

西南三江兰坪盆地大规模成矿的流体动力学过程 ——流体包裹体和盆地流体模拟证据

薛春纪^{1,2}, Chi Guoxiang³, 陈毓川⁴, 曾 荣⁵, 高永宝⁵, Qing Hairuo³

1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083
2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083
3. Department of Geology, University of Regina, Saskatchewan S4S 0A2, Canada
4. 中国地质科学院, 北京 100037
5. 长安大学 地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054

Xue Chunji^{1,2}, Chi Guoxiang³, Chen Yuchuan⁴, Zeng Rong⁵, Gao Yongbao⁵, Qing Hairuo³

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
3. Department of Geology, University of Regina, Saskatchewan S4S 0A2, Canada
4. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
5. College of Earth Science and Land Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Xue Chunji, Chi Guoxiang, Chen Yuchuan, et al. Fluid dynamic processes of large-scale mineralization in the Lanping Basin, Yunnan, SW-China: evidence from fluid inclusions and basin fluid modeling. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 147-157

Abstract: The Lanping Basin, Yunnan Province, South-west China, contains the giant Jinding Zn-Pb deposit and the newly discovered Baiyangping Cu-Co-Ag super-large deposit. The Jinding deposit, with reserves of ~200 Mt ore, grading 6.08% Zn and 1.29% Pb (i. e. metal resources of ~15 Mt) is the largest Zn-Pb deposit in China. The ore is hosted by Cretaceous and Tertiary terrigenous rocks. The Jinding is also the youngest sedimentary rock-hosted and the only continental super-large Zn-Pb deposit in the world. Differing from other major types of sediment-hosted Zn-Pb deposits in the world, including SST, MVT and SEDEX, the Jinding deposit represents a new type of sedimentary rock-hosted Zn-Pb mineralization. Most previous studies assumed that the mineralizing fluids were derived from within the basin and that the fluid flow was largely driven by topographic relief under a hydrostatic regime. However, the observations of hydraulic fractures and fluid inclusion data in this study indicate that the mineralizing fluid system was strongly over-pressured. The study of fluid inclusions in sphalerites and associated gangue minerals (quartz, celestite, calcite and gypsum) shows that homogenization temperatures cluster around 110-150°C, with salinities of 1.6-18.0 wt% NaCl equivalent. The fluid temperature increased with the decrease in salinities during the main ore stages, and there is also a systematic westward decrease in temperature and increase in salinity in the Jinding ore district. Fluid pressures as high as $(513-1364) \times 10^5$ Pa are indicated by CO₂-rich fluid inclusions. The results of basin fluid dynamic modeling indicate that the overpressures could not have been produced by normal sediment compaction, and the overpressure related to the thrusting may be inadequate to explain the high fluid pressures indicated by fluid inclusions. The injection of mantle-derived fluids is thought to be a viable mechanism for the build-up of high o-

收稿日期: 2007-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40472054, 40272050); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2002CB4126007); 高等学校学科创新引智计划(B07011)

作者简介: 薛春纪(1962—), 男, 博士, 教授, 矿床学和矿产普查与勘探专业。

verpressures. The mixing of two types of fluids in a structural-lithologic trap may have been the key dynamic process for the large-scale mineralization in the Lanping Basin; one was a mantle-derived fluid enriched in metals and CO_2 with higher temperatures and lower salinities, and the other was H_2S -rich saline formation water with lower temperatures and higher salinities. The special hydrodynamic regime and potential contribution of mantle-derived fluids to the mineralizing system distinguish Jinding from other known sedimentary basin-associated Pb-Zn deposits.

Key words: Lanping Basin; Jinding Zn-Pb deposit; fluid inclusions; fluid overpressures; basinal fluids; hydrodynamic modeling

摘要:中国西南部云南兰坪盆地因金顶 Zn-Pb 矿床和新发现的白秧坪超大型 Cu-Co-Ag 矿床而驰名。金顶矿床以白垩系和第三系陆相碎屑岩为主岩,拥有 2 亿吨矿石,平均品位 Zn 6.08%、Pb 1.29%(1 500 万吨金属),是目前中国最大的 Zn-Pb 矿床,也是世界上形成时代最新且唯一产于陆相沉积岩容矿的超大型 Zn-Pb 矿床。不同于世界上人们公认的沉积岩容矿基本类型,即 SST、MVT 和 Sedex 型,金顶矿床也许代表了 Zn-Pb 矿床的一个新类型。通常认为兰坪盆地大规模成矿流体起源于盆地卤水,流体流动以重力驱动为主,压力体系接近静水压力。但基于矿田内水压破裂观察、流体包裹体研究和盆地流体动力学模拟,我们认为深部超压流体的注入对整个成矿系统起着重要作用。闪锌矿及相关脉石矿物(石英、天青石、方解石、石膏)中流体包裹体观测的均一温度主体在 110~150℃,盐度(质量分数)在 1.6%~18.0% NaCl;在时间上,大规模成矿主要阶段伴随着流体温度的不断升高和盐度的逐渐降低;在空间上,金顶矿区空间上从东到西,成矿流体温度明显降低,盐度系统性升高。富 CO_2 流体包裹体揭示成矿流体曾高达 $(513 \sim 1\,364) \times 10^5$ Pa,大大高于静水压力。数值模拟表明,盆地沉积和压实产生的流体超压可以忽略,区域构造推覆也不足以产生如此高的流体压力。我们认为成矿流体超压很可能是慢源流体注入引起的;慢源含矿的相对高温低盐度流体沿导矿构造注入金顶穹隆构造-岩性圈闭并与其富 H_2S 的相对低温高盐度卤水混合是兰坪盆地大规模成矿的关键动力学过程。这个特殊的流体动力学过程和成矿系统,使兰坪盆地的成矿有别于世界其他沉积盆地已知的成矿作用。

关键词:兰坪盆地;金顶铅锌矿;流体包裹体;流体超压;盆地流体;流体动力学模拟

中图分类号:P611 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2007)05-0147-11

西南三江中段兰坪盆地是著名的金属成矿区,其中金顶矿床控制 Pb+Zn 储量为 1 500 万吨^①,加上潜在的和已剥蚀掉的金属量,实际成矿的铅锌金属总量要大于 2 200 万吨^[1],是中国目前规模最大的铅锌矿床,也是世界上 Pb+Zn 储量大于 1 000 万吨的 17 个沉积岩容矿超大型铅锌矿床之一;最近又在金顶以北约 30 km 新发现白秧坪 Cu-Co-Ag 超大型矿床^②。这些重要矿床产在中—新生界陆相碎屑沉积岩中,盆地内没有明显的岩浆岩出露,与世界铅锌储量 80% 左右产在沉积岩中的基本事实一致^[2],但金顶矿床是全球形成时代最新且唯一以陆相沉积岩容矿的超大型铅锌矿床^[3],有别于世界上目前普遍认为沉积岩容矿铅锌矿床的三大类型^[2,4-5],即砂岩型(SST)、密西西比河谷型(MVT)和喷流沉积(Sedex)型,可能代表了沉积岩容矿铅锌矿床的一种新类型^[3,6],是人类 21 世纪铅锌矿勘查的新方向^[7-8]。本文报道了这里的成矿学新知。

自从 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,

提出不同成矿学观点。20 世纪 80 年代,矿床地质研究提出同生沉积-后期改造层控矿床认识^[9-10];中国地质大学对金顶矿床进行了多方面研究,取得了丰硕研究成果^[11-14],提出中低温非岩浆热液成矿^[11]、同生沉积-变形叠加成矿^[12]、喷气(热液)沉积成矿^[13]、岩溶成矿^[14]等不同认识。20 世纪 90 年代,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^[15],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^[16],矿床属于层控后生型^[17],铅同位素组成反映硫化物矿石铅主体为幔源铅^[18-19],并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^[19-20];部分研究者把金顶矿床理解为陆相热水沉积成因^[16,21-22],认为大气成因地下水萃取盆地地层

① 云南省地质矿产局第三地质大队. 云南省兰坪县金顶铅锌矿详细勘探地质报告. 1984:1-7,77-111.

② 云南省地质矿产局第三地质大队. 云南兰坪白秧坪铜钴银矿化集中区评价. 中国地质调查局主编. 国土资源大调查矿产资源调查评价工程重要成果汇编. 2002:136-145.

(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^[21-23];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^①。近年,结合区域地质和地球物理的研究认识到金顶矿床形成于特殊地质环境^[6-7],流体包裹体中惰性气体同位素地球化学示踪显示地幔含矿流体参与了大规模成矿^[3,24]。对于成矿流体的驱动力,一般认为接近静水压力状态下的重力驱动是主要的^[17,25-26],但是,部分学者认为有些矿石属喷流成因,成矿流体强烈超压^[22]。水压破裂的发现及富 CO₂ 流体包裹体研究表明成矿流体体系确曾经历周期性的超压^[27];盆地流体压力的数值模拟表明,流体超压的产生一部分与推覆构造有关,一部分与盆地外流体的注入有关^[28]。本文在上述研究的基础上,通过对不同矿化阶段流体包裹体特征及时空变化规律以及盆地流体动力学模拟的总结,把成矿物来源和成矿流体动力学这两个看似无关的问题有机地联系起来,试图为兰坪盆地大规模成矿作用的机制提供新的制约。

1 区域和矿区地质

兰坪盆地地质背景^[8, 15]和其中重要矿床地质^[1,9-10,29]前人有专论,这里仅简介要点。兰坪盆地处在滇西兰坪—思茅盆地(宽大约 150 km、长大于 400 km)的北段,NNW 向狭长展布,西以澜沧江断裂为界与宝山地块相接,东以金沙江断裂为界与扬子陆块毗邻,其中充填有厚度超过 10 km 的中—新生界碎屑为主的沉积岩(图 1)。在古特提斯基础

上,三叠纪早中期由于金沙江、澜沧江两个构造带先后活动,兰坪盆地成为扬子陆块与宝山地块之间的微板块,晚三叠世盆地具有残留海性质,侏罗—白垩纪发展成陆内坳陷盆地;古近纪以来受印度板块与欧亚板块碰撞影响,兰坪区域演化成为走滑拉分盆地,并伴有明显的逆冲推覆构造过程。除上三叠统发育泥灰岩、灰岩外,中—新生界以夹蒸发盐层的硅质碎屑沉积岩为特征。喜马拉雅运动中地层发生褶皱和断裂,并有碱性岩浆活动。

金顶铅锌矿床位于兰坪盆地中部 NS 向高角度正断层(泚江断裂)西侧附近,矿体呈板状产在下白垩统景星组(K_{1j})细砂岩和古新统云龙组(E_{1y})含砾砂岩中。景星组沿逆冲构造(F₂)推覆到云龙组之上,原地和外来地层系统以及推覆构造均卷入金顶穹隆构造。矿床由 100 多个矿体构成,主要矿体受推覆构造 F₂ 控制并围绕金顶穹隆核部分布。这种地质关系说明推覆构造发生在云龙组沉积之后(55.8 Ma),穹隆构造发生在矿区 F₂ 推覆构造作用后期或之后,而金属成矿作用与穹隆化过程相伴或在其后发生。矿石中矿石矿物主要是闪锌矿和方铅矿,脉石矿物包括碎屑成因的大量石英和少量长石、热液成因黄铁矿、白铁矿、天青石、石膏、重晶石、沥青、少量石英;铅锌硫化物矿物不均匀浸染于砂岩和含砾砂岩中,表现为对砂岩钙质胶结物的交代和开放孔隙充填(图 2),局部可见胶状闪锌矿和莓球状黄铁矿;多方向裂隙和棱角状灰岩角砾被方解石、天青石、方铅矿、闪锌矿和黄铁矿充填和胶结(图 2B)现象常见于金顶矿田兔子山矿段,景星组砂岩碎裂之棱角状碎块常被黝铜矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物胶结(图 2C),这些碎裂状和网状裂隙充填矿石构造可能是岩石水压致裂的结果,与很高的流体压力有关。

2 成矿流体温度-盐度的时空变化规律及压力计算

在金顶矿区闪锌矿及与其共生、伴生的石英、天青石、方解石和石膏矿物中观测到可研究的流体包裹体(图 3),它们多呈椭球状、杏仁状,大小 3~20

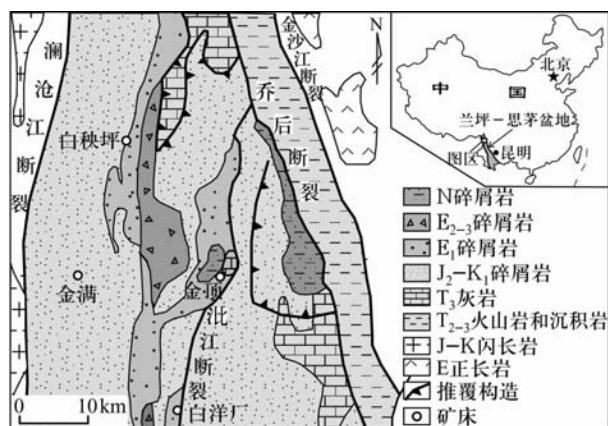


图 1 兰坪盆地地质矿产略图

Fig. 1 Geology and ore deposits in Lanping basin, Yunnan, SW China

① Li N. Depositional controls and genesis of the Jinding sandstone-hosted Zn-Pb deposit, Yunnan Province, Southwest China[D]. Austin: University of Texas at Austin, 1998.



图 2 兰坪盆地某些常见矿石组构照片

Fig. 2 Some ore fabric photographs in Lanping basin, Yunnan, SW China

A—金顶矿区北厂矿段下白垩统景星组砂岩(主要为石英碎屑,白色)钙质胶结物被铅锌硫化物矿物(黑色)交代形成浸染状矿石(单偏光透射显微镜下);B—金顶矿区兔子山矿段上三叠统灰岩碎裂裂隙中充填的含方铅矿、闪锌矿和黄铁矿的天青石-方解石网脉;C—白秧坪矿区富隆厂矿段下白垩统景星组砂岩碎裂裂隙中充填的含黝铜矿、方铅矿、闪锌矿网脉

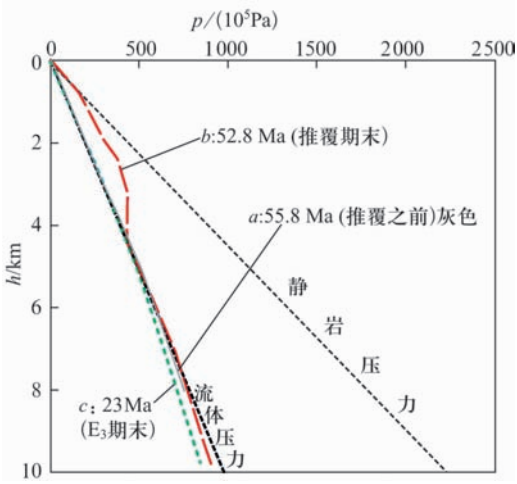


图 7 兰坪盆地中部深度-压力模拟结果(a 线和 b 线在图 6 中)

Fig. 7 Depth-pressure profiles at the center of the Lanping basin (line a-b in Fig. 6)

μm。本文仅对或成群分布、孤立出现、或沿矿物生长纹分布的多被认为属于原生性质的流体包裹体进行了观测和研究,而没有研究沿裂隙、节理分布的流体包裹体。

对经双面剖光、厚度 0.2 mm 左右的光薄片室温下进行流体包裹体观测,镜下识别出单相、两相和三相三类流体包裹体(图 3)。单相流体包裹体大小在 3~10 μm,主要出现在方解石、石膏和天青石中;两相流体包裹体大小为 5~16 μm,由液态 H₂O 和气态 H₂O 组成,液态 H₂O 体积通常大于 65%,多捕获于石英、闪锌矿、天青石和方解石矿物晶体内;三相流体包裹体发现于石英、闪锌矿和天青石晶体中,6~20 μm 大小,由液态 H₂O、液态 CO₂ 和气态 CO₂ 构成,CO₂ 体积占包裹体总体积约 40%~80%。

显微测温研究在 LINKAM-TMS94 冷热台上进行,低于 30℃ 时的测定误差为 0.1℃,高于 30℃ 时的测定误差为 1~2℃。获得 73 个冰点温度和 94 个均一温度测定值(表 1)。

流体包裹体均一温度变化于 54~309℃(表 1),其中石英中流体包裹体均一温度平均 182℃,闪锌矿 154℃,天青石 140℃,方解石 126℃,石膏 98℃。94 个均一温度数据统计表明成矿流体温度出现三个峰值段,即主要由石英、闪锌矿和天青石矿物流体包裹体显示的 170~190℃、主要由闪锌矿、天青石和方解石流体包裹体反映的 110~140℃ 和主要由方解石和石膏流体包裹体显示的 80~100℃。这三个均一温度峰值段分别与通过矿石学和矿相学研究所揭示的三个成矿阶段^[3,6,7,26]大体一致。个别 230~280℃ 的均一温度(表 1)作为异常数据未在本文讨论。

在金顶矿区所获得的流体包裹体均一温度从东向西具有明显降低趋势,在矿区东部(跑马坪、架崖山、北厂等矿段,下同)均一温度平均为 170℃,在矿区西部(西坡、峰子山等矿段,下同)为 95℃。不同矿物流体包裹体均一温度也分别表现出矿区东部高于西部的特点,闪锌矿流体包裹体均一温度在东部 182℃,西部 125℃;天青石东部 182℃,西部 103℃;方解石东部 163℃,西部 88℃;石膏东部 111℃,西部 74℃。

根据冰的融化温度计算的成矿流体盐度(质量变化)变化于 1.6%~18.0% NaCl(表 1),平均 6.1% NaCl,但统计的峰值主体在 4%~5% NaCl。石英中流体包裹体盐度平均 8.7% NaCl,闪锌矿 10.5% NaCl,天青石 10.0% NaCl,方解石 5.2%

表 1 兰坪盆地金顶矿床流体包裹体显微测温数据库

Table 1 Microthermometric data of fluid inclusions in the Jinding Zn-Pb deposit

样品编号	矿段	寄主矿物	$T_{ice}/^{\circ}C$	$T_h/^{\circ}C$	$w(NaCl_{eq})/\%$	样品编号	矿段	寄主矿物	$T_{ice}/^{\circ}C$	$T_h/^{\circ}C$	$w(NaCl_{eq})/\%$
Pmp05-6	跑马坪	石英	-8.5	189	9.8	Jysh51-h	架崖山	闪锌矿	-8.0	126	9.3
		石英	-7.9	181				闪锌矿	-13.0	158	13.6
		天青石	-7.9	181				天青石	-3.5	161	4.3
Pmp20-1	跑马坪	闪锌矿	-8.2	234	9.5	Jysh21	架崖山	天青石	-2.5	180	3.2
		闪锌矿	-8.6	204	9.9			天青石	-6.2	174	7.1
		天青石	-9.3	170	10.7			石英	-9.1	166	10.5
Jysh004	架崖山	天青石	-3.9	133	4.8	Beh25-4	北厂	方解石	-3.8	140	4.7
		石英	-4.7	250	5.6			方解石	-3.8	162	4.7
		石英	-4.9	175	5.9			石膏	-3.1	256	3.9
Jysh48-1	架崖山	石英	-4.9	176	5.9	Beh60-3	北厂	石膏	-3.2	141	4.0
		石英	-7.9	165	9.1			石膏	-3.1	138	3.9
		天青石	-3.7	309	4.6			石英	-10.2	157	11.7
Jysh8-09	架崖山	天青石	-4.9	275	4.6	Beh206	北厂	闪锌矿	-8.5	190	9.8
		天青石	-4.9	262	5.9			闪锌矿	-5.1	185	6.1
		闪锌矿	-12.0	174	13.6			闪锌矿	-4.1	175	5.0
Jysh37-5	架崖山	闪锌矿	-4.8	195	5.8	Xp-009	西坡	天青石	-2.8	180	3.6
		闪锌矿	-4.0	196	4.9			方解石	-2.4	87	3.1
		闪锌矿	-6.7	190	7.8			方解石	-2.8	87	3.6
Jysh37-5	架崖山	天青石	-6.2	280	8.4	Xp56-12	西坡	方解石	-3.5	101	4.3
		闪锌矿	-4.2	182	5.1			方解石	-2.3	89	3.0
		闪锌矿	-12.4	194	14.1			方解石	-4.6	77	5.5
Beh006	北厂	闪锌矿	-3.5	185	4.3	Fzsh55	峰子山	方解石	-16.0	86	18.0
		天青石	-3.3	262	4.1			天青石	-13.0	115	14.7
		天青石	-4.0	143	4.9			方解石	-5.1	98	6.1
Beh43	北厂	方解石	-2.5	161	3.2	Fzsh102	峰子山	方解石	-3.6	120	4.4
		方解石	-1.1	135	1.7			方解石	-4.0	83	4.9
		方解石	-2.8	130	3.6			方解石	-1.1	73	1.7
Beh52-5	北厂	石膏	-1.0	130	1.6	Xp99-23	西坡	方解石	-2.3	67	3.0
		石膏	-1.8	116	2.5			方解石	-2.3	59	1.7
		石膏	-2.1	112	2.8			方解石	-3.9	88	4.8
Xp00-9	西坡	闪锌矿	-3.3	133	4.1	Xp-007	西坡	石膏	-1.9	66	2.6
		天青石	-12.8	106	14.5			石膏	-4.6	54	5.5
		方解石	-3.5	129	4.3			石膏			
Xp01-2	西坡	方解石	-3.9	110	4.8			石膏			
		方解石	-4.9	128	5.9			石膏			
		方解石	-4.7	114	5.6			石膏			
Xp99-23	西坡	方解石	-3.2	105	4.0			石膏			
		石膏	-4.4	92	5.3			石膏			
		石膏	-2.1	101	2.8			石膏			
Xp-007	西坡	石膏	-14.5	98	16.4			石膏			
		天青石		128				石膏			
		天青石		105				石膏			

注: T_{ice} —冰点温度; T_h —均一温度; $w(NaCl_{eq})$ —盐度; 冷热台: LINKAM-TMS94 型。

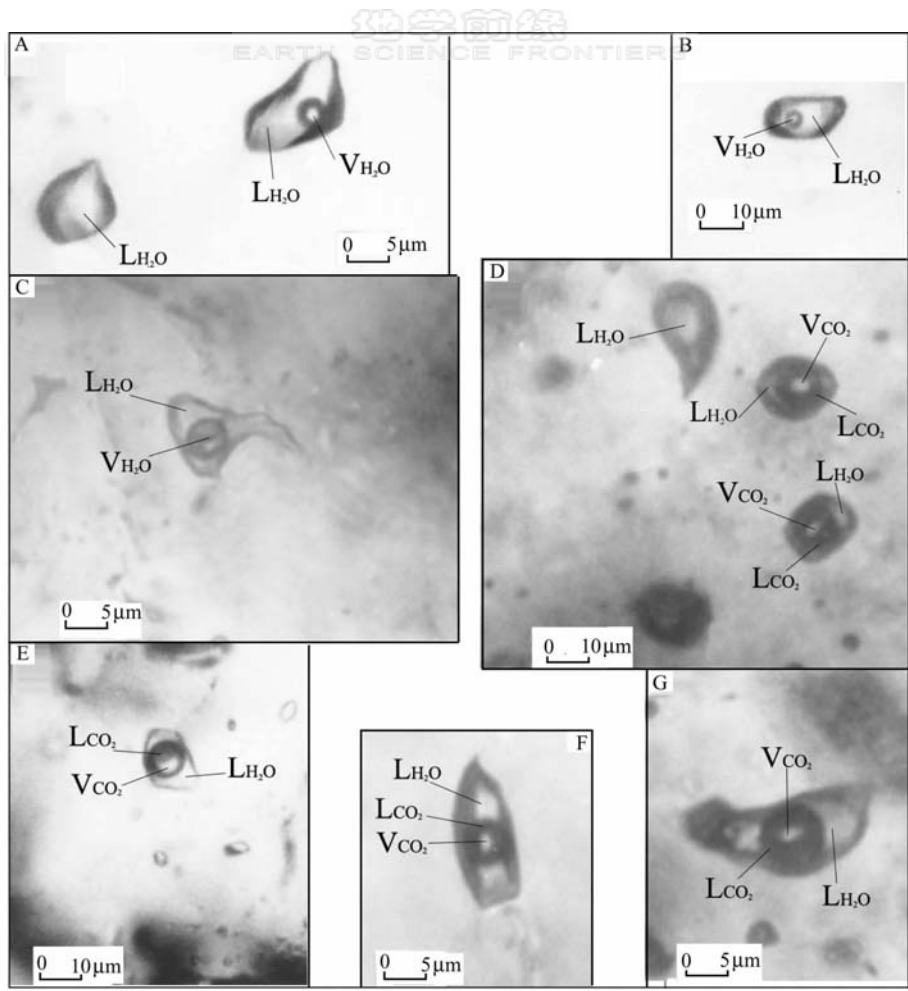


图3 室温条件下兰坪盆地金顶矿石中闪锌矿及共生、伴生石英、天青石和方解石晶体中流体包裹体的显微照片

Fig. 3 Photomicrographs of the fluid inclusion types from sphalerite and associated quartz, celestite, and calcite in the Jinding ores (room temperature)

A—天青石中一个单相液态水包裹体(左)和一个气液两相水包裹体(右);B—方解石中一个气液两相水包裹体;C—石英中一个气液两相水包裹体;D—石英中一个单相液态水包裹体(上)和闪锌矿中两个液态水-液态CO₂-气态CO₂三相包裹体(右);E—石英中一个液态水-液态CO₂-气态CO₂三相包裹体;F—天青石中一个液态水-液态CO₂-气态CO₂三相包裹体;G—天青石中一个液态水-液态CO₂-气态CO₂三相包裹体

NaCl,石膏 3.6% NaCl。所有流体包裹体盐度测定结果在金顶矿区表现出从东向西系统性升高趋势,成矿流体的平均盐度在矿区东部为 5.8% NaCl,在西部为 9.6% NaCl;不同矿物流体包裹体盐度统计,也分别呈现从矿区东部向西部升高之趋势,闪锌矿流体包裹体盐度从东部矿段平均 8.3% NaCl 升高到西部矿段 12.8% NaCl,天青石包裹体盐度从东部 5.4 到西部 14.6% NaCl,方解石从 3.6% 到 6.9% NaCl,石膏流体包裹体盐度从东部 3.0% 到西部 4.2% NaCl。

金顶矿区从东部向西部,流体包裹体均一温度

明显降低,而盐度系统性升高,揭示出成矿流体温度与盐度具有负相关关系,尤其是闪锌矿、石英、天青石等主成矿阶段热液矿物流体包裹体中这种关系更为显著(图 4)。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过程,前者可能来自深部,后者具有盆地流体性质;图 4 中左下方主要由石膏、方解石流体包裹体反映的低温低盐度区是流体成矿晚阶段的特点,可能与淡水下渗有关。

兰坪盆地重要矿床中富 CO₂ 流体包裹体曾有发现和研究^[15,30]。沉积岩容矿铅锌矿床中出现 CO₂

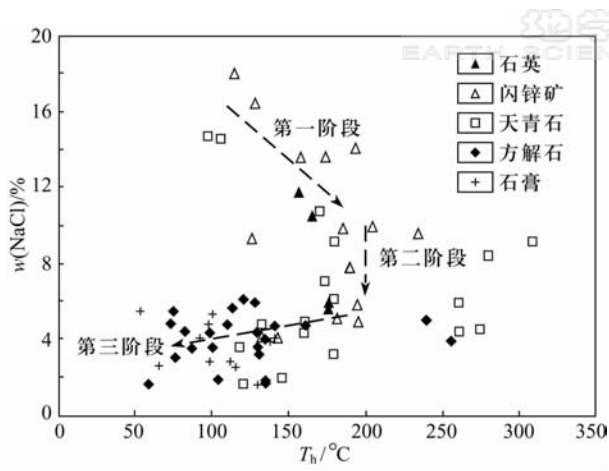


图4 兰坪盆地金顶大规模成矿的流体温度-盐度轨迹

Fig. 4 Plot of homogenization temperature (T_h) vs. salinity in the Jinding Zn-Pb deposit

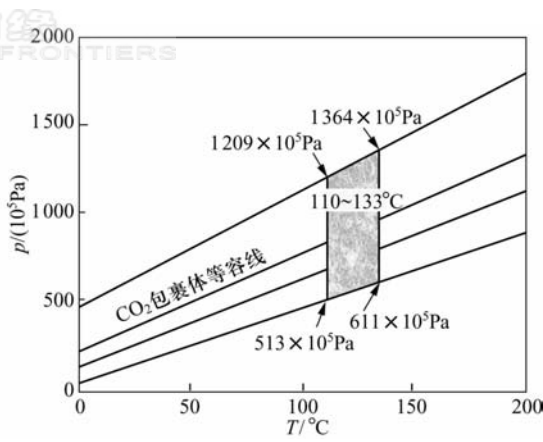


图5 CO₂ 流体包裹体的等容线
Fig.5 The isochors of CO₂ inclusions

流体包裹体是十分特殊的,可能指示了某种较高的流体压力。在金顶矿区兔子山矿段上三叠统灰岩碎裂裂隙中充填的含方铅矿、闪锌矿和黄铁矿的天青石-方解石网脉(图 2B)中观测到富 CO₂ 流体包裹体,包裹体中水和 CO₂ 比例明显变化,出现纯 CO₂ 包裹体,也出现纯水包裹体,这可能是多相不混溶流体捕获的结果。富 CO₂ 包裹体冷冻后回温,在-58.5~-57.0°C 时 CO₂ 熔化,说明包裹体流体成分主要是 CO₂ 和少量 CH₄;富 CO₂ 包裹体均一到液态的温度为-6.8~21.3°C,共生水溶液包裹体的均一温度为 110~133°C。将水溶液包裹体均一温度作为富 CO₂ 包裹体的捕获温度,利用 CO₂ 包裹体的等容线,估算的流体压力为(513~1 364)×10⁵ Pa(图 5),反映兰坪盆地大规模成矿过程中曾出现很高的流体压力。

3 盆地流体动力学过程模拟

为了探索兰坪盆地大规模成矿中出现很高流体压力的原因,利用 Basin2™ 软件^[31]对盆地流体压力的变化进行模拟,估算由于沉积物压实和构造推覆体所能造成的流体超压力大小^[28]。基于区域地质调查的兰坪盆地构造-沉积理想化模型(图 6)是:东西宽度 60 km 内厚度稳定的上三叠统到下白垩统(T₃-K₁,228~99.6 Ma)连续沉积地层,中-上白垩统(K₂₋₃,99.6~65.5 Ma)缺失,全盆地出现沉积间断,然后在盆地中部两个沉降中心发生古新统沉

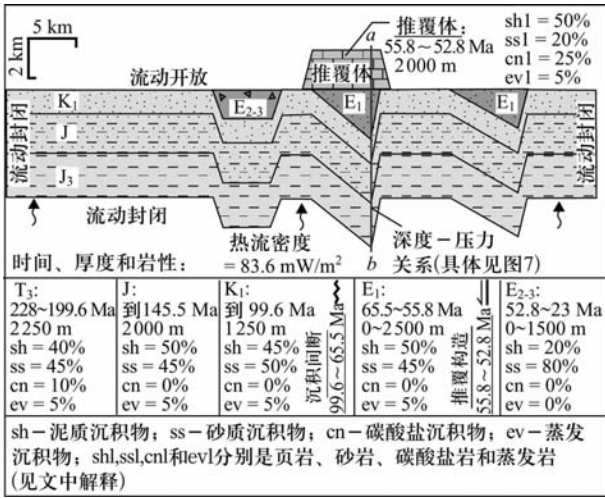


图6 兰坪盆地构造-沉积理想模型
Fig. 6 Conceptual structure-sediment model of the Lanping basin used in the numerical modeling

积(E₁,65.5~55.8 Ma),之后经历推覆构造过程(55.8~52.8 Ma),最后是始新统一渐新统沉积(E₂₋₃,52.8~23 Ma)。地层的岩性和厚度标示在图 6 中,假设盆地底和东、西两侧流体封闭,上部边界流体开放,83.6 mW/m² (2 HFU) 的热流均匀作用于盆地底部。砂岩、页岩、碳酸盐岩孔隙度和渗透率取 Basin2™ 软件^[31]提供的参数,即:砂岩的 $\phi_0 = 0.4$ 、 $\phi_1 = 0.05$ 、 $bpor = 0.5 \text{ km}^{-1}$ 、 $A_{perm} = 15$ 、 $B_{perm} = -3$ (达西对数值)、 $p_{kxkz} = 2.5$,页岩的 $\phi_0 = 0.55$ 、 $\phi_1 = 0.05$ 、 $bpor = 0.85 \text{ km}^{-1}$ 、 $A_{perm} = 8$ 、 $B_{perm} = -7$ (达西对数值)、 $p_{kxkz} = 10$,石灰岩的 $\phi_0 = 0.4$ 、 $\phi_1 = 0.05$ 、 $bpor = 0.55 \text{ km}^{-1}$ 、 $A_{perm} = 6$ 、 $B_{perm} = -4$ (达西对数值)、 $p_{kxkz} = 2.5$ 。蒸发沉积岩的孔隙度和渗

透率参数^[32]取 $\varphi_0=0.5$ 、 $\varphi_1=0.05$ 、 $b_{por}=10\text{ km}^{-1}$ 、 $A_{perm}=8$ 、 $B_{perm}=-8$ (达西对数值), $p_{kxkz}=20$ 。推覆构造通过在一个沉降中心之上 3 Ma 内加载 2 km 厚度的固结沉积岩体得以模拟, 固结砂岩、页岩、碳酸盐岩和蒸发岩的孔隙度和渗透率参数取未固结沉积物相应参数的修正值, 初始孔隙度(φ_0)等于最后孔隙度, 即认为推覆体内没有压实过程。

兰坪盆地流体动力学过程模拟结果显示 T_3 — K_1 期间仅出现极小流体超压力, 伴随 K_{2-3} 沉积间断而消失; E_1 时期两个沉降中心沉积体中的流体超压力可以忽略不计(图 7 中 a 线); 伴随推覆构造活动, 明显的流体超压力很快形成于推覆体之下(图 7 中 b 线), 最高达到 $170\times 10^5\text{ Pa}$ (图 8); 流体超压力在推覆体就位后逐渐消失, 并在 E_3 末期出现流体压力稍低于正常流体压力的情况(图 7 中 c 线)。

4 结论和讨论

兰坪盆地金顶大规模成矿主要阶段伴随着流体温度的不断升高和盐度的逐渐降低, 晚阶段流体温度和盐度均很低。主阶段成矿流体温度-盐度负相关性与两种不同性质流体混合过程的理论计算和模

拟实验结果^[33]吻合, 反映了一种深部来源的含矿高温低盐度流体与另一种盆地卤水性质的低温高盐度流体的混合过程; 晚阶段流体低温低盐度, 与大气降水下渗有关。事实上, 兰坪盆地新生代强烈活动的断裂系统能有效沟通深部^[3, 8, 15], 大量的地球化学证据也表明壳幔流体混合是兰坪金顶铅锌矿床的基本成矿过程: 同位素研究指示矿石中 85% 的成矿金属来源地幔, 15% 的金属为地壳混入, 全部硫来自盆地地层硫酸盐还原^[3, 6, 18-19], REE 和流体包裹体惰性气

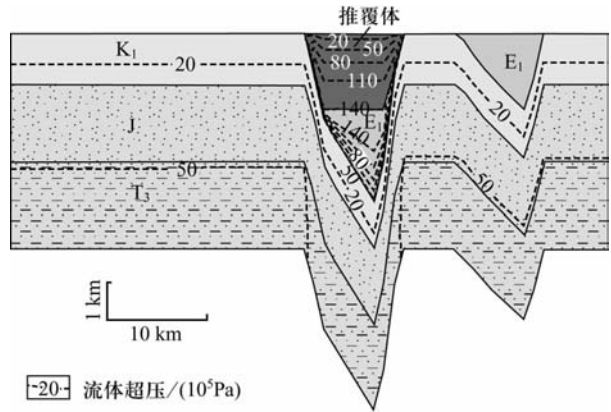


图 8 推覆构造结束(52.8 Ma)时兰坪盆地流体超压的分布

Fig. 8 Fluid overpressure distribution in the basin at the end of thrusting of the nappe (52.8 Ma)

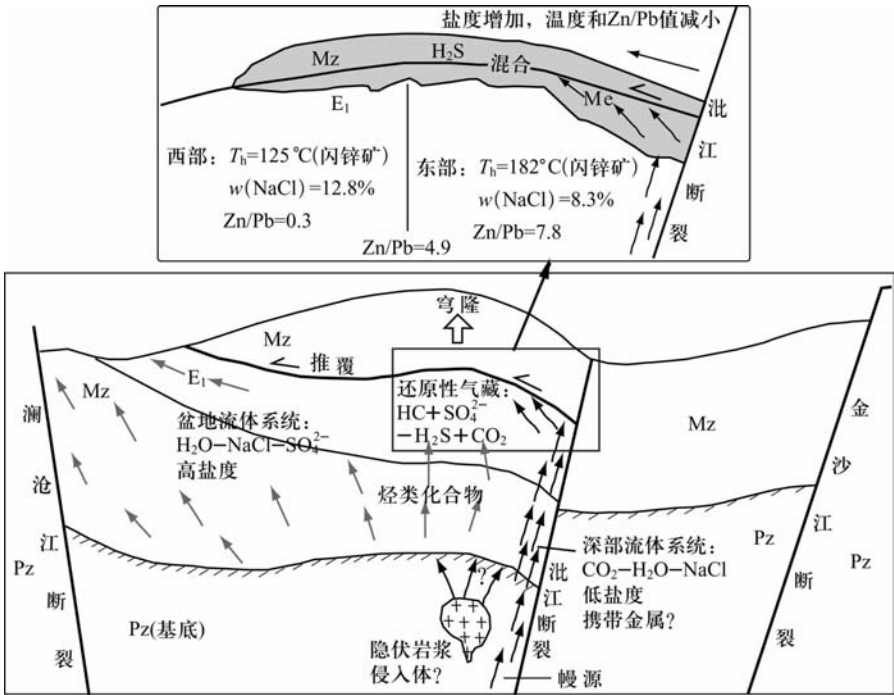


图 9 兰坪盆地金顶大规模成矿的流体动力学模型

Fig. 9 The fluid dynamic model of the Jinding large-scale mineralization in Lanping basin

体地球化学示踪出地幔流体参与大规模成矿^[3,16,24]。

富 CO₂ 流体包裹体揭示成矿流体曾出现 (513~1 364) × 10⁵ Pa 的高压, 盆地内重要矿床中多见水压碎裂矿石构造, 大规模成矿过程中无疑出现过流体超压。但是, 数值模拟试验表明盆地沉积和压实产生的流体超压可以忽略, 而区域构造推覆所产生的流体超压也不足以达到从流体包裹计算得出的压力值。那么, 兰坪盆地内与大规模成矿有关的流体超压到底是如何产生的呢? 兰坪—思茅盆地深部背景研究提出幔-壳复合成矿作用^[8,15], 滇西北区域壳幔结构的地球物理研究证明兰坪盆地之下存在明显地幔上涌, 中下地壳中发育可能指示热流囊或岩浆体存在的显著低速透镜体^[34], 盆地内可见新生代壳幔源碱性岩浆活动(如永平岩体、巍山岩体等), 成矿流体和成矿金属来源示踪指示显著的深部或地幔物质^[3,6,8,15-16,18-19,24]。我们认为成矿流体超压很可能是深部富 CO₂ 含矿流体注入引起。

金顶矿区从东部(沘江断裂)到西部, 成矿流体温度明显降低, 盐度系统性升高, 很可能指示富 CO₂ 含矿流体通过位于矿区东部的沘江断裂从深部注入金顶矿区(穹隆构造), 向西运移并与盆地卤水发生混合反应而沉淀出超量金属硫化物(图 9)。业已证明沘江断裂(区域上的兰坪-思茅断裂)深切岩石圈地幔^[8,15,34-35], 是重要的导矿构造。结合矿田构造^[12]、矿床地质^[1,3,6,7,9-11,29]、① 和有机物质及油气成藏研究^[36]、②, 本文推断金顶矿田先后经历了中—新生界沉积、推覆构造、局部穹隆和油气成藏、深部含矿流体沿导矿构造注入金顶穹隆并发生混合反应而大规模成矿(图 9)等地质过程。金顶穹隆中很可能发生的化学和动力学过程是盆地卤水带来的 SO₄²⁻ 被地下水中的细菌或聚集于穹隆中的油气大量还原成 H₂S, 而形成 H₂S 气藏; 正是深部注入的铅锌离子(团)与气藏中 H₂S 的快速反应而集中沉淀在金顶穹隆中形成超大型矿床(图 9)。

感谢《地学前缘》编辑部、主编翟裕生院士和本期特约主编陈建平教授的约稿, 感谢地质过程与矿产资源国家重点实验室(中国地质大学(北京))和加拿大 Regina 大学地质流体实验室的支持, 感谢莫宣学教授、覃功炯教授、罗君烈教授级高工和秦德厚教授高工在兰坪盆地成矿学研究中的帮助。

References:

[1] Zhu S Q, Qin G J, Wen C Q, et al. The Jinding super large-

scale lead-zinc deposit, Yunnan, China[M]// Tu G C, et al. The super large-scale ore deposit in China (I). Beijing: Science Press, 2000: 65-87(in Chinese).

- [2] Deb M, Goodfellow W D. Sediment-hosted lead-zinc sulphide deposits[M]// Attributes and models of some major deposits in India, Australia and Canada. [S. l.]: Narosa Publishing House, 2004: 1-367.
- [3] Xue C J, Chen Y C, Wang D H, et al. Geology and isotopic composition of helium, neon, xenon and metallogenic age of the Jinding and Baiyangping ore deposits, northwest Yunnan, China[J]. Science in China: Series D, 2003, 46: 789-800.
- [4] Sangster D F. Mississippi valley-type and Sedex lead-zinc deposits: a comparative examination [J]. Transaction—Institution of Mining and Metallurgy, Sect. B: Applied Earth Sciences, 1990, 99: 21-42.
- [5] Large D, Walcher E. The Rammelsberg massive sulfide Cu-Zn-Pb-Ba-deposit, Germany: an example of sediment-hosted, massive sulfide mineralization [J]. Mineralium Deposita, 1999, 57: 1-7.
- [6] Xue C J, Zeng R, Liu S W, et al. Geologic, fluid inclusion and isotopic characteristics of the Jinding Zn-Pb deposit, Western Yunnan, China: a review[J]. Ore Geology Reviews, 2007, 31: 337-359.
- [7] Kyle J R, Li N. Jinding: a giant Tertiary sandstone-hosted Zn-Pb deposit, Yunnan, China[J]. SEG Newsletter, 2002 (50): 1, 9-16.
- [8] Xue C J, Liu S W, Chen Y C, et al. Giant mineral deposits and their geodynamic setting in the Lanping basin, Yunnan, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78: 368-374.
- [9] Shi J X, Yi F H, Wen Q D. The rock-ore characteristics and mineralization of Jinding lead-zinc deposit, Lanping[J]. Yunnan Geology, 1983, 2(3): 179-195(in Chinese).
- [10] Bai J F, Wang C H, Na R X. Geological characteristics of the Jinding lead-zinc deposit in Yunnan with a special discussion on its genesis[J]. Mineral Deposits, 1985, 4(1): 1-9(in Chinese).
- [11] Gao G L. Review of geological origin about Jinding lead-zinc ore deposit[J]. Earth Science, 1989, 14(5): 468-475(in Chinese).
- [12] Wu G G, Wu X D. A preliminary study on the tectonic evolution and mineralization regularity of the Jinding lead-zinc deposit, Yunnan Province[J]. Earth Science, 1989, 14(5): 477-486(in Chinese).
- [13] Zhao X Y. On the genesis of the Jinding lead-zinc ore deposit in Yunnan[J]. Earth Science, 1989, 14(5): 523-530(in Chinese).

① Li N. Depositional controls and genesis of the Jinding sandstone-hosted Zn-Pb deposit, Yunnan Province, Southwest China[D]. Austin: University of Texas at Austin, 1998.

② 薛春纪, 高永宝, 曾荣, 等. 滇西北兰坪盆地金顶超大型矿床有机岩相学和地球化学. 岩石学报, 2007(评审中).

- nese).
- [14] Hu M A. A preliminary evaluation of the mineralization and their characteristics on the karst-type lead-zinc deposit by the exemplification of Jinding, Yunnan Province[J]. Earth Science, 1989, 14 (5): 531-538(in Chinese).
 - [15] Yin H H, Fan W M, Lin G. The deep factor of geodepression basin evolution and the mineralization of crust-mantle mixing in Lanping-Simao, Yunnan[J]. Tectonics and Metallogenic Geology, 1990, 14(2): 113-124(in Chinese).
 - [16] Wang J B, Li C Y. REE geochemistry of the Jinding super large Pb-Zn deposit[J]. Geochimica, 1991, 19(4): 359-365 (in Chinese).
 - [17] Qin G J, Zhu S Q. The ore-forming model of the Jinding lead-zinc deposit and prediction[J]. Yunnan Geology, 1991, 10(2): 145-190(in Chinese).
 - [18] Zhou W Q, Zhou Q L. A study on the isotopic composition of Pb and S in the Lanping Pb-Zn deposit, Yunnan Province[J]. Geochimica, 1992, 20(2): 141-148(in Chinese).
 - [19] Zhang Q. Pb isotopic composition of Jinding super-large Pb-Zn in Yunnan Province and discussion on the sources of lead [J]. Geology and Prospecting, 1993, 29(5): 21-28 (in Chinese).
 - [20] Ye Q T, Hu Y Z, Yang Y Q. Regional geochemistry background and the gold-silver-lead-zinc mineralization in Sanjiang area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 217-246(in Chinese).
 - [21] Luo J L, Yang J Z. The Tethyan evolution and the mineralization of the main metal deposits in Western Yunnan[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 149-239 (in Chinese).
 - [22] Wang J H, Yan W, Chang X Y, et al. Continental hydrothermal sedimentation; a case study of the Yunnan Area, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 79-89 (in Chinese).
 - [23] Hu R Z, Zhong H, Ye Z J. Helium and argon isotope geochemistry of Jinding large-scale lead-zinc deposit[J]. Science in China: Series D, 1998, 28(3): 208-213.
 - [24] Xue C J, Wang D H, Chen Y C, et al. Helium, argon, and xenon isotopic compositions of ore-forming fluids in Jinding-Baiyangping polymetallic deposits, Yunnan, Southwest China [J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74(3): 521-528.
 - [25] Sun Y, Xu S Z. Paleohydrogeological analysis of ore fluid pathway of Jinding lead-zinc deposit [J]. Earth Science, 1989, 14 (5): 487-494(in Chinese).
 - [26] Xu Q D, Li J W. Migration of ore-forming fluids and its relation to zoning of mineralization in northern Lanping Cu-poly-metallic metallogenic area, Yunnan Province: evidence from fluid inclusions and stable isotopes [J]. Mineral Deposits, 2003, 22 (4): 365-376(in Chinese).
 - [27] Chi G, Qing H, Xue C, et al. An overpressured fluid system associated with the giant sandstone-hosted Jinding Zn-Pb deposit, western Yunnan, China[M]// Mao J, Bierlein F P. Mineral deposit research: meeting the global challenge, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005: 93-96.
 - [28] Chi G, Qing H, Xue C, et al. Modeling of fluid pressure evolution related to sediment loading and thrust faulting in the Lanping basin—implications for the formation of the Jinding Zn-Pb deposit, Yunnan, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 89: 57-60.
 - [29] Xue C J, Chen Y C, Yang J M. Jinding Pb-Zn deposit: geology and geochemistry [J]. Mineral Deposits, 2002, 21 (3): 270-277 (in Chinese).
 - [30] Xue C J, Chen Y C, Yang J M, et al. The CO₂-rich and hydrocarbon-bearing ore-forming fluid and their metallogenic role in the Lanping Pb-Zn-Cu-Ag ore-field, north-western Yunnan[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76 (2): 244-253 (in Chinese).
 - [31] Bethke C M, Lee M K, Quinodoz H, et al. Basin modeling with Basin2, a guide to using Basin2, B2plot, B2video, and B2view[M]. Urbana: University of Illinois, 1993: 225.
 - [32] Kaufman J. Numerical models of fluid flow in carbonate platforms: implications for dolomitization [J]. Journal of Sedimentary Research, 1994(A64): 128-139.
 - [33] Dubessy J, Derome D, Suasse J. Numerical modelling of fluid mixing in the H₂O-NaCl system—application to the North Caramal U prospect (Australia) [J]. Chemical Geology, 2003, 194: 25-39.
 - [34] Bian Q T. A discussion about the relationship between the super large-scale ore deposits and the tectonics of the mantle-crust structure (taking Yunnan as example) [M]// Tu G C, et al. The super large-scale ore deposit in China (I). Beijing: Science Press, 2000: 545-569(in Chinese).
 - [35] Guan Y, Wang A J, Li P W, et al. Characteristics of the middle axial tectonic belt in the Lanping-Simao basin, western Yunnan, and its research significance [J]. Geology in China, 2006, 33(4): 832-841(in Chinese).
 - [36] Fu X G, Lin L, Pang Y C, et al. The characteristics of organic matter and its mineralization in the Jinding lead-zinc deposit, Yunnan, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science Edition, 2006, 33(6): 621-630 (in Chinese).
- 参考文献:**
- [1] 朱上庆, 覃功炯, 温春齐, 等. 金顶超大型陆相碎屑岩铅锌矿床 [M]// 涂光炽, 等著. 中国超大型矿床 (I). 北京: 科学出版社, 2000: 65-87.
 - [9] 施加辛, 易凤煌, 文其镔. 兰坪金顶铅锌矿床的岩矿特征及成因 [J]. 云南地质, 1983, 2(3): 179-195.
 - [10] 白嘉芬, 王长怀, 纳荣仙. 云南金顶铅锌矿床地质特征及成因初探 [J]. 矿床地质, 1985, 4(1): 1-9.
 - [11] 高广立. 论金顶铅锌矿床的地质问题 [J]. 地球科学, 1989,

- 14(5): 468-475.
- [12] 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[J]. 地球科学, 1989, 14(5): 477-486.
- [13] 赵兴元. 云南金顶铅锌矿床成因研究[J]. 地球科学, 1989, 14(5): 523-530.
- [14] 胡明安. 试论岩溶型铅锌矿床的成矿作用及其特点——以云南金顶矿床为例[J]. 地球科学, 1989, 14(5): 531-537.
- [15] 尹汉辉, 范蔚茗, 林舸. 云南兰坪——思茅地洼盆地演化的深部因素及幔-壳复合成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 1990, 4(2): 113-124.
- [16] 王京彬, 李朝阳. 金顶超大型铅锌矿床 REE 地球化学研究[J]. 地球化学, 1991, 19(4): 359-365.
- [17] 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.
- [18] 周维全, 周全立. 兰坪铅锌矿床铅和硫同位素组成研究[J]. 地球化学, 1992, 20(2): 141-148.
- [19] 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.
- [20] 叶庆同, 胡云中, 杨岳清. 三江地区区域地球化学背景和金银铅锌成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 217-246.
- [21] 罗君烈, 杨荆舟. 滇西特提斯的演化及主要金属矿床成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 149-239.
- [22] 王江海, 颜文, 常向阳, 等. 陆相热水沉积作用——以云南地区为例[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 79-89.
- [25] 孙勇, 许绍倬. 云南金顶铅锌矿床成矿溶液运移通道的古水文地质分析[J]. 地球科学, 1989, 14(5): 487-494.
- [26] 徐启东, 李建成. 云南兰坪北部铜多金属矿化区成矿流体流动与矿化分带——流体包裹体和稳定同位素依据[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 365-376.
- [29] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民. 金顶铅锌矿床地质——地球化学[J]. 矿床地质, 2002, 21(3): 270-277.
- [30] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 等. 滇西北兰坪铅锌铜银矿田含烃富 CO₂ 成矿流体及其地质意义[J]. 地质学报, 2002, 76(2): 244-253.
- [34] 边千韬. 地球壳幔结构构造与超大型矿床形成关系初议(以云南地区为例)[M]//涂光炽, 等著. 中国超大型矿床(I). 北京: 科学出版社, 2000: 545-569.
- [35] 管烨, 王安建, 李朋武, 等. 云南兰坪—思茅盆地中轴构造带的特征及其研究意义[J]. 中国地质, 2006, 33(4): 832-841.
- [36] 付修根, 林丽, 庞艳春, 等. 云南金顶铅锌矿床中的有机质特征及成矿作用探讨[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2006, 33(6): 621-630.