜东翼, 沱江大断裂西侧, 金顶铅锌矿区最突出的构造是逆冲推覆构造和穹窿构造, 在成矿过程中扮演了重要的角色。直接影响着热卤水成矿所需的良好“储”、“盖”组合条件的形成与保存。逆冲推覆构造是兰坪盆地古新世云龙期以后区域大型推覆构造的组成部分, 在矿区表现为以 F_2 逆冲推覆构造为主及与之相平行的其他逆冲推覆断层[47]。

矿区出露地层可分为外来系统及原地系统两部分: 外来系统由三叠系上统海陆交互相沉积歪古村组(T_{3w})红色粗碎屑岩建造、三合洞组(T_{3s})台地边缘浅滩相碳酸盐、挖鲁八组(T_{3wl})黑色细碎屑岩建造、麦初箐组(T_{3m})灰黑色细碎屑岩建造和中侏罗系统花开佐组下段(J_2h^1)炎热干旱陆相河湖环境下紫色细碎屑岩建造, 以及上下白垩统景星组下段(K_j^1)紫红色细碎屑岩夹灰色碎屑岩建造组成的倒转地层。原生地层主要为在中新生代前陆盆地演化的构造背景下, 形成的一套由海相至陆相环境转变条件下的巨厚红层沉积, 出露有南新组(K_2n)紫红色河流相沉积、虎头寺组(K_2h)浅紫灰色河流相沉积、云龙组(E_{1y})紫红色细碎屑岩含盐地层, 以及果郎组(E_2g)紫色富含大量石膏细碎屑岩建造。两套地层之间为逆冲推覆构造(F_2)所分隔, 推覆而来的“外来系统”, 覆盖在矿区“原地系统”之上。水平推覆断裂包括北厂 F_2 、 F_8 、 F_1 、 F_6 , 架崖山 F_{28} 、 F_{29} 。断裂时分时合, 分界断裂 F_1 、 F_6 于北厂 P17 线附近合并为 F_1 , 延伸入架崖山连接 F_{29} 断裂; 北厂 F_2 断裂特征明显, 延伸稳定, 在架崖山连接 F_{28} 断裂, 为推覆构造的主断裂以及热卤水成矿活动的顶界断裂, 局部由于成矿期坍塌作用的影响而破碎不完整(图 2)。推覆断层为成矿物质提供了容纳空间, 矿区内几乎所有矿段的矿体均产于推覆断层附近, 其中与主推覆断层 F_2 关系最为密切, 主要矿体在 F_2 上、下盘的景新组和云龙组中[24]。

金顶穹隆在平面上以后阱沟头为中心轴部由西坡-北厂-跑马坪一带呈北北东向稍长, 地表出露范围 $3 \times 2.5 \text{ km}^2$ 的椭圆形, 核部出露的地层为白垩系虎头寺组、下第三系云龙组原地系统, 翼部为外来推覆体的地层-白垩系、侏罗系和三叠系, 在岩层隆起到一定高度之后产生的一系列放射状张性断裂使穹隆遭受破坏, 岩层和矿体呈断续环状围绕着穹隆核心排布, 推覆滑动面也相应转入到穹隆中, 可以判断穹隆构造形成于推覆构造之后, 穹隆形成早期阶段与铅锌主成矿期一致, 此时期岩层拱起矿液向上运移并在有利部位成矿, 晚期阶段, 则是在成矿期后, 岩层上拱到一定的高度, 因顶部放射状张裂的形成便穹隆破坏而结束变形过程[5]。穹隆形态复杂, 顶部平缓, 翼部产状变陡。东翼(架崖山矿段)产状平缓, 后期断裂 F_5 影响, 架崖山以东一带下沉; 西翼(蜂子山矿段)产状变陡, 呈“S”型变化。南翼相对平缓, 北翼保存相对完整, 且产状较陡[4]。

金顶矿床容矿系统是由非原地地层系统通过区域性较长距离的推覆或滑覆作用形成的构造岩片堆叠体, 构造岩片中具有含盐建造[7]。矿床主要由跑马坪、北厂、架崖山、蜂子山、南厂、白草坪以及西坡 7 个矿段组成。近水平发育的系列逆冲断层和构造圈闭而成的构造穹隆控制金顶矿床。赋矿围岩主要为砂岩型矿石和灰岩角砾岩型。其中, 砂岩型矿化主要沿景星组砂岩分布, 而灰岩角砾岩型矿化则与三合洞组灰岩角砾密切相关[16]。矿石主要呈浸染状、块状、角砾状和脉状等。矿石矿物有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、白铁矿、黄铜矿、褐铁矿、菱锌矿和水锌矿等。脉石矿物以天青石、方解石和石膏为主, 少量石英、重晶石和沥青。金顶矿区有机质丰富, 并且有机质富集处, 矿化强烈。



1—古新统果郎组泥质粉砂岩夹细砂岩，2—古新统云龙组上段第三层泥砾夹石膏及泥质粉砂岩，3—云龙组上段第二层浅灰色含少量紫红色团斑含角砾细砂岩夹泥质粉砂岩，含石膏，4—云龙组上段第一层浅灰色及棕红色泥质粉砂岩与泥砾岩互层，5—云龙组下段第五层棕红色泥质粉砂岩，夹细砂岩，6—云龙组下段第四层条斑状粉—细砂岩夹角砾岩，7—云龙组下段第三层棕红色含泥细砂岩，8—云龙组下段第二层浅灰色灰岩角砾岩及含角砾砂岩，9—云龙组下段第一层条斑状，麻点状粉—细砂岩，底部为灰岩角砾岩，10—白垩系下统—景星组灰色细粒石英砂岩，11—侏罗系中统下段花开左组第五层紫红色泥岩、泥质粉砂岩夹细砂岩，12—花开左组第四层浅灰色及浅灰黄色含泥质细粒石英砂岩，13—花开左组第三层紫红色粉砂质泥岩、粉砂岩及细砂岩，局部含砾岩；14—花开左组第二层浅灰白色细粒石英砂岩，15—花开左组第一层紫红色泥质粉砂岩与细砂岩互层，16—三叠系上统麦初箐组灰绿色灰黑色粉砂质泥岩夹细砂岩扁豆体，17—三叠系上统三合洞组下段第二层浅灰色、灰色燧石结核灰岩、角砾状沥青质灰岩，18—三合洞组下段第一层白深灰色云质泥岩夹泥灰岩及沥青质结晶灰岩，19—三合洞组构造岩片，20—黑色、灰黑色粉砂岩、泥灰岩构造岩片，21—灰绿色泥质粉砂岩构造岩片，22—紫红色泥岩、泥质粉砂岩构造岩片，23—推测断层。

Figure 2. Geological sketch map of 2019 stope of Beichang ore block in Jinding lead-zinc Mine, Lanping County, Yunnan Province (source of information production exploration)

图 2. 云南省兰坪县金顶铅锌矿北厂矿段 2019 年采场地质简图(资料来源生产勘探)

5. 云龙组内碳酸盐岩构造岩片演化模式讨论

5.1. 矿区碳酸盐岩构造岩片特征

矿区云龙组(E_y)内由推覆楔入的三合洞组碳酸盐岩构造岩片及其演化形成具特殊成因的灰岩角砾，为重要的赋矿岩石，分布范围广、岩性组合复杂、岩相变化大，以富含大量的石膏、灰质角砾为显著特征。金顶矿区“云龙组”与外围区域的云龙组存在很大差异。外围区域的云龙组化石丰富，蒸发岩层顶

底板为钙质泥岩和粉砂岩；在含盐岩系中无碳酸盐岩，石膏亦不发育，地层上下序粒层正常，沉积旋迴性明显。而金顶矿区的云龙组碳酸盐岩和硫酸盐发育，流行观点把其中灰岩角砾岩及碳酸盐系组成的异常层序和岩性变化用沉积相观点加以解释，提出了 E_1y^b 岩相模式，即批江断裂以东为湖岸剥蚀区，往西依次分为滑塌角砾岩相—冲积扇顶亚相—扇中亚相—扇缘亚相[1] [2] [3]。高广立研究认为金顶铅锌矿区硬石膏岩分布广泛，多具角砾状构造，显示其曾经受过剧烈的构造运动，局部仍保存有原生沉积构造，应是三叠纪碳酸盐岩系中的蒸发岩，而不是第三纪云龙组中的蒸发岩，提出灰岩角砾岩是膏溶—构造角砾岩，层位应是三叠系的观点[8]。王安建等提出原来被认为是云龙组的滑塌角砾岩和冲积扇粗碎屑岩实际上是上三叠三合洞组下部含膏盐的沥青灰岩组合在长距离推覆过程中形成的构造推覆膏溶角砾岩。角砾岩胶结物孢粉测定结果表明这套角砾岩仍然保存着晚三叠世的记忆，缺少古新世云龙组沉积的证据，说明含矿角砾岩并非新生代古新世的滑塌堆积的产物，而是晚三叠纪地层经构造推覆—滑覆—膏溶形成的一套特殊角砾岩组合[6] [7]。

金顶角砾岩在矿区广泛分布，尤以北厂、架崖山、跑马坪矿段为甚。因其特殊的地质特征、成岩机制以及在成矿过程中扮演重要的角色而备受关注。庄天明等(2016)根据金顶矿区角砾岩的成分及结构特点，划分出 8 种角砾岩/含角砾砂岩：层状含灰岩角砾砂岩、方解石胶结灰岩砾角砾岩、石膏/硬石膏胶结灰岩砾角砾岩、铁泥质胶结灰岩砾角砾岩、混杂状砂质胶结灰岩砾角砾岩(或称含灰岩角砾砂岩)、膏砂泥胶结复成分砾角砾岩、砂质胶结复成分砾角砾岩和含矿石砾角砾岩。矿化主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等热液矿物交代角砾岩间或砂质杂基间的方解石胶结物，角砾本身弱/无矿化。目前有关金顶角砾岩成因观点很多，如膏溶—构造角砾成因[8] [9]、沉积砾岩或角砾岩[10]、刺穿体角砾岩、底辟角砾岩、或少量为盐(膏)溶垮塌角砾岩[7] [53] [54]，以及岩溶角砾岩[55]。

综上所述，矿区云龙组内碳酸盐岩系是始新世末由推覆楔入的三合洞组碳酸盐岩构造岩片，经复合造山作用演化的不同阶段形成不同类型的角砾岩构造。其中含矿灰岩角砾岩的成因有构造推覆、走滑破碎、膏溶角砾岩与侵位角砾岩等[7]。研究显示在金顶矿区露天采场存在砂岩灌入体、侵位角砾岩和水力压裂构造，砂岩灌入体和水力压裂构造中矿石矿物(闪锌矿)胶结物的发育表明，这些构造的形成时代与矿化时代相同[56]。

5.2. 演化模式讨论

5.2.1. 前陆盆地推覆构造系统

金顶铅锌矿床处在南北向澜沧江断裂带和北北西向维西—乔后断裂带所夹持的兰坪复向斜中[5]。古新世—始新世印度板块与欧亚板块碰撞，兰坪盆地演化为以发育褶皱—逆冲构造和挤压构造为特点的新生代前陆盆地阶段。印度板块向东移动，扬子板块向西挤压，始新世(53 Ma)兰坪盆地受到金沙江造山带与澜沧江造山带的双向挤压，形成对冲推覆构造。云龙组已经参与了区域推覆作用改造变形，推覆作用发生在云龙组形成之后，推覆构造时限应晚于云龙组[7] [8]，大致早于 MVT 型 Pb-Zn 灰岩角砾砂岩成矿年龄 32 Ma。盆地分别展布有西部南北向强烈褶皱带、中部复式向斜带、东部复式背斜带[43]。始新世东西向挤压而成的推覆构造奠定了本区的基本构造格局，推覆构造体系中的雪帮山—云岭断裂是其主干断层，受两侧造山带的影响，由雪帮山—云岭山脉一线向东西两侧，发育两套前陆逆冲推覆构造系统，形成反对冲式构造格局[5] [57]。金顶矿区的推覆构造中外来系统来源于雪帮山—云岭推覆构造带，推覆方向为由东向西，矿区位于前锋带[58]。矿区逆冲推覆构造系统可划分出两个主要推覆构造层系，下逆冲推覆构造层是主要容矿构造[59]。 F_2 断层带为主逆冲推覆界面，根据矿区逆冲推覆断层组的出露交切情况(图 2)，分析认为 F_2 与 F_8 逆冲推覆系统先推覆盖于云龙组之上，之后 F_1 和 F_6 逆冲推覆系统再推覆叠置于 F_2 与 F_8 推覆带之上，其中三合洞组灰岩为能干岩层，前锋带容易形成“楔状岩片”楔入云龙组非能干岩层

中。在北厂采场填图中可见灰岩构造岩片中残留有麦初箐组灰绿色灰黑色泥质粉砂岩及云龙组紫色泥质粉砂岩透镜体。矿区内的推覆滑动面呈多层叠置，滑动面几乎均为岩层的层理面，仅局部切层。比较突出的推覆滑动面是夹有薄层灰岩的石膏岩，为一套塑性流动的滑动层，石膏岩在推覆过程中起着滑动面的作用。三叠系灰岩所夹的薄层泥灰岩和钙质泥岩，侏罗系、白垩系的页岩等也是有利于滑动的软弱面[5]。

5.2.2. 走滑拉分盆地穹窿构造系统 + 盐丘底辟与膏溶坍塌

晚渐新世 - 中新世(32~10 Ma)兰坪盆地转入走滑拉分盆地演化阶段，伴随穹窿构造云龙组内碳酸盐岩构造岩片而再次应变，并在构造应变部位形成构造角砾岩。矿区硬石膏和天青石矿也达到了大型矿床，盐丘的形态和规模与矿区的穹窿构造具有和谐的关系，暗示穹窿与盐丘可能具有密切的成因联系，沿着穹窿构造边部发育的一系列放射状断裂说明穹窿构造极有可能是在区域构造应力作用下由于含盐地层密度倒置导致膏盐底辟形成盐丘，并诱发形成金顶矿区的穹窿构造[7]。矿区盐构造有盐枕、盐背斜、盐焊接、盐穿刺、盐推覆、盐岩滑脱-断层相关褶皱组合等多种盐构造变形样式。这些盐构造的形成演化及变形机制主要受到推覆挤压缩短作用、基底断层作用和塑性流动汇聚作用、盐下和盐上层断裂滑脱作用等控制，主要沿推覆断裂构造带呈串珠状分布。盐构造的形成与演化在早期对成矿元素的聚集成矿至关重要，晚期则主要起到次生改造和破坏作用[10]。矿区从东至西，角砾岩的胶结物或杂基的膏盐成分减少，砂质成分增多[53]。层状砂基灰质角砾岩很可能是由石膏溶解虚空，导致灰岩脆碎呈角砾、细砂因膏盐塑性流动呈流砂，后经压实再成岩形成[60]。膏盐的溶解在盆地热卤水活动成矿过程中为膏盐溶解导致上覆岩石坍塌形成坍塌角砾岩型容矿构造，同时膏盐的溶解为运移热卤水中成矿元素的沉淀提供所需的硫源。

5.2.3. 成矿后构造改造作用

1) 岩溶作用

在矿区众多成因的角砾岩中，由碳酸盐类岩石形成的岩溶型角砾岩是存在的。岩溶作用发生于早第三纪的主期铅锌成矿作用之后，由于地形不断上升，部分矿体位于地下水的的作用带内，因而在厚大的碳酸盐岩石中发生溶蚀，形成岩溶角砾岩，同时对原生的“灰岩角砾岩型矿石”及“钙质砂岩型矿石”进行改造[55]。

2) 成矿后破矿断层形成含矿石角砾岩

含矿石角砾岩形成于矿后，主要有两种，一种发育于金顶北厂矿段和架崖山矿段的分界处的 F_{27} 断裂带；另一种位于北厂矿段西部的砂体内[53]。晚第三纪，在当地 2846 米剥夷面形成时，含矿层的穹窿构造顶部已剥露，东部矿体(海拔 2830 米)已进入表生(再造)阶段。铁菱锌矿形成后，有一次构造变动形成的角砾，破坏了原来的表生作用的环境，氧化带矿石常见由氧化向还原环境的转变，原来是淋滤的氧化矿石的孔洞又重新充填了新的矿物[61]。

5.3. 成矿机理

复合造山是复合成矿系统形成的必要条件。复合造山成矿带中构造成矿单元的构造属性、变形变质、岩浆活动、沉积作用和流体特征，均随时 - 空发生变化。早期构造成矿带在新构造体制下发生成矿作用，使原矿床类型被复合改造，形成新的矿床类型和矿种；不同构造体制成矿作用在同一构造带复合，形成复合成矿系统[14] [21]。金顶超大型铅锌矿床是新生代陆陆碰撞造山背景下，地壳深部断裂及其次级断裂为矿床的形成提供了导矿、配矿构造，而逆冲推覆断层构造为矿产的形成提供了容矿构造，并在兰坪盆地形成了中低温热液脉型 Cu-Zn-Pb-Ag 矿床系统，之后在晚始新世至渐新世，大约 33~25 Ma 区域挤压推覆转变为区域拉张伸展发生构造环境转换时期，幔源岩浆和热流驱动盆山转换前被封闭在裂谷或前陆盆

地深部富含油气、膏盐和金属流体,沿着造山带两组伸展构造交汇部位上升,在构造圈闭环境下通过角砾岩侵位-流砂底辟-流体排泄-金属淀积成矿的产物。表现为中低温热液脉型 Cu-Zn-Pb-Ag 成矿系统与 MVT Pb-Zn 成矿系统复合形成“金顶式”铅锌矿床[11]。主要矿化样式叠加有推覆构造型、盐丘构造型、层间断裂带热液脉型等[50],根据金顶矿区两阶段铅同位素模式计算的两阶段模式年龄,第一组粗晶方铅矿样品中,有 17 个样品位于两阶段零等时线左边,模式年龄为 10~50 Ma,其中 13 个样品模式年龄为 28~14 Ma,平均约 33 Ma,其余样品模式年龄小于 5 Ma,可能正是矿区长期多阶段叠加成矿的反映。

6. 结论

1) 古新世-始新世印度板块与欧亚板块碰撞,挤压褶皱和拆沉伸展期(65~32 Ma)兰坪盆地演化为以发育褶皱-逆冲构造和挤压构造为特点的新生代前陆盆地阶段。云龙组已经参与了区域推覆作用改造变形,盆地推覆作用发生在云龙组形成之后,金顶铅锌矿床云龙组内碳酸盐岩系是始新世由推覆楔入的三合洞组碳酸盐岩构造岩片,经复合造山作用演化的不同阶段形成不同类型、不同成因的角砾岩构造。与推覆系统相伴成矿系统主要为以盆地西缘的金满-连城铜钼矿为代表的中低温热液脉型 Cu-Zn-Pb-Ag 矿床,在盆地南部巍山-永平县地区分布有与岩石圈拆沉有关的岩浆岩浅成低温多金属矿床。

2) 矿区逆冲推覆构造系统可划分出两个主要推覆构造层系,下逆冲推覆构造层是主要容矿构造,本文认为 F_2 与 F_8 逆冲推覆系统先推覆盖于云龙组之上,之后 F_1 和 F_6 逆冲推覆系统再推覆叠置于 F_2 与 F_8 推覆带之上,其中三合洞组灰岩为能干岩层,前锋带容易形成“楔状岩片”楔入主推覆面(F_2)之下云龙组非能干岩层中。

3) 晚渐新世-中新世(32~10 Ma)兰坪盆地转入走滑拉分盆地演化阶段,在大规模的剪切走滑背景下伴随南北向挤压推覆以及盐丘底辟作用,推覆系组与原地系组融合形成穹窿构造系统,云龙组内碳酸盐岩构造岩片而再次应变,并经过膏溶坍塌、砂岩灌入体和水力压裂构造等作用的叠加改造复合成矿,主要矿化样式叠加有推覆构造型、盐丘构造型、层间断裂带热液脉型等。

4) 金顶铅锌矿床云龙组内碳酸盐岩角砾岩为经推覆构造→穹窿构造→膏溶构造→后期岩溶改造等形成的一套特殊多成因角砾岩组合。

致 谢

作者非常感崔银亮教授在选题与构思方面给予的指导和启发!在野外工作中也得益于与祝新友教授、李成厚高工、吕晓强高工等的交流,谨表谢忱!并对给予转载和引用权的文献资料的所有者表示感谢!

参考文献

- [1] 施加辛,易风煌,文启鎔. 兰坪金顶铅锌矿床的岩矿特征及成界[J]. 云南地质, 1983, 2(3): 179-194.
- [2] 云南省地质矿产局. 云南省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1990: 106-278.
- [3] 覃功炯,朱上庆. 金顶铅锌矿床成因模式及找矿预测[J]. 云南地质, 1991, 10(2): 145-190.
- [4] 张峰,唐菊兴,丁枫. 云南金顶铅锌矿床控矿作用及矿化富集规律[J]. 华南地质与矿产, 2007(3): 56-62.
- [5] 吴淦国,吴习东. 云南金顶铅锌矿床构造演化及矿化富集规律初探[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1989, 14(5): 477-486.
- [6] 王安建,高兰,刘俊来,曹殿华,修群业,范世家. 论兰坪金顶超大型铅锌矿容矿角砾岩的成因[J]. 地质学报, 2007, 81(7): 891-897.
- [7] 王安建,曹殿华,高兰,王高尚,管烨,修群业,等. 论云南兰坪金顶超大型铅锌矿床的成因[J]. 地质学报, 2009, 83(1): 43-54.
- [8] 高广立. 金顶铅锌矿区硬石膏矿的形成时代及其所涉及的问题[J]. 云南地质, 1991, 10(2): 191-205.
- [9] 高广立. 论金顶铅锌矿床的地质问题[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1989, 14(5): 467-476.

- [10] 朱志军, 郭福生. 滇西兰坪盆地金顶铅锌矿盐构造发育特征及其与成矿关系[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(2): 344-353.
- [11] 薛春纪, 池国祥, 陈毓川. 云南金顶超大型铅锌矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2017: 1-119.
- [12] 杜斌, 王长明, 贺昕宇, 杨立飞, 陈晶源, 石康兴, 等. 锆石 Hf 和全岩 Nd 同位素填图研究进展: 以三江特提斯造山带为例[J]. 岩石学报, 2016, 32(8): 2555-2570.
- [13] 李文昌, 薛迎春, 卢映祥, 薛顺荣, 任治机. 中国斑岩铜矿成矿规律及找矿方向[M]. 北京: 地质出版社, 2014: 1-411.
- [14] 邓军, 王庆飞, 李龚健. 复合造山和复合成矿系统: 三江特提斯例析[J]. 岩石学报, 2016, 32(8): 2225-2247.
- [15] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 王登红, 杨伟光, 杨清标. 滇西兰坪盆地构造体制和成矿背景分析[J]. 矿床地质, 2002, 21(1): 36-44.
- [16] 王长明, 陈晶源, 杨立飞, 张端, 杜斌, 石康兴. 三江特提斯兰坪盆地构造-流体-成矿系统[J]. 岩石学报, 2017, 33(7): 1957-1977.
- [17] 张峰, 唐菊兴, 陈洪德, 杨长青, 李陵, 范小华, 陈生华, 等. 兰坪盆地演化与盆内成矿流体特征[J]. 矿物学报, 2010, 30(2): 224-229.
- [18] 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 莫宣学, 田世洪, 孙晓明, 等. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(5): 521-543.
- [19] 邓军, 王长明, 李龚健. 三江特提斯叠加成矿作用样式及过程[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1349-1361.
- [20] 潘桂棠, 王立全, 李兴振, 王洁民, 徐强. 青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置[J]. 沉积与特提斯地质, 2001, 21(3): 1-26.
- [21] Deng, J., Wang, Q.F., Li, G.J. and Santosh, M. (2014) Cenozoic Tectono-Magmatic and Metallogenic Processes in the Sanjiang Region, Southwestern China. *Earth-Science Reviews*, **138**, 268-299. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.05.015>
- [22] 邓军, 王长明, 李龚健. 三江特提斯叠加成矿作用样式及过程[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1349-1361.
- [23] 陶晓风, 朱利东, 刘登忠, 王国芝, 李佑国. 滇西兰坪盆地的形成及演化[J]. 成都理工学院学报, 2002, 29(5): 521-525.
- [24] 何龙清, 陈开旭, 魏君奇, 余凤鸣. 云南白秧坪地区东矿带矿床地质地球化学特征及成因分析[J]. 矿床地质, 2005, 24(1): 61-70.
- [25] 燕守勋, 李朝阳, 周朝宪. 金顶铅锌矿床穹隆构造成因及其相关问题探讨[J]. 矿床地质, 1994, 13(2): 148-154.
- [26] 刘家军, 李志明, 张乾, 刘玉平, 李朝阳, 何明勤, 等. 滇西金满脉状铜矿床的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 快中子活化年龄[J]. 地质科学, 2003, 38(4): 529-531.
- [27] 张锦让, 温汉捷, 裴愉卓, 邹志超. 兰坪盆地西缘沉积岩容矿脉状 Cu-Ag-Pb-Zn 多金属矿床成矿时代[J]. 高校地质学报, 2016, 22(2): 219-230.
- [28] 王光辉, 宋玉财, 侯增谦, 王晓虎, 杨竹森, 杨天南, 等. 兰坪盆地连城脉状铜矿床辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 413-424.
- [29] Li, X.M. and Song, Y.G. (2006) Cenozoic Evolution of Tectono-Fluid and Metallogenic Process in Lanping Basin, Western Yunnan Province, Southwest China: Constraints from Apatite Fission Track Data. *Chinese Journal of Geochemistry*, 25, 396-401. <https://doi.org/10.1007/s11631-006-0395-2>
- [30] 何明勤, 刘家军, 李朝阳, 李志明, 刘玉平, 杨爱平, 等. 云南兰坪白秧坪铜钴多金属矿集区矿石中石英的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄[J]. 地质科学, 2006, 41(4): 688-693.
- [31] 薛春纪, 陈毓川, 王登红, 杨建民, 杨伟光, 曾荣. 滇西北金顶和白秧坪矿床: 地质和 He, Ne, Xe 同位素组成及成矿时代[J]. 中国科学 D 辑, 2003, 33(4): 315-322.
- [32] 黄玉凤. 兰坪盆地东缘 SEDEX 型铅锌矿床地质特征及成矿预测[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2011: 1-60.
- [33] 徐晓春, 黄震, 谢巧勤, 岳书仓, 刘因. 云南金满、水泄铜多金属矿床的 Ar-Ar 同位素年代学及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2004, 10(2): 157-164.
- [34] 唐永永, 毕献武, 武丽艳, 王雷, 邹志超, 和利平. 金顶铅锌矿黄铁矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. 矿物学报, 2013, 33 (3): 287-294.
- [35] 董方浏, 莫宣学, 侯增谦, 王勇, 毕先梅, 周肃. 云南兰坪盆地喜马拉雅期碱性岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄及地质意义[J].

- 岩石矿物学, 2005, 24 (2): 103-109.
- [36] 肖昌浩. 三江中南段低温热液矿床成矿系列研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2013. 1-153
- [37] 董方浏. 云南巍山-永平矿化集中区铜金多金属矿床成矿条件及成矿潜力研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2003, 1-131.
- [38] 李小明, 谭凯旋, 龚文君, 龚革联. 利用磷灰石裂变径迹法研究金顶铅锌矿成矿时代[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(3): 282-286.
- [39] 赵海滨. 滇西兰坪盆地中北部铜多金属矿床成矿特征及地质条件[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006, 1-123.
- [40] 王晓虎, 侯增谦, 宋玉财, 杨天南, 张洪瑞. 兰坪盆地白秧坪铅锌铜银多金属矿床: 成矿年代及区域成矿作用[J]. 岩石学报, 2011, 27(9): 2625-2634.
- [41] Hou, Z.Q., Zaw, K., Pan, G.T., Mo, X.X., Xu, Q., Hu, Y.Z. and Li, X.Z. (2007) Sanjiang Tethyan Metallogensis in S. W. China: Tectonic Setting, Metallogenic Epochs and Deposit Types. *Ore Geology Reviews*, 31, 48-87. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2004.12.007>
- [42] 张峰, 唐菊兴, 陈洪德, 范小华, 陈生华, 陈文彬, 等. 兰坪盆地演化与成矿特征[J]. 地质与勘探, 2010, 46(1): 85-92.
- [43] 杨立飞, 石康兴, 王长明, 吴彬, 杜斌, 陈晶源. 西南三江兰坪盆地金满铜矿床成因研究: 来自铜和硫同位素的联合约束[J]. 岩石学报, 2016, 32(8): 2392-2406.
- [44] 陈新跃, 王岳军, 范蔚茗, 彭头平. 云南崇山剪切断裂系显微构造特征及其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学约束[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(1): 41-51.
- [45] 钟大赉, Taponnier, P., 吴海威, 张连生, 嵇少丞, 钟嘉猷, 等. 大型走滑断层——碰撞后陆内变形的重要形式[J]. 科学通报, 1989(7): 526-529.
- [46] 管烨, 王安建, 曹殿华, 秦德厚. 云南三江造山带近东西向构造特征及其研究意义[J]. 地质学报, 2004, 78(4): 494-499.
- [47] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 王登红, 杨伟光, 杨清标. 金顶铅锌矿床地质——地球化学[J]. 矿床地质, 2002, 21(3): 270-277.
- [48] 王国芝, 胡瑞忠, 王成善, 等. 云南金顶超大型铅锌矿床的成矿地质背景[J]. 矿物学报, 2001, 21(4): 571-577.
- [49] 王江海, 尹安, 周江羽, 张玉泉, 解广轰, Harrison, T.M., 等. 青藏高原新生代两类高钾岩浆活动的热年代学研究[J]. 中国科学 D 辑, 2002, 32(7): 529-537.
- [50] 叶天竺, 韦昌山, 王玉往, 祝新友, 等. 勘查区找矿预测理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2013: 1-594.
- [51] 侯增谦, 宋玉财, 李政, 王召林, 杨志明, 杨竹森, 等. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型[J]. 矿床地质, 2008, 27(2): 123-144.
- [52] 张乾. 云南金顶超大型铅锌矿床的铅同位素组成及铅来源探讨[J]. 地质与勘探. 1993, 29(5): 21-28.
- [53] 庄天明, 宋玉财, 侯增谦, 薛传东, 韩朝辉, 张翀, 等. 金顶超大型铅锌矿床角砾岩及含角砾砂岩分类、特征及成因[J]. 地质与勘探, 2004, 52(6): 1001-1015.
- [54] 高兰, 王安建, 刘俊来, 修群业, 曹殿华, 翟云峰. 滇西北兰坪金顶超大型矿床研究新进展: 侵位角砾岩的发现及其地质意义[J]. 矿床地质, 2004, 24(4): 457-461.
- [55] 胡明安. 试论岩溶型铅锌矿床的成矿作用及其特点——以云南兰坪金顶矿床为例[J]. 中国地质大学学报, 1989, 14(5): 531-538.
- [56] 池国祥, 薛春纪, 卿海若, 薛伟, 张江伟, 孙远强. 中国云南金顶铅锌矿碎屑灌入体和水力压裂构造的观察及流体动力学分析[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 29-42.
- [57] 沙绍礼, 殷质豫, 夏抱本. 滇西北新生代逆冲推覆构造[J]. 云南地质, 2004, 23(2): 154-163.
- [58] 刘文强. 兰坪盆地东部逆冲推覆构造特征及其控矿作用[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2010: 1-86.
- [59] 刘洪滔, 陈启良, 程胜辉, 等. 中国矿产地质志云南卷铅锌矿产[M]. 北京: 地质出版社, 2018: 1-573.
- [60] 祝新友, 王京彬, 刘增仁, 方同辉. 新疆乌拉根铅锌矿床地质特征与成因[J]. 地质学报, 2010, 84(5): 694-702.
- [61] 赵明开, 胡晓斋, 严桂英. 兰坪金顶铅锌矿的表生作用及次生硫化物富集带[J]. 云南地质, 1986, 5(2): 107-125.