

中国地质科学院

矿床地质研究所所刊

1987年 第2号 (总第20号)

庆祝矿床地质研究所建所三十周年

地质出版社

中国地质科学院
矿床地质研究所刊

1987年 第2号

(总第20号)

责任编辑: 渠洁珍 张肇新 张中民

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: $13 \frac{5}{8}$ 插页2页 字数: 322,000
1987年12月北京第一版。1987年12月北京第一次印刷

印数: 1—1,950册 国内定价: 3.30元

ISBN7-116-00082-8/P·072

统一书号: 13038·新481

BULLETIN OF THE INSTITUTE OF MINERAL DEPOSITS,
CHINESE ACADEMY OF GEOLOGICAL SCIENCES

No. 2, 1987 (Serial No: 20)

CONTENT

An Investigation on the Assemblage of Geothermal Alteration Minerals and the Formation of the Kaolin Deposit in Tengehong Geothermal Area, Yunnan Province	Zheng Zhi et al. (6)
A Study of Distribution Regularity of Useful Elements in a Stratiod Cassiterite-Sulfide Orebody of Dachang by Means of Factor Analysis	Huang Minzhi et al. (19)
Some New Concepts on the Evolutionary Sequence of the Xihuashan Granite.....	Sheng Jifu (30)
The Origin, Evolution and Characteristics of Molybdenum-Bearing Magmatic Rocks in Yangjiazhangzi Area, Western Liaoning	Lin Wenwei (45)
On the Types of Borate Deposits and Their Prospecting in China	Zheng Mianping (53)
The Application of Elemental Contrasting Analysis in the Study of Material Sources of Bauxite Deposits—Taking Bauxite Deposits in Central Guizhou as an Example	Zhang Baisheng (60)
The Genesis and Characteristics of REE Geochemistry of Xianghualing Granites.....	Chen Deqian (74)
Geochemical Study of the Sediments in Northern South China Sea	Wu Bihao et al. (83)
The Variation of Biotite after Grinding	Ding Xiaoshi (93)
Orthopyroxene from the "Marginal Zone" at the Bottom of the Panzhihua Intrusive Body—Its Characteristics and Genetic Relationship to the "Marginal Zone".....	Zhou Xiuzhong (108)
A Study of Fluid Inclusions, Thermal Halos and Genesis of the Baixiangshan Iron Deposit	Wei Jiaxiu (127)
Deep Structures of the Granites and Characteristics of the Geophysical Fields in South China and Their Significance in Ore Prospecting	Sun Demei et al. (134)
The Tectonic Significance of Wulingshan Gravity Gradient Zone	Ma Kaiyi et al. (141)
The Lead Isotope Studies of the Stratabound Type Copper-Iron Sulfur Deposits in Tongling District, Anhui Province.....	Liu Yuqing et al. (149)

A Discussion on the Mathematical Method for Sulfur-Isotope Compositions—Taking Some Skarn Deposits as Examples	<i>Wang Meiyu et al.</i> (162)
Determination of Lithium, Rubidium and Potassium in Brines, Sea Water and Salt Samples by Flame ASS with a λ -Shaped Tube Aspirator—A Modified Method of Standard Addition	<i>Chen Yongzhi et al.</i> (169)
A Trace Elements Study of <i>Pinctada Martensii</i> (D.), <i>Cristaria Plicata</i> (L.), <i>Anodonta Woodlana</i> (L.), <i>Hyriopsis Cumingii</i> (L.) and <i>Pinctada Maxima</i> (J.)	<i>Wang Wenying et al.</i> (171)
The Study of Metallic Ore Deposits over the Past Thirty Years	<i>Rui Zongyao et al.</i> (176)
Prospects of the Research Work on Geology of the REE Deposits	<i>Bai Ge</i> (180)
The Advances gained by the Institute of Mineral Resources in Research Work on Sedimentation and Sedimentary Mineral Resources	<i>Wu Bihao et al.</i> (183)
Geophysical Methods in Ore Prospecting and Studies on Ore Deposits	<i>Jiang Mei et al.</i> (187)
The Development and future task of Mathematic Geology in the Institute of Mineral Deposits	<i>Li Yuwei et al.</i> (191)
The Advances made by the Institute of Mineral Deposits in Research Work of Applied Mineralogical Physics and Modern Mineralogy	<i>Zhang Andi</i> (195)
Review and Prospects of the Research in Stable Isotope Geology	<i>Song Hebin</i> (201)
The Establishment and Development of Experimental Petrology and Mineralogy in the Institute of Mineral Deposits	<i>Liu Yushan</i> (204)
The Research Work of Science and Technology Information in the Past Thirty Years	<i>Yu Chengyu</i> (208)

目 录

云南腾冲地热点高岭土的形成和蚀变矿物组合特征.....	郑直 吕达人 周国平 (1)
广西大厂似层状锡石-硫化物矿体有用元素的因子分析	
.....	黄民智 唐绍华 何琨元 刘佑希 (9)
西华山花岗岩演化次序的新认识.....	盛继福 (21)
江西杨家杖子地区含钼岩浆岩的起源.....	林文慰 (31)
硼矿床类型与我国找硼方向.....	郑绵平 (47)
元素对比分析在铝土矿成矿物质来源上的应用——以黔中铝土矿为例	
.....	章柏盛 (55)
论香花岭花岗岩的成因与稀土元素地球化学特征.....	陈德潜 (61)
南海北部沉积物的地球化学研究.....	吴必豪 李松筠 李 兴 陈永志 陈绍谋 (75)
黑云母研磨后的变化.....	丁孝石 (85)
攀枝花岩体底部“边缘带”斜方辉石的特征及其与“边缘带”的成因	
关系.....	周秀仲 (95)
白象山铁矿流体包裹体、热晕及矿床成因的研究.....	魏家秀 (111)
华南花岗岩深部构造的地球物理场特征及其找矿意义.....	孙德梅 曾青石 (129)
武陵山重力梯度带的地质构造意义.....	马开义 孙德梅 (135)
安徽铜陵地区石炭系层状铜铁硫矿床的铅同位素研究.....	刘裕庆 刘兆廉 (143)
硫同位素数据分析方法的探讨 (以某些矽卡岩型矿床为例)	
.....	王美玉 毕承恩 吴静淑 (151)
“人”型毛细管进样器火焰原子吸收测定盐湖卤水、海水、盐样中的	
锂、铷、钾.....	陈永志 李松筠 李 兴 (163)
合浦珠母贝等珍珠层中微量元素锌的研究.....	王文瑛 卢慧卿 (171)
金属矿床研究三十年.....	芮宗瑞 赵一鸣 (176)
稀有(稀土)元素矿床地质研究的展望.....	白 鸽 (180)
沉积作用和沉积矿产研究在我所的进展.....	吴必豪 雷世泰 (183)
普查找矿和矿床研究中的地球物理方法.....	姜 枚 孙德梅 (187)
数学地质在我所的发展和任务.....	李裕伟等 (191)
应用矿物物理和现代矿物学研究在我所的进展.....	张安禄 (195)
稳定同位素地质研究的回顾与展望.....	宋鹤彬 (201)
成岩成矿实验在我所的建立和发展.....	刘玉山 (204)
科技情报工作三十年.....	余澄宇 (208)

云南腾冲地热区高岭土的形成和 蚀变矿物组合特征

郑 直 吕达人 周国平

(矿床地质研究所)

文章摘要 腾冲地热区以热海热田为中心, 其面积达 100km^2 , 包括了数十个泉群。热区水热蚀变作用强烈, 岩石发生强烈硅化、高岭土化和泥化作用, 出现了以高岭石为主的一系列中低温蚀变矿物。根据蚀变矿物组合特征, 蚀变区分为五个带: (1) 硅化带; (2) 明矾石化带; (3) 高岭土化带; (4) 泥化带; (5) 规则混层带。从硅化带至泥化带, 从热泉中心依次向外分布, 规则混层带的分布和区域构造线一致。造成蚀变区大量高岭土化作用的主要因素是构造断裂活动和含铝岩石的多孔疏松结构。

云南腾冲是我国最大的地热区之一, 以硫磺塘、澡塘河、黄瓜菁、囊宋热水塘为主的数十个泉群组成了壮观的地热显示。热区内地热活动强烈, 各种岩石发生了明显的蚀变, 其中高岭土化作用是岩石水热蚀变的主要特征。本文简要报道高岭土的形成和水热蚀变矿物的组合特征。

一、地质概况

(一) 地层及岩浆断裂活动

地热区及其周围岩石的地层层序自下而上为:

1. 下古生界高黎贡山群变质岩组合 (Pz_1gl)
2. 石炭系勐洪群泥板岩、板岩、砂岩、白云岩组合 (Cmh)
3. 上第三系南林组砂砾岩、砂泥岩组合 (N_{1n})
4. 上新统芒棒组玄武岩组合 (N_2m^2)
5. 第四系火山和河湖相堆积 (Q)

上第三系南林组广泛分布于热区东部, 并不整合于燕山期花岗岩和下古生界变质岩之上, 其岩性以花岗质砾岩、泥质粗砂岩、粉砂岩为主, 间夹有薄煤层。在硫磺塘和黄瓜菁一带, 南林组主要由花岗质巨砾组成, 其间充填有石英粗砂, 并伴有数条硅质脉。巨砾直径大者达数米, 一般 30cm 左右, 棱角基本磨圆。由于水热活动, 南林组花岗质砂砾岩发生了强烈的蚀变。

芒棒组仅在热区中部出现火山堆积, 以灰黑色致密状玄武岩为主, 直接覆盖于南林组之上。

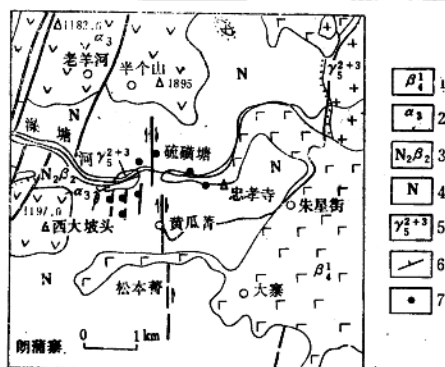


图 1 腾冲地热区黄瓜菁—硫磺塘热田地质图

Fig.1 Geological map of the Huangguajing—Liuhuangtang thermal field in the Tengchong geothermal area.

- 1—晚更新世早期玄武岩; 2—中更新世安山岩; 3—早更新世玄武岩;
4—新第三系花岗岩质砂砾岩; 5—燕山期花岗岩; 6—断裂带;
7—热泉出露点

热区内岩浆活动频繁, 分布广泛, 持续时间长。尤其是新生代以来强烈的基性—中基性的火山喷发, 形成了宏伟壮观的火山地貌和千姿百态的地热景象。

热区内基底由燕山期花岗岩组成, 形成了山间盆地的基盘, 基盘受南北断裂带切割 (图1)。

(二) 地表水热蚀变

热区内分布着许多低温、中温和高温热泉、沸泉、喷气孔。热泉大都呈东西向和南北方向分布, 与区域构造线方向一致 (图1)。泉温高达 100℃。热泉周围形成了厚层的以硅华为主的泉华沉淀物。

二、蚀变矿物共生组合

通过岩石薄片、X射线衍射分析、透射电镜、扫描电镜、红外光谱分析和X射线能谱分析等方法对硫磺塘大滚锅—仙人藻塘、硫磺塘大滚锅—忠孝寺、硫磺塘—黄瓜菁三个蚀变剖面的各种蚀变岩石的矿物共生组合进行了综合鉴定, 其主要的水热蚀变矿物包括以下几类:

(1) 氧化硅矿物

该类矿物主要是低温石英, 其次是蛋白石。低温石英和绢云母、高岭石共生, 有时呈团块或条带产出。硅华则由蛋白石组成, 颗粒呈球状, 粒径小于 1μm, 衍射图上呈非晶质反射。硅华可达相当厚度, 横断面可见无数微细层组成的叠层状构造。

(2) 硫酸盐矿物

明矾石是主要的硫酸盐矿物, 少数样品含有石膏。明矾石主要出现在热泉附近的蚀变岩石中, 硫质喷气孔周围更多。据反射间距计算, 晶胞参数为 $a = 6.977 - 7.001 \text{ \AA}$, $c = 17.306 - 17.363 \text{ \AA}$ 。这是一种阳离子以 K^+ 为主的钾明矾石。能谱分析表明, 其含 K 达 7.352%。

(3) 高岭土矿物

高岭土矿物是热区内地表岩石水热蚀变的主要粘土矿物, 以高岭石为主, 埃洛石和地开石次之。高岭石的形成和含量与母岩性质密切相关, 即当母岩为南林组花岗岩质砂砾岩时, 主要形成高岭石, 而当蚀变母岩为玄武岩类或安山岩类时, 高岭石含量则明显减少。还应指出, 高岭石主要集中在 2—4μm 和小于 2μm 粒级中, 结晶度指数接近 1 或大于 1,

属于高度有序的三斜高岭石(图2-A)。透射电镜下呈完好的六方片晶形(图3)。这类高岭石常和石英、绢云母共生。当伴有明矾石和蛋白石时,有序度往往降低(图2-D)。

埃洛石产出部位集中在热泉喷出口附近,常和蛋白石、明矾石共生。埃洛石的管体发育不完善。地开石是热区内较高温的蚀变产物,产于花岗岩与花岗岩砂砾岩的接触部位;晶体呈假六方片状,厚度大于高岭石。两者常以不同比例的混合物出现(图2-B)。

(4) 绢云母

蚀变形成的绢云母常和高岭石共生,有时也和蛋白石、石英共生。衍射图中以出现 $9.98\text{ \AA}$ 反射为其特征, $d(060)$ 位于 $1.49-1.50\text{ \AA}$ 之间,属于水化程度低的二八面体白云母类型。晶体呈不规则的片状(图2-C)。

(5) 蒙脱石及绿泥石

这两种矿物出现在母岩为玄武岩类的蚀变岩石中,高热泉喷出区较远。蒙脱石主要由含铁量较高的矿物和斜长石转变而来,属偏中性蚀变作用产物。其第一级底面反射变化在 $15-15.3\text{ \AA}$ 之间,乙二醇饱和处理后膨胀至 $17.7\text{ \AA}$,大多数属 1C 蒙脱石。绿泥石主要和蒙脱石共生,第一级底面反射位于 $14.03\text{ \AA}$,经乙二醇饱和处理后该反射不变, 550°C 加

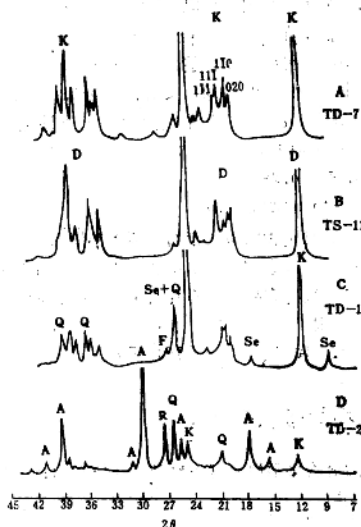


图2 蚀变带各蚀变矿物的X射线粉末衍射图
Fig. 2 X-ray powder diffraction patterns of various altered minerals from the alteration zone.

CuK α 辐射, 50kV, 40mA.

K—高岭石; D—地开石; Se—绢云母; A—明矾石;
Q—石英; F—长石; R—金红石



图3 有序的六方片状高岭石
Fig. 3 Ordered hexagonal flaky kaolinite.
(透射电镜 $\times 1700$)

热 2 小时后收缩至 $13.8 \text{ \AA}$ ，扫描电镜下绿泥石呈花瓣状产出。

(6) 混层矿物

水热蚀变岩石中出现的混层矿物包括规则和不规则混层矿物。其中以伊利石/蒙脱石不规则混层矿物最为发育，该矿物主要集中在小于 $1 \mu\text{m}$ 的粒级中。衍射图中第一级底面反射间距变化在 $10.53-12.81 \text{ \AA}$ ，乙二醇饱和处理后膨胀至 $10.65-13.27 \text{ \AA}$ 。经估算混层中膨胀层含量在 $13-32\%$ 之间，最多不超过 40% 。形态特征很接近伊利石，边缘出现较多丝状分裂。

蒙脱石/绿泥石不规则混层矿物仅出现在少数母岩为玄武岩的蚀变岩石中，其第一级

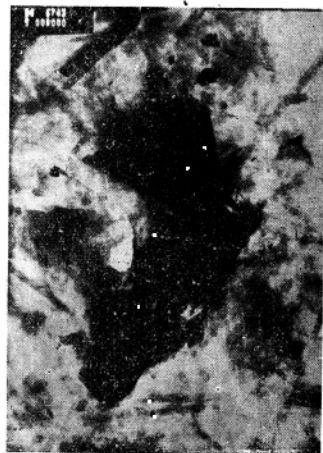


图 4 伊利石/蒙脱石规则混层矿物
(集合体开始分解成细长条状晶体 透射电镜 $\times 8000$)
Fig. 4 Illite/montmorillonite regular
interstratified mineral.

底面反射位于 $15.93 \text{ \AA}$ ，乙二醇饱和处理后膨胀至 $16.67 \text{ \AA}$ ， 550°C 加热 2 小时后收缩至 $13.8 \text{ \AA}$ 。从衍射特征看，混层中蒙脱石层占主要位置。

规则混层矿物主要分布在蛤蟆咀—黄瓜青一带的水热蚀变岩石中，蚀变母岩以花岗岩质砂砾岩为主。混层矿物以伊利石/蒙脱石间层为主，富集在小于 $0.5 \mu\text{m}$ 的粒级中（图 4）。衍射图中可见到一套呈整数系列的 (001) 反射，其中 (001) 和 (002) 反射分别为 $25.96 \text{ \AA}$ 和 $11.95 \text{ \AA}$ ，乙二醇饱和处理后分别膨胀至 $28.46 \text{ \AA}$ 和 $13.80 \text{ \AA}$ ， 550°C 加热 2 小时后反射收缩至 $10.28 \text{ \AA}$ 。

(7) 磷酸盐矿物

这类矿物以磷钙铝石、菱磷铝石和磷铝铈矿为主，它们主要集中在小于 $2 \mu\text{m}$ 的粒级中，一般与高岭石、石膏共生。反映在衍射图中出现 $5.72 \text{ \AA}$ ， $3.50 \text{ \AA}$ ， $2.95 \text{ \AA}$ ， $2.20 \text{ \AA}$ ， $1.89 \text{ \AA}$ 和 $1.74 \text{ \AA}$ 一系列强反射。

三、水热蚀变矿物的带状分布

笔者将上述主要蚀变矿物中，能够指示水热溶液化学性质（主要是 pH 值）的特征性矿物分为以下五类。

(1) 氧化硅矿物

该类矿物是强酸至酸性水溶液交代围岩的产物。由于热泉出露部位是酸性水热溶液的通道，故在其附近是该类矿物最富集的部位，常形成纯硅化带。

(2) 明矾石

产于强硫酸溶液作用下形成的强烈蚀变岩石中，和高岭石、硅质矿物共生。空间分布上紧靠硅化带。

(3) 高岭石和地开石

产于酸性条件下形成的强烈蚀变至中等蚀变的岩石中, 常和混层矿物共生。地表蚀变带中分布广泛。

(4) 2:1型粘土矿物

该类矿物包括蒙脱石和绿泥石, 产于弱酸性至中性条件下形成的中等至轻微蚀变的岩石中, 空间分布上离热泉喷出区较远。

(5) 规则混层矿物

常和高岭石共生, 是酸性—中酸性条件下岩石发生较强烈蚀变的产物, 沿断裂带分布。

以上列出的五类特征性蚀变矿物分别代表了具不同化学性质的水热溶液和围岩发生交代作用形成的产物。从第一类到第四类, 反映了水热溶液从强酸性到中性的变化。根据上述蚀变矿物组合特征, 可将水热蚀变区分为五个带(表1)。每个蚀变带内, 都有一至两种常见的矿物组合。每种组合反映了该蚀变带内由于温度、压力及水溶液离子组分的变化所引起的蚀变矿物种类的变化。

表1 热海热田水热蚀变分带

蚀变带分类	水热溶液性质	特征蚀变矿物	主要矿物组合 ^①
硅化带	强酸—酸	二氧化硅矿物	Q Q+Se+K Ap+Se+H
明矾石化带	强硫酸	钾明矾石	A+Q+H A+Se+Q
高岭土化带	酸性	高岭石 地开石	K+Q+I/M D+Q+I/M
泥化带	弱酸—中性	蒙脱石 绿泥石 不规则混层	M+K+Q M+Se+Q Ch/M+K+Q I/M+K+Q
规则混层带	酸—弱酸性	规则混层	I—M+K+Q

① K—高岭石; D—地开石; H—埃洛石; Se—绢云母; M—蒙脱石; A—明矾石; Ap—蛋白石; I/M—伊利石/蒙脱石不规则混层; I—M—伊利石/蒙脱石规则混层; Ch/M—绿泥石/蒙脱石不规则混层; Q—次生石英+原生石英

四、地表岩石水热蚀变的主要特点

腾冲地热区地表水热蚀变的主要特点是高岭土化作用非常强烈并普遍发育, 和其它四个带相比, 高岭土化带范围最大, 和国外一些现代热泉水热蚀变类型相比, 高岭土化作用也是最强烈的。这种蚀变作用已经形成了一种潜在的重要的高岭土矿产资源。这种蚀变特征除了和水热溶液的化学性质有关外, 主要和蚀变母岩的性质有关。热区内南林组花岗岩

砂砾岩作为水热蚀变的母岩提供了大量富铝的硅酸盐矿物, 其中长石类矿物是形成高岭石的主要母矿物。由于花岗质砂砾岩中铁镁矿物含量较少, 水热溶液主要和浅色的长石、白云母类矿物发生交代反应, 通过 H^+ 化作用母矿物中的碱质组分不断被淋滤掉, 促使残留组分重新组合形成高岭石。在低温热液下进行的碱质淋滤作用要比常温下风化作用产生的淋滤作用快得多; 此外, 花岗质砂砾岩的多孔隙结构也为水热溶液的循环提供了良好的通道, 从而加速了母岩高岭土化的进程。这正是腾冲地热区水热蚀变作用不同于其它地热区水热蚀变作用的原因之一。

笔者在野外研究期间得到了云南省地质局地矿处、水文处、科技处的大力支持和协助。云南省地热队在人力、物力上给予了极大的支持, 并提供了大量的野外地质资料。本文所用测试数据由地质所黄成彦、矿床所周梅馨和郭立鹤同志完成, 在此一并致谢。

AN INVESTIGATION ON THE ASSEMBLAGE OF GEOTHERMAL ALTERATION MINERALS AND THE FORMATION OF THE KAOLIN DEPOSIT IN TENGCHONG GEOTHERMAL AREA, YUNNAN PROVINCE

Zheng Zhi, Lu Daren and Zhou Guoping

(*Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences*)

Abstract

Tengchong, one of the largest geothermal area in China, covers an area of about 6000 km² and is noted for a great number of hot springs. Because of frequent geothermal activities, all the original rocks, mainly Late Tertiary arkose and arkosic conglomerate composed of granitic gravels, have been altered intensely. Of the alterations, kaolinization at surface has resulted in the formation of a kaolin deposit with latent economic value. The geothermal water shows slight acidity ($ph=6-7.5$), varies from 70°C to 98°C in temperature and contains some H₂S. The hydrothermal alteration mineral assemblages can be represented by (1) siliceous minerals, dominantly quartz and opal; (2) sulfates, mainly alunite; (3) kaolin minerals, chiefly ordered-kaolinite with small amounts of halloysite and dickite; (4) montmorillonite and chlorite; (5) interstratified minerals consisting of regular interstratifications of I/M and Ch/M and also some of irregular ones; (6) phosphates such as goyazite and woodhouseite. Of all these, kaolinite is the most abundant clay mineral.

From the center of the hot springs outwards several alteration zones can

occur in the sequence of silicified—alunitized—kaolinized—argillized zone, and the distribution of regular interstratification zone is coincident with that of NS-trending faulted zone.

The development of the altered minerals are controlled by three factors: (1) the property of original rocks. Generally speaking, granitoid has been altered into kaolinite, and basaltic rocks into smectite and chlorite; (2) the epithermal alteration which has led to the assemblage of kaolinite, alunite and quartz, and sulfur-bearing geothermal water which is responsible for the development of alunite and halloysite; (3) fault structure controlling the occurrence of hot springs and the distribution of regular interstratified minerals.

似层状 (91 号) 矿体又由以下矿体所组成, 其相应的矿石类型自似层状矿体下盘向上可分为①宽条带状灰岩与细条带状硅质灰岩 (D_1' 与 D_1'') 之间的层面脉型 (即 77 号) 矿体, 它是以锡石-石英-铁闪锌矿-磁黄铁矿矿石为主, 局部见脆硬锑铅矿等 硫盐矿物及辉锑矿的富集。向矿体两端磁黄铁矿明显增多。②细条带状硅质灰岩 (D_1'') 中的细裂隙脉型矿体, 以锡石-石英-毒砂、锡石-铁闪锌矿-黄铁矿及锡石-铁闪锌矿-毒砂矿石为主,

还有少量脆硫锑铅矿等硫盐矿物及微量方铅矿。③细条带状硅质灰岩 (D_1^*) 之上小扁豆状灰岩 (D_1^*) 底部的层面脉型 (75 号) 矿体, 以黄铁矿 (磁黄铁矿)-铁闪锌矿-毒砂-锡石型矿石为主, 出现少量脆硫锑铅矿等 Pb, Cu, Ag, Sb, Bi 的各类硫盐矿物及辉锑矿。其中方解石明显增多, 向矿体两端几乎全部由方解石组成, 且碳质成分增高。④产于小扁豆状灰岩 (D_1^*) 下部, 75 号层面脉矿体上部的层间细脉交代型矿体, 以磁黄铁矿 (黄铁矿)-铁闪锌矿矿石为主, 还有锡石-石英-毒砂及锡石-石英-铁闪锌矿等矿石, 且见微量脆硫锑铅矿等矿物。

91 号矿体矿物成分极为复杂, 形成时间长, 分布广、数量多。主要矿石矿物有锡石、铁闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿、毒砂、脆硫锑铅矿, 其次为黄铜矿、黄锡矿、辉锑矿、方铅矿, 还有少量及微量的自然铋[●]、自然铊[●]、含铅自然铋[●]、辉铋矿、硫锡矿[●]、硫锑铅矿[●]、斜方锑铁矿[●]、硫锑铅矿、辉锑铅矿[●]、异硫锑铅矿[●]、柱硫锑铅矿[●]、斜辉锑铅矿[●]、辉锑银铅矿[●]、银锑铜矿[●]、硫锑锑铅矿[●]、丁硫锑锑铅矿[●]、硫铋铅矿[●], 还有微量的磁铁矿、赤铁矿等。脉石矿物以石英、方解石为主, 其次为电气石、钾长石、锰方解石、菱铁矿、白云石、绢云母、白云母、铁绿泥石等。

为了研究 91 号矿体中元素的空间分布规律及其在成矿过程中的成因关系, 现以 405 中段为代表, 自 20—28-1 共 5 条勘探线的 107 个组合样, 对 Sn, Zn, Pb, Sb, As, S, Bi, Ag, In, Cd 及 Sn^{4+} 、 Sn^{2+} 等 12 个变量进行统计分析。为了在这众多变量具复杂关系的情况下, 识别和提取影响矿化的成因因素, 使用了 R 型因子分析方法。本方法以变量间的相关关系为基础, 归纳出数量较少的几个理想变量 (因子), 每个理想变量代表着原始地质变量间的一种结合关系。以便进一步探讨矿物的共生组合和成因联系。用这种方法对 91 号矿体所进行的分析和研究收到了较好的效果[●]。

一、有用元素间的相关分析

元素间相关关系, 可由变量相关矩阵 (表 1) 来表示。据统计检验, 107 个组合样相应的关系系数 $|r| \geq 0.195$ (显著性水平为 5%) 即为相关。

从相关矩阵 (表 1) 可见:

1. 变量 Sn 与 Sn^{4+} 的相关系数 $r = 0.866$, 可见大量 Sn 呈四价态的锡石存在。Sn 与 Sn^{2+} , As, S, Bi 呈弱相关性, 其相关系数分别为 $r_{Sn-Sn^{2+}} = 0.247$, $r_{Sn-As} = 0.277$, $r_{Sn-S} = 0.223$, $r_{Sn-Bi} = 0.217$ 。由此可见, 与锡石伴生的还有少量的黄铜矿、毒砂及与毒砂有关的少量自然铋或铋的硫化物。Sn 与其它元素相关系数 $r < 0.195$, 无显著相关。

2. Zn 与 Cd, S, In, Ag, As, Bi 呈好的正相关关系, 特别是与 Cd, S, In, Ag 相关性更好, 其相关系数分别为: $r_{Zn-Cd} = 0.818$, $r_{Zn-S} = 0.670$, $r_{Zn-In} = 0.611$, $r_{Zn-Ag} = 0.594$, $r_{Zn-As} = 0.429$, $r_{Zn-Bi} = 0.372$, $r_{Zn-Pb} = 0.253$, $r_{Zn-Sn^{4+}} = 0.209$, $r_{Zn-Sn^{2+}} = 0.171$, $r_{Zn-S}^{2+} = 0.106$ 。可见, Zn 与 S 还有 [Fe] 组成铁或含铁闪锌矿存在, 是一组成分极为复杂的硫化矿物组合。它包括毒砂、[黄铁矿、磁黄铁矿]、黄铜矿、方铅矿及 Ag, Pb,

● 均为矿体中首次发现的矿物⁽²⁾。

● 方法由矿床地质研究所李裕伟提供, 计算工作由刘亚玲完成。

表 1 91号矿体405中段有用元素(变量)的相关矩阵
Table 1 Correlation matrix for useful elements (variables) at
405 level of No. 91 orebody

		Sn	Zn	Pb	Sb	S	As	Ag	Bi	In	Cd	Sn ⁴⁺	Sn ²⁺
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13
Sn	1	1.000											
Zn	2	0.146	1.000										
Pb	3	-0.169	0.253	1.000									
Sb	4	0.012	0.171	0.692	1.000								
S	5	0.223	0.670	0.230	0.166	1.000							
As	6	0.227	0.429	0.140	0.132	0.532	1.000						
Ag	7	0.019	0.594	0.553	0.472	0.672	0.290	1.000					
Bi	8	0.217	0.372	0.106	0.165	0.459	0.351	0.437	1.000				
In	9	0.051	0.611	0.328	0.253	0.580	0.226	0.600	0.344	1.000			
Cd	10	0.161	0.818	0.213	0.141	0.745	0.304	0.687	0.477	0.749	1.000		
Sn ⁴⁺	11	0.866	0.209	-0.129	0.020	0.241	0.190	0.063	0.251	0.146	0.248	1.000	
Sn ²⁺	12	0.247	0.108	0.021	0.207	0.231	0.197	0.259	0.161	0.109	0.170	0.156	1.000

Sb, Bi 的硫盐矿物, 其中相关性好的 Cd, In 均在闪锌矿中呈类质同象存在。

3. Pb, Sb与Ag, S, In, Cd等具有明显的相关性, 其相关系数分别为 $r_{Pb-Sb}=0.692$, $r_{Pb-Ag}=0.553$, $r_{Pb-S}=0.472$, $r_{Pb-In}=0.230$, $r_{Pb-Cd}=0.166$ 。Pb, Sb, Ag, S可组成脆硫锑铅矿等Pb, Ag, Sb的硫盐矿物及方铅矿、辉锑矿等Pb, Sb硫化物。它们与S的关系十分密切, 但这里Pb-S, Sb-S的相关系数极小或小于检验值, 这是因为组成这类硫盐和硫化矿物在矿体中占有量微小, 绝大部分硫被分配到Zn, As等硫化物中, 因此相关系数虽小, 但实际上关系密切。Pb, Sb与In, Cd有一定相关性, $r_{Pb-In}=0.328$, $r_{Pb-Cd}=0.253$, $r_{Pb-Sn^{4+}}=0.213$ 。In, Cd多呈类质同象存在于方铅矿及脆硫锑铅矿中。

4. S与Cd的相关程度最高, 其 $r_{S-Cd}=0.745$ 。与Ag, Zn, In, As, Bi呈好的正相关, 相关系数介于0.672—0.459之间, 表明硫可呈大量的硫化物或硫盐矿物产出, 其中S与Cd的密切关系, 推测在闪锌矿中可能有独立的硫镉矿存在。

5. As与S($r=0.532$)关系密切, 以毒砂形式存在。As与Bi, Cd, Ag相关系数介于0.29—0.351之间, 表明在毒砂中有少量自然铋及Ag, Bi的硫盐矿物集合体存在。

6. Ag与S, As, Pb, Sb, Bi呈较高的正相关性, 除了它在各种硫化物中呈类质同象存在外, 还可与Pb, Sb, Bi, S元素构成各种硫盐矿物, 呈微细包体存在于各种硫化物及脆硫锑铅矿中。Ag与 Sn^{2+} 呈弱的正相关, $r_{Ag-Sn^{2+}}=0.259$, 即Ag可存在于黄锡矿中。

7. Bi与Cd, S, As, Zn, Ag等呈较好的正相关关系, 相关系数在0.351—0.477之间, 可见Bi大部分呈微细自然铋, 铋的硫化物及硫盐矿物存在于各种Fe, Zn, As的硫化物中或以类质同象存在于脆硫锑铅矿之中。

二、有用元素的因子分析

在以上107个数据的12个变量之间相关关系分析的基础上进行了R型因子分析, 取

得了主因子载荷矩阵(表2)。从表中可见,共提取三个主因子,公共因子方差贡献累计百分比为81.79%,可以认为前三个因子已经包含了原始变量中绝大部分信息,其中:

表2 有用元素R型主因子载荷矩阵

Table 2 R-mode principal factor loading matrix of useful elements

因子 变量	F ₁	F ₂	F ₃	公共因子方差
1 Sn	0.284	0.822	0.365	0.8895
2 Zn	0.814	-0.001	-0.299	0.7512
3 Pb	0.442	-0.631	0.453	0.7980
4 Sb	0.415	-0.443	0.694	0.8492
5 S	0.847	0.077	-0.194	0.7603
6 As	0.538	0.182	0.010	0.3231
7 Ag	0.829	-0.312	0.075	0.7893
8 Bi	0.602	0.167	-0.041	0.3913
9 In	0.759	-0.154	-0.218	0.6472
10 Cd	0.869	0.021	-0.331	0.8648
11 Sn ⁴⁺	0.338	0.785	0.297	0.8191
21 Sn ²⁺	0.310	0.187	0.407	0.2962
方差贡献(%)	47.05	21.10	13.64	
方差贡献累计(%)	47.05	68.15	81.79	

第一因子(F₁)方差贡献最大,占将提取近一半的关联信息。其中Zn, S, As, Ag, Bi, In, Cd等变量都具有较高的载荷。这是控制Zn, As, S的主要因子,它们组成铁闪锌矿、毒砂,但因变量中缺少Fe,而该因子中的元素组成主要硫化物不能缺少Fe,同时在矿物组合中S与Fe结合可有铁的硫化物(黄铁矿、磁黄铁矿)的存在,因而该因子中补充经验关联成员Fe具有极重要的意义,因为(1)有Fe的存在才能形成铁闪锌矿(Zn(Fe))S[●]、毒砂[Fe]AsS、黄铁矿[Fe]S₂、磁黄铁矿[Fe]S。(2)从化学分析结果得知,In、Cd主要赋存在铁闪锌矿中,Bi主要与磁黄铁矿关系密切,少部分Ag与磁黄铁矿等硫化物有关。因此,它们是组成矿体中硫化物的主要部分,也是In, Cd, Bi及部分Ag的载体矿物,同时还有含Sn⁴⁺和Sn²⁺的黄锡矿存在。F₁是一个极为重要的理想变量。

第二因子(F₂),以Sn, Sn⁴⁺的因子载荷高,而其它变量因子载荷很低。可见,Sn是以四价的锡石独立存在的。因而,F₂是控制Sn的主要理想变量,同时控制了少量的As, Bi及Sn²⁺。从地质观察结果表明,锡石、毒砂往往形成一组矿物组合,毒砂中伴生有少量自然铋。由于后期硫化物包裹溶蚀早期形成的锡石而有黄锡矿的产出,因而该因子中出现少量的Sn²⁺。

第三因子(F₃),以Sb, Pb载荷最高,为一以脆硫锑铅矿为主的Pb, Ag, Cu, Bi, Sb的硫盐矿物的理想变量。由于脆硫锑铅矿与黄锡矿关系极为密切,因而与Sn²⁺具有一定依存关系。因此,又可把F₃看成是控制Pb, Sb及部分Ag, Sn²⁺的主要理想变量,代表了形成脆硫锑铅矿等硫盐矿物的主要成矿阶段。

● 括号中表示经验补充关联成员,以下同⁽¹⁾。