

兰坪金顶铅锌硫化物成矿中硫化氢成因

高永宝^{1,2}, 薛春纪³, 曾 荣²

(1 中国地质调查局 西安地质调查中心, 陕西 西安 710054; 2 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;
3 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)

摘要: 滇西北兰坪金顶超大型铅锌矿床是目前中国最大的铅锌矿床, 也是世界上形成时代最新且唯一的陆相沉积岩容矿的超大型铅锌矿床。为探讨金顶铅锌矿所需大量硫化氢的形成机理, 对矿区含有机质包裹体均一温度、硫同位素、碳同位素进行了测试、整理和分析。研究表明: 金顶矿区广泛分布的石膏、硬石膏和丰富的有机物质为生成大量硫化氢提供了重要条件; 在早期成岩-矿化阶段, 温度相对较低, 以生物还原作用产生硫化氢为主; 在主成矿期, 伴随着深部幔源流体的上涌, 温度升高, 油气的高温热化学还原作用产生大量硫化氢。

关键词: 硫化氢; 生物还原作用; 热化学还原作用; 金顶铅锌矿床; 兰坪盆地

中图分类号: P611; P593 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)04-0367-06

Forming Mechanism of H₂S in the Jinding Pb-Zn Deposit, Lanping Basin, Northwest Yunnan Province

GAO Yong-bao^{1,2}, XUE Chun-ji³, ZENG Rong²

(1 Xi'an Center of China Geology Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2 School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract The Jinding giant Pb-Zn deposit in Lanping basin of Yunnan Province is the largest Pb-Zn deposit in China, and also the youngest and only continental sediment-hosted super-large Pb-Zn deposit in the world. In order to study the forming mechanism of H₂S, organic inclusions, sulfur isotopes and carbon isotopes were tested and analyzed. The gypsum and kinds of organic matters were all suitable for forming plenty of H₂S. In the primary diagenesis mineralization stage, the temperature was relatively lower and the forming mechanism of H₂S was mainly bacterial sulphate reduction. While in the major mineralization stage, the temperature rose with the rising of fluid from mantle, and the forming mechanism of H₂S was mainly thermochemical sulphate reduction of oil and gas.

Key words: hydrogen sulphide; bacterial sulphate reduction; thermochemical sulphate reduction; Jinding Pb-Zn deposit; Lanping basin

0 引言

一直以来, 硫化物矿床中 H₂S 的来源备受关注^[1-2]。目前多数学者认为其 H₂S 主要来源于干酪根中含硫有机物的热裂解(简称 TDS)、地层中沉积硫酸盐(主要是石膏和硬石膏)的细菌还原作用(简

称 BSR)^[3-4] 或高温热化学还原作用(简称 TSR)^[5-7]。

滇西北兰坪盆地金顶矿床是目前中国最大的铅锌矿床, 也是世界上形成时代最新且唯一的陆相沉积岩容矿的超大型铅锌矿床^[8-9], 在金顶小于 8 km² 范围内形成铅锌硫化物矿石超过 2.2 × 10⁸ t^[10], 成矿过程中所需 H₂S 量约 317 × 10⁴ m³, 这些

收稿日期: 2008-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40472054; 40272050); 国家重点基础研究发展计划项目(2002CB4126007)

作者简介: 高永宝(1982-), 男, 辽宁大连人, 工学硕士, 从事成矿规律与成矿预测研究。E-mail: gaoyongbao2006@126.com

还原硫如何形成受人关注。矿石中硫化物矿物具微晶结构,说明金属硫化物快速集中沉淀^[1]。当前普遍承认引起超量硫化物快速集中沉淀的大量 H_2S 来自盆地地层中蒸发沉积硫酸盐还原^[11-15],但尚缺乏金顶 H_2S 形成机理中深入研究。基于成矿流体的主体是兰坪沉积盆地热卤水的认识,有研究者推测金顶硫酸盐还原剂是地下水中的细菌^[16-17];另外,金顶矿区岩石和矿石中观测到包括重油、轻油和天然气在内的多类流体有机质和不同成熟度的固体有机质^[18-19],在天青石、方解石和闪锌矿晶体中发现石油和烃类流体包裹体^[20-21],有学者基于对这些不同产状和形式有机质的地球化学研究,初步提出硫酸盐的油气热化学还原认识^[21-22]。

笔者论述了金顶形成大量 H_2S 的膏岩、烃源条件,通过对含有机质包裹体均一温度、硫同位素、碳同位素的测试、整理和分析,深入探讨了 H_2S 形成的可能机理,为进一步认识金顶铅锌矿床的成矿作用提供依据。

1 成矿地质背景和矿床地质

云南金顶铅锌矿床位于西南三江褶皱系南段的兰坪中—新生代盆地,处在澜沧江与金沙江—哀牢山两个构造带之间的昌都—思茅微板块,东侧与扬子板块相接,西侧与藏滇板块毗邻^[13]。受金沙江洋和澜沧江洋相向俯冲以及印度与欧亚板块持续作用影响,兰坪盆地内在古特提斯基础上先后沉积中—新生界海相、陆相碳酸盐岩、火山岩和碎屑岩建造,地层中有多个陆相含膏岩层位,存在多个沉积间断。以盆地东西边缘金沙江—哀牢山断裂和澜沧江断裂及盆地中央兰坪—思茅断裂为主构成的盆地断裂系统深达下地壳、上地幔,同时存在近东西向隐伏构造,它们共同控制了盆地的构造演化:印支期为残留海性质,燕山期是拗陷盆地,喜马拉雅期属走滑拉分盆地。受印度板块与欧亚板块碰撞作用过程制约,板内构造体制下的深大断裂和岩浆活动、地幔扰动和地幔流体上涌、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兰坪盆地的基本成矿地质背景^[23]。

金顶矿区大致经历了中—新生界沉积作用、推覆活动、局部热穹隆、穹隆破裂等地质过程,油气成藏和金属成矿可能伴随推覆构造、局部穹隆化和热液流体活动先后发生。矿区中—新生界受推覆构造影响,较老地层被多次推覆到较新地层之上,形

成多个推覆构造面。局部穹隆化过程使推覆构造面和其上下地层发生变形,形成金顶穹隆。穹隆核心由虎头寺组(K_2h)和云龙组(E_1y)正常层序(原地系统)构成,围绕穹隆核心向外围依次为景星组(K_1j)、花开左组(J_2h)、麦初箐组(T_3m)和三合洞组(T_3s)等倒转层序构成的外来系统。围绕金顶穹隆,矿区内环状分布着北厂、架崖山等 7 个矿段,主要金属矿体呈板状、脉状产在主推覆构造面上下的景星组和云龙组陆相碎屑岩中,受穹隆化的推覆构造—岩性圈闭控制,典型矿石结构是硫化物热液矿物交代高孔渗碎屑岩中钙质胶结物形成的胶结结构,微晶—胶状构造。成矿时间与该区喜马拉雅期碱性岩浆活动开始的时间(68 Ma)相当^[8]。

2 金顶矿床具备产生大量 H_2S 的条件

2.1 膏岩条件

国内外研究成果表明,碳酸盐—蒸发岩剖面中的硫酸盐(石膏)是 H_2S 形成的基础^[24-25],硫酸盐(或石膏)是 H_2S 最主要来源。金顶矿床中硫来源于中—新生界蒸发沉积膏盐已没有争议^[11, 26]。

兰坪盆地中—新生界蒸发沉积大量硫酸盐岩。在金顶矿区几乎各个矿段都有大量石膏产出,主要集中在跑马坪、北厂、架崖山,仅跑马坪矿段石膏储量就达 $16\,622 \times 10^4\text{ t}$,达到大型规模。石膏在平面上略显断续环状围绕铅锌矿体展布,形成明显的分带特征(图 1)。石膏主要呈透镜状、纹层状,多沿层产于上三叠统三合洞组以及铅锌矿体上、下及边部的云龙组上段的层位中,同时这也是金顶古油藏的所在,具层理结构,常见夹灰岩条纹条带。矿区广泛分布的石膏、硬石膏为生成大量 H_2S 提供了重要硫源。

2.2 烃源条件

金顶矿区烃源岩主要为三叠系灰黑色、深灰色海相/泻湖相泥灰岩/富碳灰岩^[27],广泛分布于上三叠统三合洞组中,还原环境沉积,厚度达 185~395 m。其有机质含量丰富,有机碳为 3.28%,氯仿沥青“A”为 524.6×10^{-6} ,以腐泥型有机质为主。薄层含碳灰岩的镜质组反射率平均为 0.46,泥灰岩镜质组反射率平均值相对较高,为 0.50^[18]。总的来说,烃源岩成熟度相对较高,泥灰岩的生烃能力好于含碳灰岩。目前研究证实,在金顶穹隆形成之后,穹隆中有古油藏存在^[21, 27],这为 BSR 和 TSR 生成 H_2S 提供了重要保障。

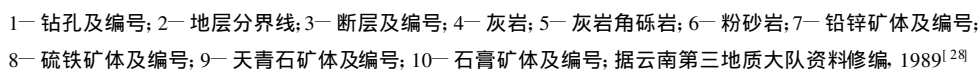


Fig. 1 Geological Section of Beichang-Paomaping Ore Blocks in Jinding Deposit

3.1 温度

金顶矿区重晶石、沥青-方解石细脉中的方解石内多见石油和甲烷等含有机质包裹体,包裹体数量多,分布较广,小者 $2\text{ }\mu\text{m}$,大者 $12\text{ }\mu\text{m}$,气液比多分布在 $10\%\sim 20\%$,也有大于 50% 的包裹体。石

含有机质包裹体均一温度为 $76\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 281.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 平均为 $143.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (表 1)。从图 2 可以看出, 均一温度有 2 个峰值: $180\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $80\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 可见在金顶矿区存在高温和低温两种含有机质流体的活动, 这与矿区低温成矿阶段(即前期成岩-矿化阶段)和高温成矿阶段(即主成矿阶段)相对应。

表1 金顶矿床含有机质包裹体均一温度

Tab. 1 Data of Homogenous Temperature of Organic Inclusions in Jinding Deposit

序号	样品号	分布特征	均一温度/℃
1	PMP02	重晶石	105 1, 125 1, 150 6, 151 3, 164 5, 174 8, 180 3, 184 9, 185 0, 197 6, 198 5, 205 1, 210 1, 238 4, 241 3, 284 1
2	JY10	角砾岩方解石脉	140 5, 156 4, 168 4, 172 1, 173 1
3	PMP03	重晶石	124 1, 150 8, 176 7, 181 0, 185 1, 209 5, 219 7, 231 8, 252 4, 281 4
4	ZSHD-1	角砾岩方解石脉	93, 98, 103, 105, 107, 110
5	ZSHD-2	角砾岩方解石脉	78, 79, 82, 85
6	ZSHD-3	晚世代方解石	76, 79, 83, 82 2, 91 8, 92 6, 94 3
7	ZSHD-4	晚世代方解石	83, 87, 92 1, 95
8	ZSHD-5	晚世代方解石	82, 83, 84, 105, 108, 112

注: 1~3 在长安大学流体包裹体实验室完成测试, 仪器为 LINKAM-TMS94 冷热台; 4~8 引自张金亮等^[30], 2003

3.2 硫同位素

要依据之一。BSR 反应中硫同位素分馏较大, 试验显示单部分馏效应最大为 -46% ; 而自然界中可高

硫同位素分馏效应不同是判断 H_2S 来源的主

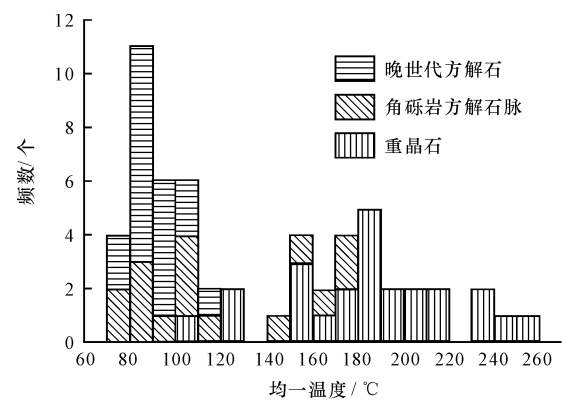


图 2 金顶矿床含有机质包裹体均一温度柱状图

Fig. 2 Homogenous Temperature of Organic Inclusions in Jinding Deposit

达—72‰, 被解释为多部分馏叠加的结果^[31]。从金顶矿区金属硫化物硫同位素的测试数据(图 3)^[32-33]可以看出: 硫同位素组成变化幅度较大, 大部分为负值, $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ 为—30.43‰~—1.71‰, 富轻硫同位素, 反映还原硫与地层中大量硫酸盐的还原作用有关。

矿区石膏岩以沉积成因硬石膏为主, 硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 为 14.59‰~15.81‰。天青石的硫同位素 $\delta^{34}\text{S}$ 为 14.20‰~—18.79‰, 分布范围较硬石膏稍离散, 平均值则接近(分别为 15.07‰和 13.43‰), 说明天青石的 SO_4^{2-} 直接来自石膏岩的溶解^[31]。

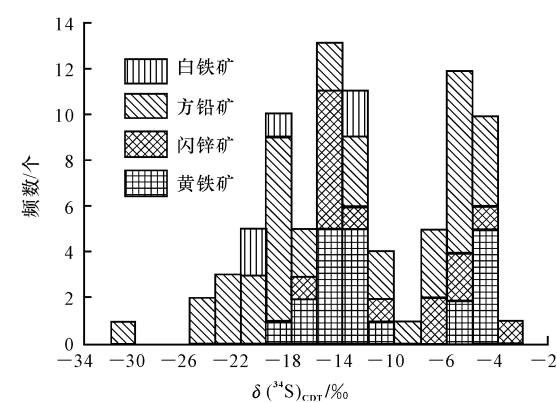


图 3 金顶矿床硫化物矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 组成

Fig. 3 Sulfur Isotopic Composition of Sulphide in Jinding Pb-Zn Deposit

从图 3 可以看出, 金顶矿区金属硫化物硫同位素具两方面特征。

(1) 硫同位素值具有两个峰: ①—10.5‰~—30.43‰, 平均值—19‰; ②—9.7‰~—1.71‰, 平均值为—4.93‰, 形成 2 个周期变化, 说明都为

还原特征硫, 但其作用方式可能有所不同。

(2) 两组金属硫化物硫同位素与硫酸盐矿物的分馏效应不同, 石膏-①组金属硫化物的分馏效应为 34.07‰, 接近于生物还原硫的分馏效应(35‰~46‰), 而较地下水中硫酸盐与硫化物两者的分馏效应偏大(20‰~27‰), 推测硫源以细菌-有机质还原硫酸盐为主; 石膏-②组金属硫化物的分馏效应相对不是很大, 为 20‰, 推测是由高温下油气的热化学还原作用产生大量 H_2S 造成的硫同位素动力学分馏或同位素平衡交换所致。

3.3 碳同位素

在加拿大阿尔伯达某矿区, 与 TSR 有关的方解石脉石, $\delta^{13}\text{C}$ 为—2.90‰~6.0‰^[7], 加拿大上泥盆统 Nisku 礁中与油气伴生的鞍状白云石其 $\delta^{13}\text{C}$ 为—18.0‰~—2.0‰, 而巴芬岛某 MVT 矿床中, 围岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 2.63‰, 脉石为—12.4‰~2.5‰^[34]。可见这种碳酸盐矿物所具有的偏负而且不均匀的 $\delta^{13}\text{C}$ 组成特征, 是硫酸盐热化学还原反应的重要标志之一。

对金顶矿区岩、矿石中有机物质碳同位素分析证明矿石和岩石的碳同位素组成十分一致(表 2), $\delta^{13}\text{C}$ 变化为—27.7‰~—4.9‰, 平均为—15.08‰, 表现出明显偏负而且不均一的特征, 说明在金顶矿区发生过硫酸盐热化学还原反应。

表 2 金顶矿床有机质碳同位素组成

Tab. 2 Carbon Isotopic Composition of Organic Matters in Jinding Pb-Zn Deposit

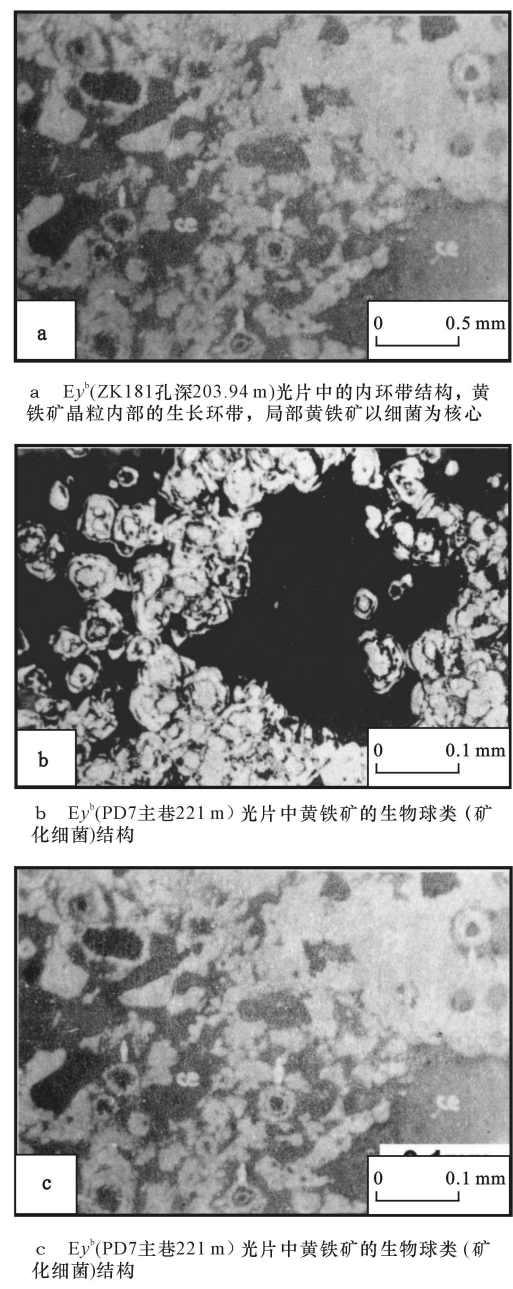
序号	样品号	采样点	矿物	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$
1	NC8	南厂	角砾岩型矿石中沥青	—27.5
2	NC12	南厂	角砾岩型矿石中沥青	—27.4
3	XP59	西坡	T_3s 中方解石脉内沥青	—27.4
4	JYS18	架崖山	E_1y^b 角砾岩型矿石中沥青	—27.7
5	J-35		方解石	—6.95
6	J-81		方解石	—7.42
7	J-92		方解石	—6.88
8	JCO-1		方解石	—8.10
9	JCO-2		方解石	—6.60
10	JCO-3		方解石	—4.90
平均				—15.08

注: 1~4 在国土资源部地质研究所同位素地质年代学实验室测试, 仪器为 MAT-251EM 质谱仪; 5~10 引自叶庆同等^[33], 1992

3.4 典型的微生物、细菌结构

在金顶矿区, 矿石标本及显微镜下都可观察到在早期成岩-交代成矿阶段形成的金属硫化物中发

现了草莓状黄铁矿以及典型的微生物、细菌结构(图 4), 这说明在金顶矿区曾经有过微生物以及细菌的活动; 另外, 细菌活动与矿化也有着非常密切的关系, 说明这些细菌在早期成岩-矿化阶段可能参与了金属成矿。



引自文献[28]

图 4 金顶矿区矿石及光片中的微生物、细菌结构
Fig. 4 Microbial and Bacteria Structure of Ores and Light Slices in Jinding Pb-Zn Deposit

4 结语

(1)金顶矿区广泛分布的石膏、硬石膏为生成

大量 H_2S 提供了重要硫源; 其丰富的有机物质为 BSR 和 TSR 生成 H_2S 提供了重要保障。

(2)通过对温度、硫同位素、碳同位素的测试分析, 结合典型的微生物、细菌结构可知: 在金顶矿区铅锌硫化物成矿中 H_2S 的成因是多样化的, 既包括硫酸盐微生物还原作用, 又包括油气的热化学还原作用, 但在成矿的不同阶段, H_2S 的形成方式不同。

(3)金顶矿区在早期成岩-矿化阶段, 温度相对较低, 盆地卤水携带大量硫酸盐还原细菌进入金顶穹隆, 与其内存在的大量有机质相互作用, 经过 BSR 产生 H_2S , 促使部分金属被还原沉淀; 在主成矿期, 伴随着深部幔源流体的上涌^[11, 20], 温度升高, 金顶矿区大量有机物质受热成熟演化为油气^[21, 27], 由于油气的 TSR 产生大量 H_2S , 金顶穹隆的高盐度、较强还原环境不仅为 H_2S 气体的保存提供了空间和良好的封闭条件, 也提供了保存条件, 使得产生的 H_2S 在金顶穹隆不断聚集, 为大规模快速金属成矿做好物质基础。

参考文献:

[1] Leventhal J S. Organic Matter and Thermochemical Sulfate Reduction in the Viburnum Trend Southeast Missouri[J] . Economic Geology, 1990 85: 622-632.

[2] 刘文均, 郑荣才. 硫酸盐热化学还原反应与花垣铅锌矿[J] . 中国科学: D 辑, 2000, 30(5): 456-463.

[3] Ohmoto H, Felder R P. Bacterial Activity in the Warmer, Sulphate-bearing, Archaean Oceans[J] . Nature, 1987, 328 (16):244-246.

[4] Vester F, Ingvorsen K. Improved MPN Method to Detect Sulphate Reducing Bacteria with Natural Media and Radio-tracer[J] . Applied and Environment Microbiology, 1998, 64 (5): 1700-1707.

[5] Krouse H R, Viau C A, Eliuk L S. Chemical and Isotopic Evidence of Thermochemical Sulphate Reduction by Light Hydrocarbon Gases in Deep Carbonate Reservoirs[J] . Nature, 1988, 333(2): 415-419.

[6] Machel H G. Bacterial and Thermochemical Sulfate Reduction in Diagenetic Settings-Old and New Insights[J] . Sedimentary Geology, 2001, 140: 143-175.

[7] Cai C F, Worden R H, Bottrell S H. Thermochemical Sulphate Reduction and the Generation of Hydrogen Sulphide and Thiols (Mercaptans) in Triassic Carbonate Reservoirs from the Sichuan Basin, China[J] . Chemical Geology, 2003, 202(1): 39-57.

[8] 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(8): 789-800.
- [9] 曾 荣, 薛春纪, 刘淑文, 等. 金顶超大型铅锌矿床成矿条件分析[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(2): 21-25.
- [10] 朱上庆, 覃功炯, 温春齐, 等. 金顶超大型陆相碎屑岩铅锌矿床[C] //涂光炽. 中国超大型矿床(I). 北京: 科学出版社, 2000.
- [11] Xue C J, Zeng R, Liu S W, et al. A Review of the Geologic Fluid Inclusion and Isotopic Characteristics of the Jinding Zn-Pb Deposit, Western Yunnan, China[J]. Ore Geology Reviews, 2007, 31: 337-359.
- [12] 高建华. 滇西金顶铅锌矿床和蒸发岩建造成因关系的初步探讨[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1989, 14(5): 513-522.
- [13] 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, 14(2): 113-124.
- [14] 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.
- [15] 付修根. 兰坪陆相盆地演化与金属矿床的形成[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(2): 26-32.
- [16] Li N. Depositional Controls and Genesis of the Jinding Sandstone-hosted Zn-Pb Deposit, Yunnan Province, Southwest China[D]. Austin: University of Texas, 1998.
- [17] Kyle J R, Li N. Jinding: A Giant Tertiary Sandstone-host Zn-Pb Deposit, Yunnan, China[J]. SEG Newsletter, 2002, 50(1): 9-16.
- [18] 胡明安. 有机质的热液成熟作用在云南金顶铅锌矿床形成过程中的意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1989, 14(5): 503-512.
- [19] 郭海花, 常象春, 张金亮. 兰坪拗陷上三叠统原油地球化学及有机成矿意义[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(4): 1-5.
- [20] 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.
- [21] 薛春纪, 高永宝, Chi G X, 等. 滇西兰坪盆地金顶矿田有机物质[C] //陈毓川. 第八届全国矿床会议论文集. 北京: 地质出版社, 2006.
- [22] Xue C J, Chi G X, Chen Y C, et al. Two Fluid Systems in the Lanping Basin, Yunnan, China: Their Interaction and Implications for Mineralization[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2006, 89: 436-439.
- [23] 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(2): 1-7.
- [24] Machel H G, Krouse H R, Sassen R. Products and Distinguishing Criteria of Bacterial and Thermochemical Sulfate Reduction[J]. Applied Geochemistry, 1995, 10(4): 373-389.
- [25] Orr W L. Changes in Sulfur Content and Isotopic Ratios of Sulfur During Petroleum Maturation—Study of Big Horn Basin Paleozoic Oils[J]. AAPG Bulletin, 1974, 58(11): 2295-2318.
- [26] 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.
- [27] 高永宝, 薛春纪, 曾 荣, 等. 滇西北兰坪盆地金顶超大型矿床有机地球化学特征及意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(增刊 1): 269-271.
- [28] 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[R]. 昆明: 云南省地质矿产局, 1989.
- [29] Davis J B, Stanley J P, Custard H C. Evidence Against Oxidation of Hydrogen Sulfide by Sulfate Ions to Produce Elemental Sulfur in Salt Domes[J]. AAPG Bulletin, 1970, 54(12): 2444-2447.
- [30] 张金亮, 常象春. 金顶铅锌矿床油气地球化学特征及其成矿作用探讨[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 33(2): 264-274.
- [31] Cai C F, Worden R H, Wolff G A. Origin of Sulfur Rich Oils and H₂S in Tertiary Lacustrine Sections of the Jinxian Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Applied Geochemistry, 2005, 20(7): 1427-1444.
- [32] 陈式房. 兰坪金顶铅锌矿床硫同位素研究[J]. 云南地质科技情报, 1992(1): 1-2.
- [33] 叶庆同, 胡云中, 杨岳清, 等. 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.
- [34] Machel H G. Saddle Dolomite as a By-Product of Chemical Complexation and Thermochemical Reduction[J]. Geology, 1987, 15: 936-940.