

# 中国西南低温成矿域铇矿床生物成矿初步研究\*

张 忠 张宝贵\*\* 胡 静 姚林波 田戈夫

(中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点实验室, 贵阳 550002)

**摘要** 从生物成矿研究现状, 铇矿床地质概况着手, 通过中国西南低温成矿域中铇矿床实例, 讨论铇富集成矿的地质背景和生物成矿机制. 在铇矿床生物成矿研究中, 着重从生物富集与铇有相关性, 岩矿石中微古动物富集铇, 富铇矿石中生物化石铸型, 生物硫参与成矿和铇矿石中富生物成因有机碳几个方面进行讨论. 铇矿床经历了同生生物富集和后成热液改造二个成矿阶段, 由于后成热液改造作用强烈, 使同生生物富集矿石中生物残留无几, 故使矿床呈现出热液改造矿床的面貌.

**关键词** 铇 铇矿床 生物成矿 生物化石铸型 铇超常富集 铇成矿模式

中国低温热液改造成矿域地域广阔, 矿种齐全, 类型之多, 规模之大, 组合之复杂, 可堪称世界低温热液改造矿床成矿域之最<sup>[1]</sup>. 在这一成矿域中蕴藏着丰富的矿产资源. 产出的矿床无论其规模和含量的巨大, 无论其矿种的多样和成矿作用的复杂都是世人瞩目. 这一地域赋存了包括Ti矿床在内的一批大型和超大型Hg, Sb, As, Pb, Zn, Sn, Au, Cd, Ge金属矿床和水晶、重晶石、冰洲石、萤石等非金属矿床. 迄今为止, 除中国外, 尚未见其他国家和地区有铇矿床的报道, 故研究铇矿床生物成矿中国应是首开先河. 生物成矿作用主要指生物在新陈代谢过程中对特定元素的吸收、富集和生物残骸骨架堆积成矿及金属储集<sup>[2~4]</sup>. 研究生物成矿, 特别是热液矿床的生物成矿, 人们的认识还不一致, 又多限于零星的生物成矿证

据上, 并带有一定的臆测. 在乌尔夫主编的 1~9 卷的《层控矿床和层状矿床》中提到的生物成矿实例就有很多臆测, 如南非太古代和元古代时期金矿化和藻类活动有密切相关性, 凡是藻类发育最兴盛的时期, 金矿化强度也高<sup>[5]</sup>. 在显生宙时, 一些铅锌矿在空间分布上常和礁体有关, 形成所谓的礁控矿床. 中国东川铜矿的马尾丝构造, 有人认为是一种矿化藻席构造<sup>[6]</sup>. 硫化物矿中的草莓状黄铁矿也有人认为是生物成矿. 中国秦岭地区层控金矿菌藻生物成矿和金属矿物生物组构的发现等<sup>[7,8]</sup>, 均不同程度与生物成矿有关.

从查阅国内外矿床学, 地球化学和生物学等论著表明, 不仅未见铇矿床报道, 而且在成矿上与铇关系密切的汞、砷、锑、铅、锌、金等热液矿床有关生物成矿的资料也甚少, 又多限于有机质成矿和模拟

收稿日期: 2006-01-10; 接受日期: 2006-03-23

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 40372047)

\*\* 联系人, E-mail: [zhangbg168@yahoo.com.cn](mailto:zhangbg168@yahoo.com.cn)

实验的一些间接证据研究上<sup>[7,9]</sup>, 如南斯拉夫的伊得利亚(Idrija)肾状结构的汞矿, 希腊的阿尔察梯砷矿床, 瑞士的伦哥巴契(Lengenbach)铅砷矿床和加拿大的 Pine Point 铅锌矿床等<sup>[10,11]</sup>。这些矿床均不同程度的含铊, 对它们的研究多限于有机质与成矿的间接讨论上, 尚未见有关生物成矿方面的专门报道。

在生物成矿研究中, 除对天然生物成矿现象的观察和研究, 如生物地层学、生物矿物学、矿石生物组构和生物化石铸型等研究外, 在研究方法上多采用古生物学研究成果, 结合矿床学、生物化学、生物物理学、微生物学、地球化学的理论和方法, 对地史时期金属矿床生物有机组成、类型、结构和成矿进行探索。用古今对比模拟生物成矿的方法, 模拟现代海洋(湖泊)或人工培养的菌藻生物对成矿元素的摄取, 富集和迁移等新陈代谢方面的研究, 进而推断古生物对成矿的贡献。铊这类的矿床都认为是无机成因的矿床即岩浆热液矿床或层控矿床。作者在铊矿床的研究过程中发现的一系列生物成矿现象和线索构筑了本文生物成矿初步探讨的内容和框架。本文以滥木厂和南华二个铊矿床为例, 对其生物成矿予以探讨。

## 1 铊矿床地质概况

中国已发现的铊矿床主要分布在西南低温成矿域的贵州和云南二省, 工作程度较低, 多限于矿床物质组成和生态环境工作, 由于该成矿域有得天独厚的有利成矿环境和丰富多样的古海(陆)相生物群落存在, 它们的演变和兴衰孕育了铊矿化和铊矿床的形成。本文将从海相-热液叠加型的贵州兴仁滥木

厂铊矿床和以陆相-沉积改造型的云南南华铊矿床为例对其地质概况进行讨论。

### 1.1 贵州滥木厂铊矿床

矿区位于右江褶皱带之六盘水断陷普安旋扭构造变形区, 弥勒-师宗断裂南东侧和赵家坪背斜南翼, 处于北东与东西向构造复合部位(图 1)。因复合作用构成滥木厂鼻状背斜呈北东 40°~60°分布, 长 720 m, 宽 250 m, 控制了铊矿床分布范围, 含矿地层主要为上二迭统龙潭组-长兴组, 次为下三迭统夜郎组<sup>1)</sup>。含矿围岩有砂岩, 泥质灰岩, 砂质黏土岩, 碳质粉砂岩, 燧石灰岩, 灰岩和页岩。由于含矿层岩性变化多样, 具明显的多层含矿, 有二十多个含矿段<sup>[12]</sup>。

矿床受岩性和构造双重控制, 大致沿层展布, 含矿体纵向上向南西倾伏, 略有起伏, 呈似层状, 扁豆状产出。横向上为透镜状, 鞍状。一般长 60~240 m, 宽 40~80 m, 最宽 120 m。厚 2~5 m, 最厚 17 m。含矿体多由若干个小矿体组成, 小矿体多呈条带状、囊状、串珠状等产出。一般长 2~10 m, 宽 2~4 m。矿石构造多样, 有条带状、浸染状、块状、结核状、网脉状、粉末状多孔状和晶簇状等。铊矿石有二种成因类型即同生生物沉积成因和后成热液改造成因。前者含丰富有孔虫, 苔藓虫和准直型贝等生物化石, 后者仅保留有生物化石铸型。矿石中含铊一般为  $n \times 10^{-4} \sim n \times 10^{-3}$ , 铊富矿石中含铊可达 5.22%~15.97%。已发现的铊矿物有红铊矿、斜硫砷汞铊矿、硫铁铊矿和铊明矾等(表 1)。共伴生矿物有辰砂、黄铁矿、白铁矿、雄黄、雌黄、石英、重晶石、方解石、高岭石、石膏、

表 1 铊矿物电子探针分析<sup>a)</sup>

| 矿物名称       | 化学式                                | 元素含量( $\times 10^{-2}$ ) |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      | 合计     |
|------------|------------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|--------|
|            |                                    | Tl                       | As    | S     | Hg    | Fe    | Pb    | Au   | Ag   | Sn   | Sb   | Cu   |        |
| 红铊矿(8)     | TlAsS <sub>2</sub>                 | 59.08                    | 21.81 | 18.12 | 0.18  | 0.02  | 1.61  | 0.11 | 0.11 | 0.07 | —    | 0.01 | 101.12 |
| 斜硫砷汞铊矿(13) | TlHgAsS <sub>3</sub>               | 35.29                    | 12.23 | 16.57 | 35.46 | 0.10  | —     | —    | 0.08 | —    | —    | 0.02 | 99.75  |
| 辉铁铊矿(6)    | TlFe <sub>2</sub> S <sub>3</sub>   | 49.13                    | 0.76  | 23.69 | 0.03  | 25.34 | 1.04  | —    | 0.13 | —    | 0.03 | 0.10 | 100.25 |
| 硫砷铊铅矿(7)   | PbTlAs <sub>5</sub> S <sub>9</sub> | 19.57                    | 34.51 | 25.91 | 0.07  | 0.06  | 19.01 | —    | 0.04 | —    | 0.03 | 0.01 | 99.21  |
| 硫铊矿(2)     | Tl <sub>3</sub> AsS <sub>3</sub>   | 68.86                    | 11.28 | 16.02 | 0.06  | 0.16  | 3.58  | —    | 0.15 | —    | —    | 0.10 | 100.21 |
| 硫铁铊矿(2)    | TlFeS <sub>2</sub>                 | 62.86                    | —     | 19.49 | 0.55  | 16.73 | —     | —    | —    | —    | —    | —    | 99.63  |
| 铊黄铁矿(20)   | (Fe,Tl)(S,As) <sub>2</sub>         | 6.98                     | 5.31  | 48.64 | —     | 38.63 | —     | —    | —    | —    | —    | —    | 99.56  |

a) 括号内为测定样品数; 空格为未测; —表示未测出; 电子探针分析精度 1%; 分析单位: 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点实验室

1) 贵州省区调队 1980 年资料

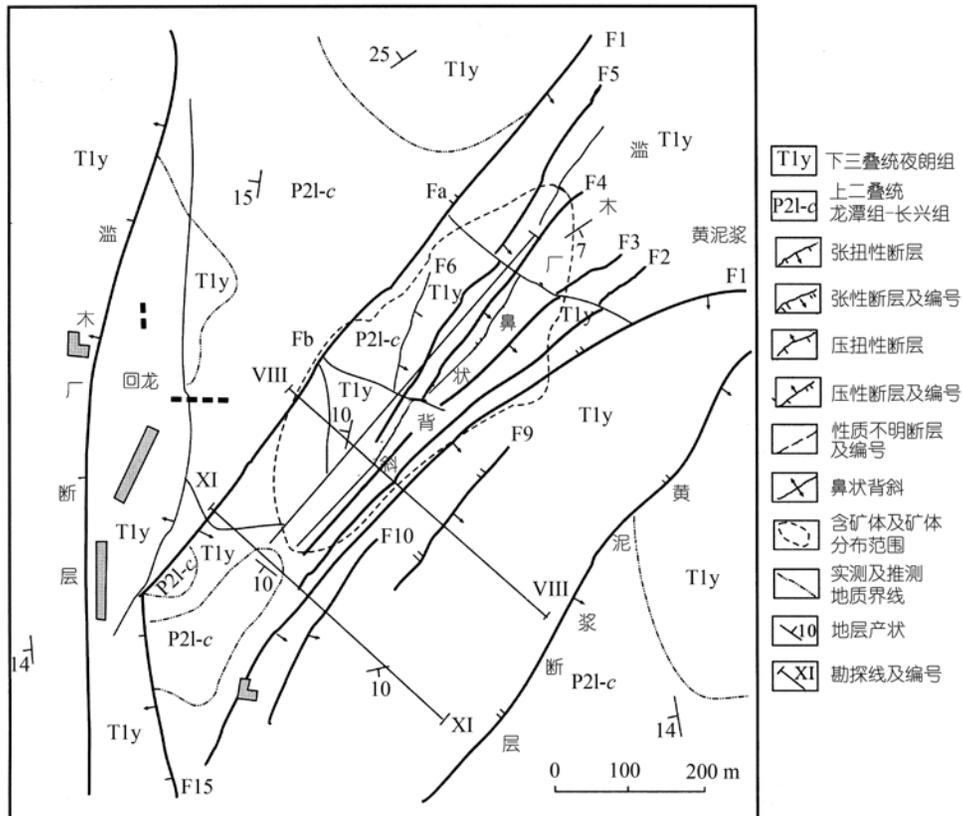


图 1 滥木厂铇矿床地质略图(据贵州省区调队, 1980)

水绿矾、铁铝矾、黄钾铁矾和褐铁矿等。

## 1.2 云南南华铇矿床

矿区位于华南地台滇东凹陷褶皱带东偏南西部分, 近马龙河褶皱带, 矿区附近构造受红河大断裂的影响, 构造线呈北北西方向, 褶皱为复式向背斜, 轴面多向南西倾(图 2)。断裂较大者有北西、北东和北北西三组, 北东走向的横断层与矿化密切<sup>1)</sup>。

矿区赋矿地层由下至上为打腊段( $J_3^b$ )、雄黄厂段( $J_3^c$ )和那阮段( $J_3^a$ )。打腊段厚度 242 m, 韵律性明显。每一韵律层自下而上粒度由粗变细, 从砂岩、粉砂岩开始, 以泥岩告终; 那阮段厚度 62 m, 为暗紫红色泥岩、粉砂质泥岩夹灰色薄层状泥质粉砂岩和细砂岩; 雄黄厂段, 俗称“黄层”, 总厚度 285 m, 是铇矿主要

赋矿层。铇矿体赋存于黑灰色细层纹状碳质泥质白云岩, 碳质泥质灰岩和白云质泥质岩相变带部位。含矿层不仅普遍含铇, 而且含有丰富的叶肢介、介形虫、瓣鳃类、腹足类和鱼类化石等, 为一套典型陆相碎屑沉积。在富集生物碎屑岩中, 铇有明显富集, 每每都是富铇矿石<sup>[13]</sup>。

铇矿化多层且连续, 长达 650~850 m, 仅雄黄厂段就见 15 个小矿化层。矿体呈似层状, 透镜状, 脉状展布与地层走向一致, 矿体沿走向有膨胀和收缩现象。最大含矿层沿走向长 800 m, 宽 1.02~1.10 m。矿床属于陆相沉积—改造型矿床。矿石结构构造多样, 有条带状、浸染状、交代状、残余状、角砾状、块状、胶状、脉状、晶簇状等, 以条带状和细密块状构造居多。矿石中铇含量多在  $n \times 10^{-4} \sim n \times 10^{-3}$ , 个别可达

1) 云南省地质局第十一地质队 1965 年资料

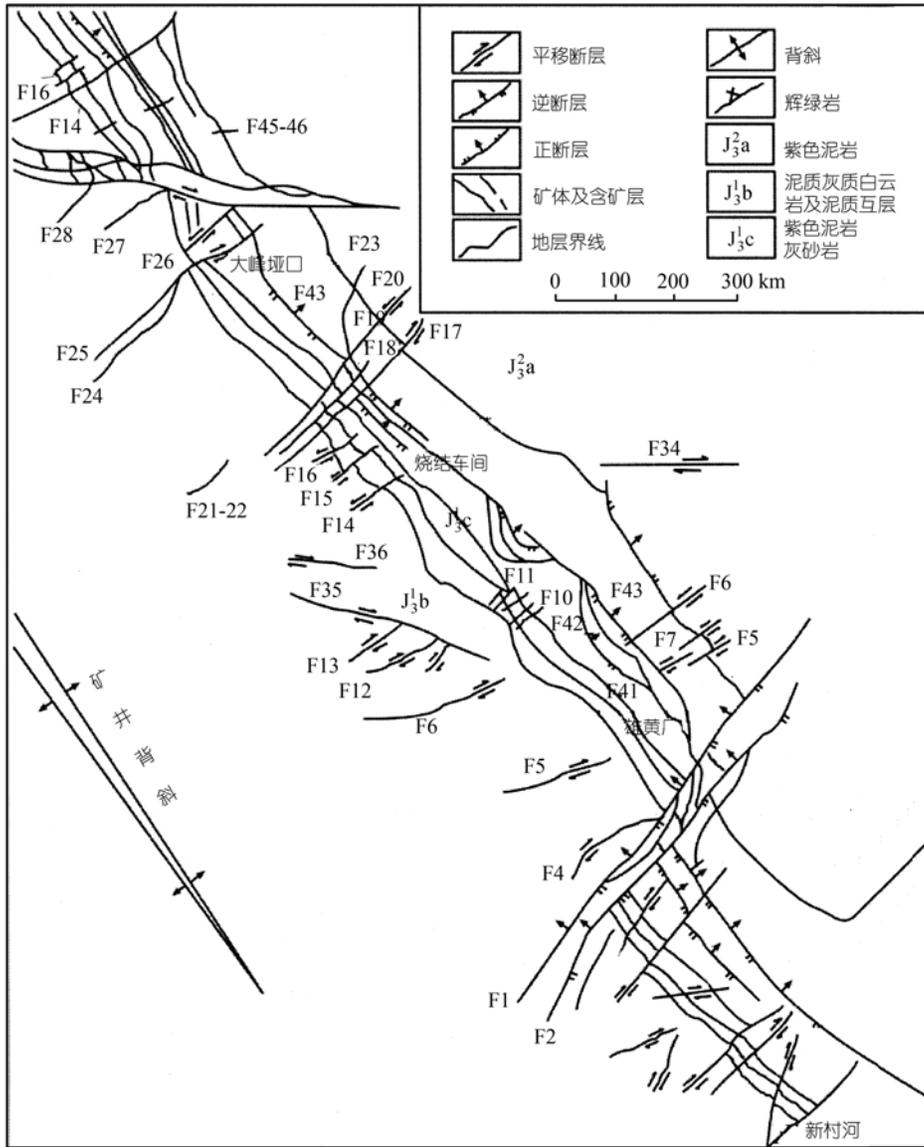


图 2 南华铀矿床地质略图(据云南省地质局第十一地质队, 1968)

$n \times 10^{-2}$ . 已发现的铀矿物有硫铀铀铅矿、辉铁铀矿、硫铀铀矿和铀黄铁矿等(表 1). 共生矿物有雄黄、雌黄、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、白云石、方解石、石英、重晶石等, 次生矿物有镁毒石、石膏、伊利石、针铁矿等.

## 2 铀矿床生物成矿研究

### 2.1 生物富集与铀有相关性

在海水(湖水)沉积物沉积的同时, 有孔虫类和介

形虫类等生物活体和/或死亡残骸不同程度地摄取和富集了 Tl, As, S 等成矿元素, 在海底或湖底形成含铀赋矿层, 并形成同生沉积铀矿石. 同生沉积铀矿石多呈条带状、层纹状、纹理状构造, 亦有块状和结核状构造, 与赋矿地层产状一致. 矿石矿物颗粒细小, 多小于 1 mm, 呈浸染状, 细碎屑结构. 矿石中含丰富的有孔虫类和苔藓虫类等微古动物化石. 矿石中铀含量高低与生物化石多少有密切关系. 分析铀矿床岩矿石中铀含量和相对应岩矿石薄片中所见化石个数

统计表明,在岩矿石中含铈小于  $20 \times 10^{-6}$  的多数样品中,在薄片见到化石很少,一般 0~4 个;在含铈  $(30 \sim 1500) \times 10^{-6}$  样品薄片见到化石个数稍多,一般 1~15 个;在 4 个铈富矿石  $(1900 \sim 3379) \times 10^{-6}$  中,薄片见到生物化石均超过 20 个(表 2). 在含铈岩矿石中生物(化石)分布不均匀,并形成多种生物密集区(图 3(a) ~ (d)). 在同生生物富集的岩矿石中生物化石多被细粒石英包裹,保存完好(图 3(e)~(f)). 但在热液交代的铈矿石中生物化石被交代呈铈矿物,仅保留生物化石铸型(图 4(a)~(d)). 在硅质结核中见有多种生物被铈矿物交代保留的生物化石铸型(图 4(e)). 在欧姆贝化石中可见热液交代形成的红铈矿(图 4(f)).

## 2.2 岩矿石微古动物富集铈

从南华和濫木厂铈矿床岩矿石,单矿物(石英和方解石)和微古动物化石中铈含量分析,在岩石化石中铈含量  $(20 \sim 60) \times 10^{-6}$ ,在单矿物化石中铈含量  $(320 \sim 570) \times 10^{-6}$ ,而在铈矿(化)石(岩)化石中铈含量

$(300 \sim 550) \times 10^{-6}$ ,分别为其赋存的岩矿石含量的 8~100 倍,422.2~549.5 倍和 2.1~13.4 倍(表 3),这一分析结果可推测,微古动物化石中高铈含量主要是由这些海(湖)生物在新陈代谢过程中摄取和浓集海(湖)水中分散铈所致.因为在特定的沉积成矿环境中,生物有较强的适应能力,摄取铈成矿完全可能. Trudinger 等<sup>[14]</sup>认为,一些微古生物从海水中富集某些元素可高过一百万倍以上.测定薄片微古动物(化石)周围的石英,方解石和黄铁矿中铈含量多在  $(1 \sim 2) \times 10^{-6}$ ,远低于微古动物(化石)中铈含量.岩矿石化石中铈含量  $(20 \sim 570) \times 10^{-6}$  已达到铈矿化和成矿指标<sup>[15,16]</sup>.这些均说明铈生物成矿现象.因为生物在其生命活动过程中,不断地从周围环境中摄取各种养分,进行新陈代谢作用,使大量有益/和有害的元素通过这种方式进入生物体内.

海洋地质研究和大洋钻探发现洋中脊黑烟囱附近热水沉积硫化物矿床的同时,还发现不靠光合作用而由热水系统供应食物和能量的自养生物群落称

表 2 铈矿床岩矿石中铈含量和微古动物化石数量<sup>a)</sup>

| 编号    | 岩石名称   | 铈含量( $10^{-6}$ ) | 薄片中化石个数 | 编号      | 岩石名称    | 铈含量( $10^{-6}$ ) | 薄片中化石个数 |
|-------|--------|------------------|---------|---------|---------|------------------|---------|
| NH-1  | 紫红色粉砂岩 | 0.1              |         | NH-53   | 铈矿化粉砂岩  | 4                | 1       |
| NH-7  | 硅质灰岩   | 0.1              | 1       | NH-52   | 铈矿化粉砂岩  | 7                | 2       |
| NH-9  | 泥质灰岩   | 0.7              |         | NH-55   | 铈矿化粉砂岩  | 8                | 4       |
| NH-10 | 白云质泥岩  | 0.7              | 2       | NH-56   | 铈矿化白云岩  | 3                | 1       |
| NH-14 | 白云质泥岩  | 0.8              | 3       | NH-59   | 角砾状铈矿石  | 19.7             | 2       |
| NH-19 | 泥质灰岩   | 2.7              | 1       | NH-02   | 条带状铈矿石  | 32.8             | 1       |
| NH-20 | 砂质泥岩   | 0.4              |         | NH-05   | 层纹状铈矿石  | 76.3             | 2       |
| NH-21 | 紫红色粉砂岩 | 0.3              |         | NH-08   | 风化铈矿石   | 71.5             | 5       |
| NH-22 | 钙质泥岩   | 0.4              | 3       | NH-02-3 | 层纹状铈矿石  | 80.9             | 3       |
| NH-23 | 粉砂质泥岩  | 0.2              | 1       | NH-02-2 | 条带状铈矿石  | 85.0             | 2       |
| NH-25 | 泥质灰岩   | 0.3              |         | NH-02-1 | 条带状铈矿石  | 83.6             | 8       |
| NH-26 | 粉砂质泥岩  | 0.1              |         | NH-61   | 富铈矿石    | 226              | 8       |
| NH-27 | 钙质泥岩   | 0.5              | 3       | NH-64   | 角砾状铈矿石  | 249              | 10      |
| NH-28 | 泥质灰岩   | 0.1              |         | NH-3    | 角砾状铈矿石  | 279              | 5       |
| NH-29 | 泥质白云岩  | 0.3              | 4       | NH-65   | 氧化铈富矿石  | 964              | 7       |
| NH-30 | 钙质泥岩   | 0.9              |         | NH-13   | 块状铈富矿石  | 1500             | 15      |
| NH-38 | 泥质粉砂岩  | 0.3              |         | NH-15   | 层纹状铈富矿石 | 1900             | >20     |
| NH-57 | 钙质粉砂岩  | 0.3              |         | NH-56-2 | 铈富矿石    | 1889             | >20     |
| NH-58 | 泥质白云岩  | 1.5              | 2       | NH-56-4 | 铈富矿石    | 2161             | >20     |
| NH-67 | 泥质白云岩  | 2.7              | 1       | NH-56-5 | 铈富矿石    | 3379             | >20     |
| 平均    |        | 0.67             | 1.05    | 平均      |         | 650.94           | >7.3    |

a) 原子吸收光谱法,精度 2%;化学分析:中国科学院地球化学研究所中心分析室

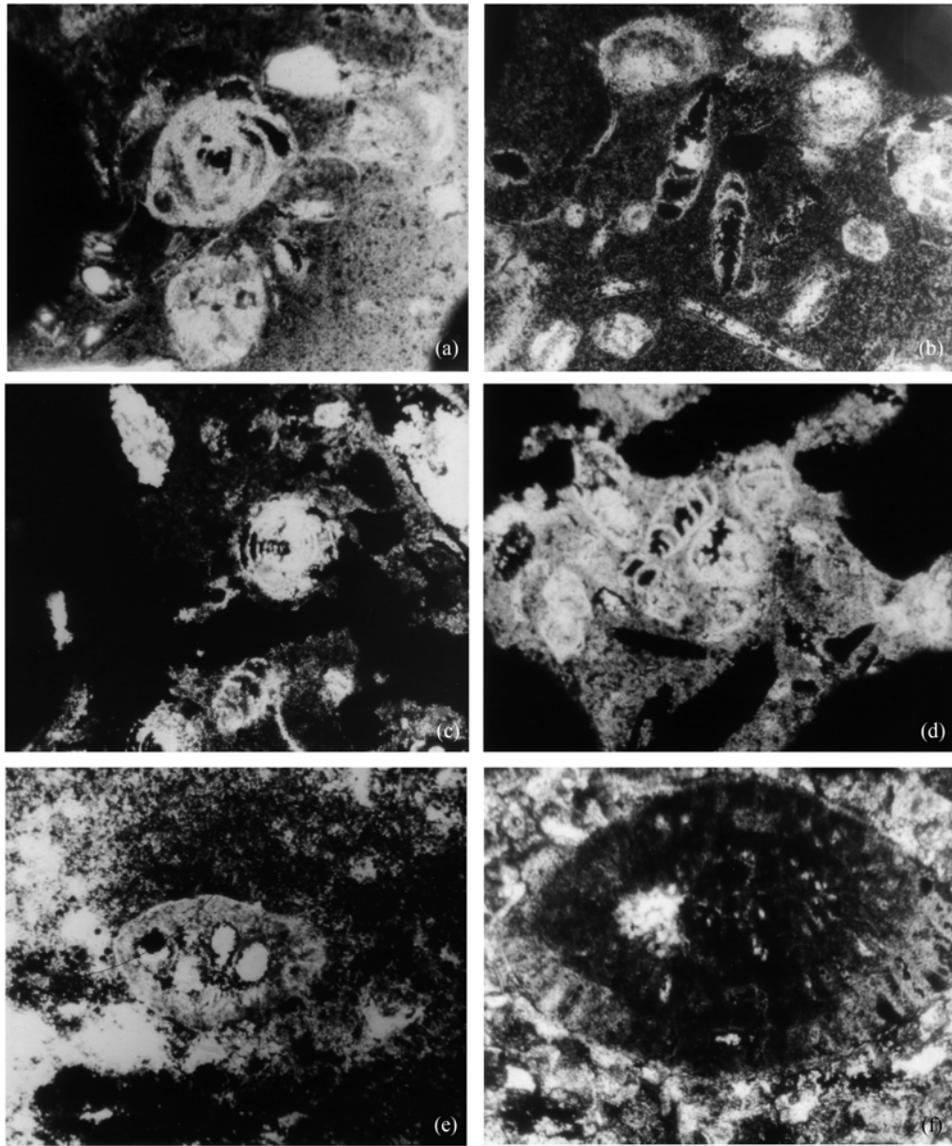


图 3

(a) 始瘤虫等, 被微粒石英包裹, 薄片,  $\times 30$ ; (b) 古盘虫等, 被微粒石英包裹, 薄片,  $\times 30$ ; (c) 多盘虫等密集区, 薄片,  $\times 30$ ;  
(d) 舌形虫等密集区, 薄片,  $\times 30$ ; (e) 硅化(白色)多孔苔藓虫, 薄片,  $\times 30$ ; (f) 硅化(白色)南岭蜓, 薄片,  $\times 30$

火山口生物群, 包括细菌、藻类、蠕虫、双壳类、鱼类等. 他们在海底热泉和喷气孔附近非常丰富, 与热水沉积块状硫化物矿床形成有密切关系<sup>[17]</sup>. 这些均有助于中国铌矿床生物成矿机理的研究.

### 2.3 富铌矿石中生物化石铸型

生物化石铸型是生物成矿标志之一. 在富铌矿石中, 铌含量 2%~10%的光片中发现微古动物(化石)

完全被铌矿物替代, 只是在矿物形态、轮廓上还保留有微古动物躯体轮廓即生物化石铸型. 已确切鉴定出形成生物化石铸型的古生物化石, 主要以有孔虫类和苔藓虫类为主, 多达近 20 个种属(表 4). 这些生物化石铸型的发现有助于对生物成矿的解释. 因为生物化石铸型是由含铌成矿热液在后期热液成矿时强烈交代生物活体和/或残骸使其保留生物组构的铌矿物. 不管是生物在新陈代谢过程中摄取铌成矿, 也

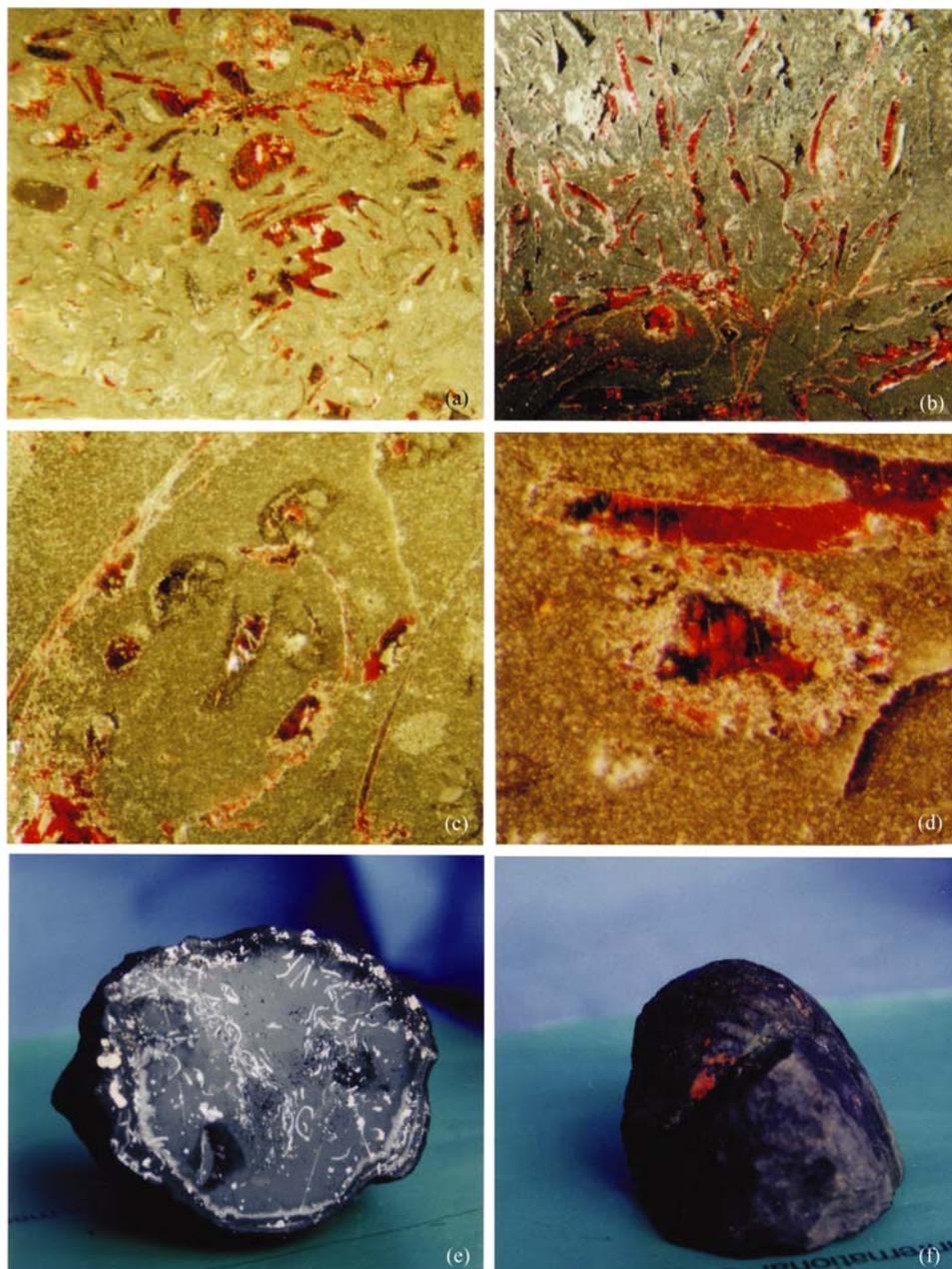


图 4

(a) 生物化石被交代呈铀矿物化石铸型(红色), 光片,  $\times 5$ ; (b) 生物化石被交代呈铀矿物化石铸型(红色), 光片,  $\times 5$ ; (c) 硅质岩中多孔苔藓虫被红铀矿(红色)交代, 光片,  $\times 27$ ; (d) 硅质岩中古纺锤蜓被红铀矿(红色)交代, 光片,  $\times 24.5$ ; (e) 硅质岩结核(灰色)中铀矿物生物化石铸型(白色), 光片, 原大; (f) 红铀矿(红色)交代欧姆贝化石, 标本, 原大

不管是生物残骸骨架堆积导致的铀成矿均属生物成矿之列<sup>[18]</sup>。进而使我们认识到, 是由于后期含铀热液对早期生物成因铀矿石改造和交代强烈, 致使早期

形成的铀矿石中生物全貌皆非, 很难发现生物成矿现象, 故使这类矿床研究长期受到岩浆热液成矿论的束缚。

表 3 岩矿石和微古动物化石中铌含量( $\times 10^{-6}$ )比较<sup>a)</sup>

| 铌矿床名称             | 样号    | 岩矿石名称    | 岩矿石铌含量 | 化石中铌含量 | 化石中铌矿石中铌 |
|-------------------|-------|----------|--------|--------|----------|
| 南华(河湖相, 沉积改造型)铌矿床 | N-1   | 粉砂质白云岩   | 1.26   | 20     | 15.9     |
|                   | N-2   | 粉砂质白云岩   | 1.30   | 31     | 13.8     |
|                   | N-3   | 层纹状泥质白云岩 | 0.33   | 33     | 100      |
|                   | N-4   | 层纹状泥质白云岩 | 0.79   | 45     | 57       |
|                   | N-5   | 层纹状泥质白云岩 | 0.73   | 33     | 45.2     |
|                   | N-6   | 紫红色泥质粉砂岩 | 0.43   | 34     | 79.1     |
|                   | N-7   | 铌矿化岩     | 90     | 300    | 3.3      |
|                   | N-8   | 铌矿化岩     | 25     | 330    | 13.2     |
|                   | N-9   | 铌矿化岩     | 74     | 410    | 5.54     |
| 濠木厂(海相, 热液叠加型)铌矿床 | L-225 | 泥质灰岩     | 2      | 60     | 30       |
|                   | L-422 | 泥质粉砂岩    | 1.3    | 34     | 26.2     |
|                   | L-423 | 泥质灰岩     | 5      | 40     | 8        |
|                   | L-424 | 泥质粉砂岩    | 2      | 42     | 21       |
|                   | L-425 | 铌矿石      | 126    | 470    | 3.7      |
|                   | L-426 | 铌矿石      | 201    | 412    | 2.1      |
|                   | L-36  | 铌矿化岩     | 65     | 340    | 5.2      |
|                   | L-37  | 铌矿化岩     | 84     | 240    | 2.9      |
|                   | L-38  | 条带状矿化岩   | 42     | 520    | 13.4     |
|                   | L-39  | 条带状矿化岩   | 49     | 510    | 10.4     |
|                   | L-40  | 铌矿石      | 214    | 550    | 2.6      |
|                   | L-41  | 石英       | 1      | 530    | 530      |
|                   | L-42  | 石英       | 0.91   | 500    | 549.5    |
|                   | L-43  | 方解石      | 0.64   | 320    | 500      |
|                   | L-44  | 方解石      | 1.35   | 570    | 422.2    |

a) 原子吸收光谱法, 精度 2%; 分析单位: 中国科学院地球化学研究所中心分析室

表 4 微古生物化石铸型<sup>a)</sup>

| 类别         | 中文名称      | 拉丁学名                                 | 时代                  |
|------------|-----------|--------------------------------------|---------------------|
| 有孔虫        | 古盘虫(未定种)  | <i>Archaeodiscus</i> sp.             | C~P                 |
|            | 新盘虫(未定种)  | <i>Neodiscus</i> sp.                 | P                   |
|            | 始瘤虫(未定种)  | <i>Eotuberitina</i> sp.              | C.P                 |
|            | 半凹多盘虫     | <i>Multidiscus semiconcavus</i> Wang | P <sub>2</sub>      |
|            | 格涅茨虫(未定种) | <i>Geinitzina</i> sp.                | P~T <sub>1</sub>    |
|            | 舌形虫(未定种)  | <i>Lingulina</i> sp.                 | P <sub>2</sub> ~现代  |
|            | 厚壁虫(未定种)  | <i>Pachyphloia</i> sp.               | P                   |
|            | 节房虫(未定种)  | <i>Nodosaria</i> sp.                 | C~现代                |
|            | 多盘虫(未定种)  | <i>Multidiscus</i> sp.               | P <sub>1-2</sub>    |
|            | 半结线虫(未定种) | <i>Hemigordius</i> sp.               | P <sub>2</sub>      |
|            | 古纺锤蜓(未定种) | <i>Palaeofusulina</i> sp.            | P <sub>2</sub>      |
|            | 南岭蜓(未定种)  | <i>Nanlingella</i> sp.               | P <sub>2</sub>      |
|            | 苔藓        | 多孔苔藓虫(未定种)                           | <i>Polypora</i> sp. |
| 窗孔苔藓虫(未定种) |           | <i>Fenestella</i> sp.                | P                   |
| 苔藓虫根须碎片    |           | <i>Bryozoans fragment</i>            | P <sub>2</sub>      |
| 海绵         | 钝管海绵类碎片   | <i>Amblysiphonelloids fragment</i>   | P <sub>2</sub>      |
| 腕足         | 欧姆贝(未定种)  | <i>Oldhamina</i> sp.                 | P <sub>2</sub>      |

a) 分析单位: 中国科学院南京地质古生物研究所

## 2.4 生物硫参与矿物硫同位素组成

生物硫参与矿物硫同位素组成, 明显标志是富轻硫同位素. 南华铀矿床矿物富轻硫同位素组成是其中典型实例, 无论原生矿物亦无论次生矿物硫同位素组成均富轻硫(表 5). 南华铀矿床硫同位素组成  $\delta^{34}\text{S}$  变化在  $-21.04\text{‰} \sim -33.38\text{‰}$  范围, 其平均值为  $-27.20\text{‰}$ . 矿石矿物硫同位素组成富轻硫, 与生物硫参与成矿密切相关.

铀矿床形成经历原生生物沉积和后成热液改造两个阶段, 两个阶段黄铁矿中硫铁比值有明显差别. 生物成因黄铁矿的硫铁比值(1.18), 大于后成热液改造成因黄铁矿的硫铁比值 1.15). 同样, 濠木厂铀矿床中生物成因红铀矿(生物化石铸型)中硫铀比值(0.33), 明显大于热液成因红铀矿中硫铀比值(0.31)(表 6). 这些均说明生物成因黄铁矿和红铀矿中有有机硫即生物成因硫的存在.

## 2.5 铀矿石富生物成因有机组分

对采自南华铀矿床的试样(NH-8, NH-63, NH-66)和濠木厂铀矿床的试样(95C-10A, 95C-2A, 95C-7B)进行了有机组分分析(表 7). 分析结果表明, 二矿床铀矿石均富有机组分. 干酪根含量在  $0.21\% \sim 0.44\%$  之间变化, 总烃变化在  $0.9 \sim 1.9 \text{ mg}$  范围. 二矿床生物成因矿石富集微古动物(化石)和改造成因矿石保留微古动物化石铸型等生物成矿标志均表明, 矿石中有机组分主要来自微古生物, 属于生物成因有机质.

## 3 结语与讨论

### 3.1 丰富物质来源和有利生物成矿环境

中国铀矿床产在涂光炽教授称谓“中国西南低温热液改造矿床成矿域”之中, 是因为这一地区具备有多种低温矿种(Hg, Sb, Pb, Zn, An, Ag, As, Tl, Cd, Ge 等)的成矿物质来源和有利的成矿条件, 使铀超常富

表 5 南华铀矿床硫同位素组成及黄铁矿硫铁比值<sup>a)</sup>

| 编号     | 矿物  | $\delta\text{S}^{34}\text{‰}$ | 黄铁矿成因     |           |
|--------|-----|-------------------------------|-----------|-----------|
|        |     |                               | 生物成因      | 热液成因      |
| 840724 | 雄黄  | -23.05                        |           |           |
| 840725 | 雄黄  | -23.05                        | Fe 45.79% | Fe 46.6%  |
| 840726 | 雄黄  | -29.91                        |           |           |
| 840727 | 雄黄  | -23.31                        | S 53.98%  | S 53.4%   |
| 840728 | 雄黄  | -23.22                        |           |           |
| 840729 | 雄黄  | -22.36                        | S:Fe=1.18 | S:Fe=1.15 |
| 840730 | 雄黄  | -24.82                        |           |           |
| 840735 | 雄黄  | -23.05                        |           |           |
| 95061  | 雄黄  | -32.87                        |           |           |
| 95062  | 雄黄  | -32.77                        |           |           |
| 95063  | 雄黄  | -27.87                        |           |           |
| 95064  | 雄黄  | -24.78                        |           |           |
| 95065  | 雄黄  | -32.93                        |           |           |
| 95066  | 雄黄  | -34.57                        |           |           |
| 95067  | 雄黄  | -33.38                        |           |           |
| 95068  | 雄黄  | -26.80                        |           |           |
| 840738 | 石膏  | -21.04                        |           |           |
| 95069  | 石膏  | -31.33                        |           |           |
| 95070  | 石膏  | -22.17                        |           |           |
| 95090  | 泻利盐 | -31.64                        |           |           |
| 95091  | 泻利盐 | -26.25                        |           |           |
|        | 平均  | -27.20                        |           |           |

a) SF<sub>6</sub> 法, 质谱测量精度  $\pm 0.2\text{‰}$ ; 分析者: 冯家毅, 耿龙年. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点实验室

表 6 不同成因红铊矿的硫铊比值

| 矿床名称 | 中国濠木厂铊矿床   |                                   | 希腊阿尔察<br>铊矿床 <sup>[19]</sup>   | 美国内华达<br>卡林金矿床                    |
|------|--|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
|      | 生物成因<br>(张宝贵等 <sup>[22]</sup> )(2) <sup>a)</sup> | 热液成因<br>(陈代演 <sup>[12]</sup> )(8) | 热液成因<br>(张守范 <sup>[19]</sup> ) | 热液成因<br>(陈代演 <sup>[12]</sup> )(5) |
| S    | 19.30  | 18.12                             | 18.7                           | 18.8                              |
| Tl   | 59.29  | 59.08                             | 59.4                           | 59.5                              |
| As   | 21.35  | 21.81                             | 21.9                           | 21.6                              |
| 合计   | 99.94  | 99.01                             | 100                            | 99.9                              |
| S:Tl | 0.33   | 0.31                              | 0.31                           | 0.31                              |

a) 括号内为样品数

表 7 濠木厂铊矿床和南华铊矿床矿石有机抽提物及族组分分离表<sup>a)</sup>

| 样号      | 矿石名称         | Corg<br>/% | 岩矿石<br>用量/g | 氯仿沥青<br>(A)/mg | 抽提率<br>(10 <sup>-6</sup> ) | 族组分  |      |      |      | 总烃<br>/mg | 非烃+沥青<br>/mg | 非烃+沥青 | 溶于有机<br>抽提液中<br>硫的量/g | 脱硫用<br>自然汞<br>的量/mL |
|---------|--------------|------------|-------------|----------------|----------------------------|------|------|------|------|-----------|--------------|-------|-----------------------|---------------------|
|         |              |            |             |                |                            | 饱和烃  | 芳烃   | 非烃   | 沥青   |           |              | 总烃    |                       |                     |
| NH-8    | 铊矿石          | 0.25       | 162.734     | 4.2            | 25.809                     | 1.10 | 0.50 | 1.87 | 0.73 | 1.60      | 2.60         | 1.63  | 0.23                  | 3                   |
| NH-63   | 铊矿石          | 0.21       | 153.627     | 6.8            | 44.263                     | 1.10 | 0.80 | 3.70 | 1.20 | 1.90      | 4.90         | 2.58  | 0.20                  | 3.5                 |
| NH-66   | 铊矿石<br>(半风化) | 0.31       | 171.718     | 6.0            | 34.941                     | 0.90 | 0.20 | 2.30 | 2.60 | 1.10      | 4.90         | 4.45  | 0.33                  | 2.5                 |
| 95C-10A | 铊矿石          | 0.22       | 163.831     | 3.1            | 18.922                     | 0.80 | 0.10 | 0.96 | 1.24 | 0.90      | 2.20         | 2.44  | 0.25                  | 2.0                 |
| 95C-2A  | 铊矿石          | 0.44       | 186.540     | 3.3            | 17.691                     | 1.0  | 0.20 | 0.80 | 1.30 | 1.20      | 2.10         | 1.75  | 0.41                  | 3.0                 |
| 95C-7B  | 铊矿石          | 0.23       | 143.345     | 2.5            | 17.440                     | 0.80 | 0.30 | 0.60 | 0.80 | 1.10      | 1.40         | 1.27  | 0.25                  | 2.5                 |

a) 干酪根制取化学分离法, 有机抽提索氏抽提法, 族组分层析法, 有机元素自动分析仪测试精度: C, 0.3%; H, 0.5%; N, 0.5%; 分析单位: 中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点开放研究实验室

集成形成铊矿床<sup>[20,21]</sup>。除与它们共同的成矿地质背景有关外, 还与这一地域有丰富多样的古海(陆)相生物群落存在有关, 它们创造了铊生物成矿的特殊环境。

### 3.2 超常富集和亲硫亲砷性

铊成矿是铊超常富集的必然结果。作者在铊矿床的研究过程中, 尝试性提出, 铊超常富集是指其含量普遍达到铊成矿要求( $n \times 10^{-4}$ )或大于铊的地壳丰度( $0.75 \times 10^{-6}$ )的 100 倍以上。铊超常富集成矿, 除受特定的成矿环境制约外, 也受铊亲硫, 亲砷的地球化学性质制约<sup>[22]</sup>。

### 3.3 生物成矿中二种摄取铊方式

研究表明, 在铊成矿过程中生物摄取铊主要通过二种方式, 一种是生物活体在新陈代谢过程中摄取铊, 一种是生物死亡残骸摄取铊。在铊生物沉积成矿阶段, 由于海(湖)水中成矿元素供应丰富和大量生

物, 特别是微古动物活体存在, 为铊的成矿创造了条件。但在后期热液叠加成矿阶段, 大量成矿热液是通过生物死亡残骸吸附和吸收含铊矿液成矿, 使生物沉积成矿时形成的铊矿石变得更富。

### 3.4 铊生物成矿二阶段模式

铊成矿模式根据生物摄取铊的方式和热液成矿特点, 大体可分为生物富集成矿阶段和热液叠加成矿阶段, 二阶段都与生物成矿作用密切相关。前者由于沉积时生物活体及其残骸摄取铊使之超常富集成矿; 后者是在生物富集成矿的基础上经后期成矿热液的交代, 再富集叠加成矿。显然, 铊矿床在成因上与岩浆热液矿床明显不同, 它经历早期生物富集成矿和晚期热液改造成矿二个阶段。由于晚期热液改造成矿作用强烈, 致使早期生物成矿特征面目皆非, 残留极少, 故使人们长期误认生物成因的铊矿床为热液成因的铊矿床<sup>[23,24]</sup>。

### 3.5 铊矿床生物成因与找矿

由于在铊矿床地质地球化学研究过程中发现一系列生物成矿现象,如发现微古动物(化石)在新陈代谢过程中吸收富集铊成矿;生物残骸堆积成矿;铊矿石中保留生物化石铸型;发现铊矿石中具有生物成因硫和有机质等,这些直接和间接的证据均说明铊成矿与生物密切相关.显然,关于铊矿床找矿,除注意常规地质找矿理论和方法外,还应注意应用生物地球化学原理和找矿标志进行找矿.

### 参 考 文 献

- 1 Tu G C, Zhang B G. The characteristics of Southwest China's minerogenic province of Low-temperature hydrothermally reworked ore deposits. In: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, *Developments in Geochemistry—A Contribution to 30th International Geological Congress*. Guiyang: Guizhou Science and Technology Publishing House, 1996. 133—139
- 2 叶连俊主编. 生物有机质成矿作用. 北京: 海洋出版社, 1996. 227—230
- 3 傅家谟, 秦匡宗. 干酪根地球化学. 广州: 广东科技出版社, 1995. 1—637
- 4 Fornari D J, Embley R W. In: Humphris S E, Zierenberg R A, Mullineaux L S, et al. eds. *Seafloor Hydrothermal Systems: Physical, Chemical, Biological, and Geological Interactions*. Washington D C: American Geophysical Union, 1995. 1—46
- 5 乌尔夫主编. 层控矿床和层状矿床(第七卷). 北京: 地质出版社, 1981. 1—63
- 6 朱上庆, 黄华盛编著. 层控矿床地质学. 北京: 冶金工业出版社, 1988. 22—37
- 7 林丽. 菌藻生物在成矿作用中的富金实验模拟. *地球化学*, 1998, 27(6): 559—565
- 8 吴沿友. 金属矿物的生物组构与生物化学作用. *地质地球化学*, 1997, (1): 95—96
- 9 胡明安. 与细菌活动有关的成矿作用——以两个欧洲铅锌矿床实例. *矿床地质*, 1997, 16(1): 61—69
- 10 Powell T G, Macpeen R W. Precipitation of sulfide ore and organic matter:sulfate reaction at Pine Point. *Can Sci Reprint Series*, 1984, 224(6): 63—66
- 11 Volf K H eds. *Handbook of Strata-bound and Stratiform Ore Deposits (Volume 9)*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1981. 417—488
- 12 陈代演. 中国汞铊共生矿床中富铊矿体的首次发现及其成因初步研究. *贵州工学院学报*, 1989, 18(2): 1—19
- 13 张忠, 张兴茂, 张宝贵. 南华铊矿床元素地球化学和成矿模式. *地球化学*, 1998, 27(3): 269—275
- 14 Trudinger P A, Bubela B. Microorganism and the natural environment. *Miner Depos*, 1967, 2:147—157
- 15 涂光炽等著. 低温地球化学. 北京: 科学出版社, 1998. 6—15
- 16 朱训主编. 中国矿情(第二卷), 金属矿产. 北京: 科学出版社, 1999. 631—635
- 17 Juniper S K, Fouquet Y. Filamentous Iron-silica deposits from modern and ancient hydrothermal sites. *Con Mineral*, 1988, 26: 859—869
- 18 中国科学院矿床地球化学开放研究实验室著. 矿床地球化学. 第 13 章生物与有机成矿作用. 北京: 地质出版社, 1997. 314—338
- 19 张守范编. 矿物学. 上海: 商务印书馆, 1957. 316
- 20 涂光炽. 试论非常规超大型矿床物质组成、地质背景、某些独特性——初谈非常规超大型矿床. *中国科学, D 辑*, 1998, 28(增刊): 1—6
- 21 涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠, 等著. 分散元素地球化学及成矿机制. 北京: 地质出版社, 2003. 1—68
- 22 张宝贵, 胡静, 王三学. 西南低温成矿域铊(含铊)矿床地球化学和生物成矿. *矿物岩石地球化学通报*, 2000, 19(4): 341—342
- 23 张忠, 陈国丽, 张宝贵, 等. 濠木厂铊矿床及其环境地球化学研究. *中国科学, D 辑*, 1999, 29(5): 433—440
- 24 Zhang Z, Zhang B G, Tang C J, et al. The main geochemical biological metallogenic and reworking independent Tl deposit. *Chin J Geochem*, 2000, 20(1): 45—51