

陕西略阳煎茶岭金矿床成矿作用探讨

姜修道<sup>1,2</sup>, 魏刚锋<sup>1,2</sup>, 张梦平<sup>3</sup>, 聂江涛<sup>1,2</sup>, 张颖<sup>1,2</sup>

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 西北有色地质勘查局 711 总队, 陕西 勉县 724212)

**摘要:**煎茶岭金矿床位于勉略宁三角区东北缘, 矿体产于环绕超基性岩体分布的含金蚀变带中, 属蚀变岩型矿床。由于对其成矿作用认识分歧较大, 严重影响了后续的找矿勘探工作。从矿床地质特征入手, 通过矿区岩矿石常量元素、微量元素、稀土元素以及硫、氢、氧同位素的测试分析, 探讨其控矿因素和成矿机理。结果表明, 矿床受叠加于接触带部位的韧性剪切带控制, 成矿不仅与超基性岩有关, 而且与花岗斑岩关系密切。花岗斑岩的侵入引起超基性岩的彻底蚀变, 同时导致原岩中的金等成矿物质被释放出来。矿石、蚀变超基性岩、白云岩中黄铁矿的硫同位素组成与花岗斑岩中黄铁矿的硫同位素组成具有较好的一致性, 并表现出一定的规律性, 说明花岗斑岩提供了成矿所需的硫; 矿石氢、氧同位素组成介于岩浆水与大气降水之间, 且多数样品聚集在雨水线附近, 暗示花岗斑岩提供了初始热液, 随着成矿作用的进行, 大气降水不断加入, 从而形成复合热液。鉴于矿床与花岗斑岩的密切关系以及铬云母化的产出特点, 根据同位素年龄, 认为矿床形成于印支中期—燕山中期。

**关键词:** 韧性剪切带; 花岗斑岩; 超基性岩; 成矿作用; 煎茶岭金矿床; 陕西略阳县

中图分类号: P618.51      文献标志码: A      文章编号: 1000-8527(2012)01-0061-10

Discussion on the Formation of Jianchaling Gold Deposit in Lüeyang, Shaanxi Province

JIANG Xiu-dao<sup>1,2</sup>, WEI Gang-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Meng-ping<sup>3</sup>, NIE Jiang-tao<sup>1,2</sup>, ZHANG Ying<sup>1,2</sup>

(1. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University,

Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. No. 711 Party of Northwest Georexploration Bureau for Nonferrous Metals, Mianxian, Shaanxi 724212, China)

**Abstract:** Jianchaling gold ore deposit, located in the northeast edge of Mianxian-Lüeyang-Ningqiang triangle area, is associated with ultrabasic rock and the ore bodies occur in the gold-bearing altering belt round the ultrabasic rock. Since the contentious understanding of mineralization, the subsequent exploration was influenced. Beginning with the geologic characteristics, ore-controlling factors and mineralization mechanism are discussed by measurement of major, trace and rare earth elements as well as S, H and O isotopic composition. The result shows that the deposit is controlled by ductile-brittle shear zone developed in the contact belt of ultrabasic rock and Sinian dolomite, and the mineralization is not only related with the ultrabasic rock, but also tightly with the granophyres. The emplacement of granophyres results in thorough alteration of the ultrabasic rock and the metallogenic elements to be released. Since  $\delta^{34}\text{S}$  of pyrites in the ore, ultrabasic rock and dolomite is approximate to that in the granophyres, and shows definite regularity spatially, it is believed that sulfur in the ores is derived from the granophyres. Hydrogen and oxygen isotope composition of the ores lies between magmatic and meteoric water, and most of them gather together near the meteoric water line, which suggests that the hydrothermal solution originated from the granophyres and gradually turned into mixed water with the meteoric water added succes-

收稿日期: 2011-06-10; 改回日期: 2011-10-26; 责任编辑: 戚开静。  
基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“煎茶岭金镍矿田构造演化及成矿作用研究”(1212010611807)。  
作者简介: 姜修道, 男, 副教授, 1960 年出生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事矿床地质教学与科研工作。  
Email: xiudaoj@chd.edu.cn.

sively in. In view of the close relation between the deposit and granophyres and the appearance of fuchsite, it is considered that the deposit is formed between intermediate Indosinian and intermediate Yanshanian according to the isotopic ages.

**Key words:** ductile shear belt; granophyre; ultrabasic rock; mineralization; Jianchaling gold deposit; Lüeyang County, Shaanxi Province

0 引言

煎茶岭金矿床位于松潘—甘孜造山带摩天岭褶皱系东部，勉县—略阳—阳平关(宁强)元古隆起区北缘，为一与超基性岩有关的大型金矿床。前人已做过不少研究工作，并取得了一批研究成果<sup>[1-3]</sup>。关于矿床成因，目前有4种不同看法：(1)金等成矿物质来自超基性岩，成矿热液为超基性岩浆热液<sup>[4]</sup>、中酸性岩浆热液<sup>[5-6]</sup>、源于地幔的酸性岩浆热液<sup>[7]</sup>、变质热液<sup>[8]</sup>或由岩浆热液和变质热液组成的混合热液<sup>[9]</sup>；(2)金等成矿物质主要来自鱼洞子群火山岩，其次为超基性岩，成矿

热液以变质热液和岩浆热液为主<sup>[10]</sup>；(3)成矿物质来自震旦系白云岩，变质作用和构造活动导致金的活化、迁移和富集成矿<sup>[11]</sup>；(4)成矿流体和成矿物质主要来自中酸性岩浆<sup>[12]</sup>。本文在研究煎茶岭金矿床地质地球化学特征的基础上，讨论该矿床的形成作用。

1 矿区地质概况

矿区出露地层有太古宙结晶基底鱼洞子群、中元古界过渡基底接官亭组、下震旦统盖层断头崖组和九道拐组以及下石炭统略阳组(图1)。其中鱼洞子群主要由花岗质片麻岩、浅粒岩、变粒

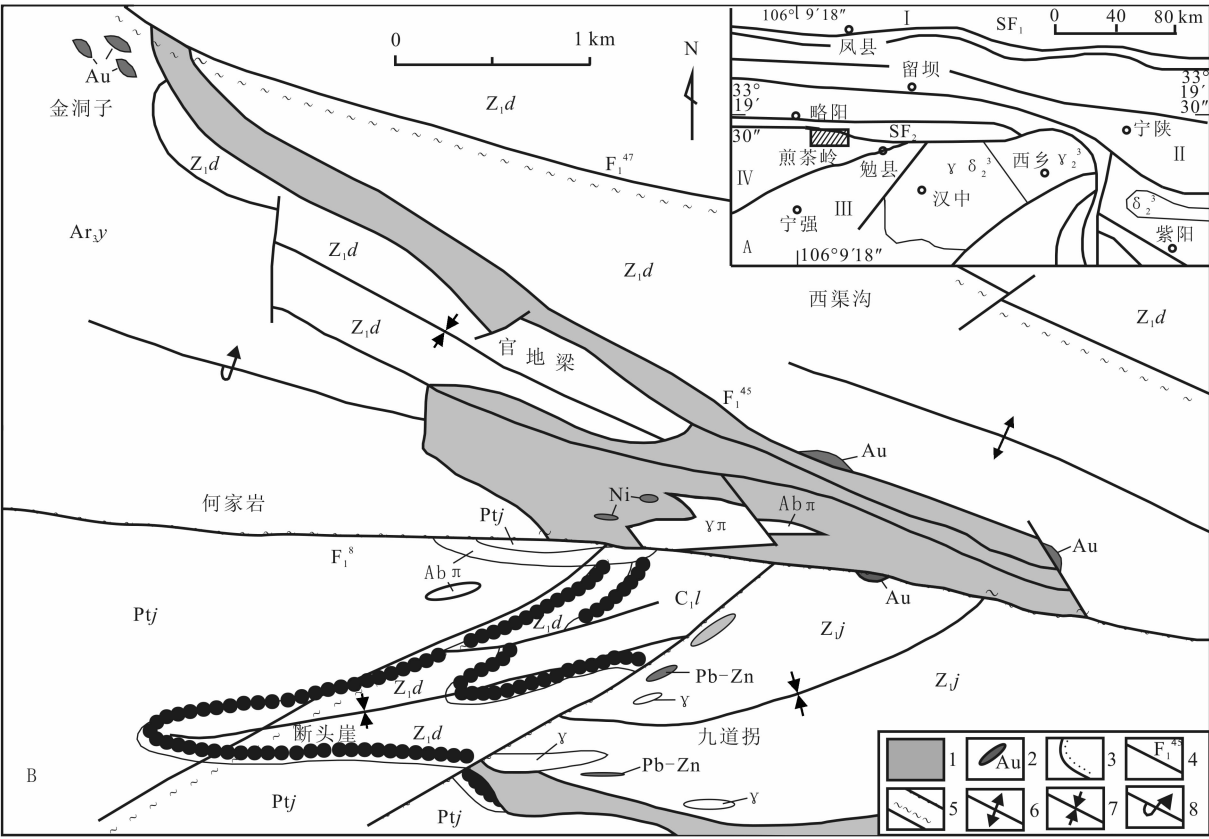


图1 煎茶岭矿床区域位置(A)及地质简图(B)(据任小华<sup>[8]</sup>, 2000, 修编)

Fig. 1 Regional location (A) and geological sketch (B) of Jianchaling deposit(modified after Ren<sup>[8]</sup>, 2000)

I. 华北地台; II. 秦岭造山带; III. 扬子地块; IV. 摩天岭微地块; SF<sub>1</sub>. 商丹缝合带; SF<sub>2</sub>. 勉略缝合带; C<sub>1</sub>l. 略阳组灰岩; Z<sub>1</sub>j. 九道拐组白云岩、灰岩、板岩; Z<sub>1</sub>d. 断头崖组白云岩; Ptj. 接官亭组细碧角斑岩; Ar<sub>3</sub>y. 渔洞子群混合岩、变粒岩、片麻岩; γ. 花岗岩; γπ. 花岗斑岩; Abπ. 钠长斑岩; 1. 超基性岩; 2. 矿体及矿种; 3. 不整合地质界限; 4. 断层及编号; 5. 韧性剪切带; 6. 背斜; 7. 向斜; 8. 倾伏倒转背斜

岩、黑云斜长片麻岩、角闪斜长片岩、绿泥绿帘片岩夹磁铁矿石岩组成, 分布于矿区西段。接官亭组为一套基性—酸性的浅变质火山—沉积岩系, 岩石以绿泥钠长石英片岩、绢云绿泥片岩、变质细碧岩和变质石英砂岩为主。断头崖组和九道拐组主要由白云岩、硅质白云岩、白云质灰岩和炭质板岩组成, 以断裂接触关系上覆于上述不同基底岩系之上。略阳组由石灰岩组成, 零星分布于超基性岩体南侧。

矿区构造活动具有强烈、多期次的特点。笔者在矿区厘定了两条韧性剪切带, 其中 NWW 向韧性剪切带横亘矿区中央, 宽度 2~3 km, 长度大于 10 km, 倾向  $10^{\circ}\sim 40^{\circ}$ , 局部倾向  $190^{\circ}\sim 220^{\circ}$ , 倾角变化于  $40^{\circ}\sim 85^{\circ}$  之间, 无论沿走向还是倾向均呈舒缓波状。NE 向韧性剪切带在接官亭—何家岩断裂以南出露较为连续, 向北东方向断续延伸至庙儿垭一带, 全长大于 7 km, 宽度约为 0.4 km, 总体走向  $50^{\circ}$ , 倾向南东(局部倾向北西), 倾角变化于  $30^{\circ}\sim 80^{\circ}$  之间。两条韧性剪切带在其长期的演化过程中至少经历了 3 期活动, 第一期压扭性变形仅发育在鱼洞子群和接官亭组, 说明两条韧性剪切带形成于中元古代末期; 断头崖组中大量 S—C 面理、旋转碎斑系、右行雁行状排列的方解石脉、石英脉以及 A 型褶皱等均显示第二期张扭性变形发生在震旦纪以后, 花岗斑岩侵位之前; 而花岗斑岩仅显示韧脆性变形, 且变形强度从岩体边缘向中心部位逐渐减弱, 表明第三期韧脆性变形发生在印支期(花岗斑岩年龄见下段)。矿区脆性断裂(层)十分发育, 它们是韧性剪切带演化晚期脆性变形的产物, 两条主干断裂( $F_1^8$  和  $F_1^{45}$ )分别位于超基性岩体南、北两侧(图 1)。研究表明<sup>[13-14]</sup>, 韧性剪切带不仅控制着矿区超基性岩和花岗斑岩的就位和分布, 而且还是金、镍矿床的控矿构造。

矿区侵入岩广泛发育, 其中规模较大且与矿床关系较密切者主要是超基性岩、花岗斑岩和钠长斑岩。超基性岩体呈 NWW 向位于矿区中央, 出露面积约 5 km<sup>2</sup>。由于受剪切带控制, 上下盘界面均呈舒缓波状, 平面上呈大透镜状, 剖面上呈向 NEE 侧伏的陡倾岩墙状。后期强烈的构造、岩浆和热液活动, 使岩体发生了彻底的蚀变, 主要产物包括纤胶蛇纹岩、叶蛇纹岩、滑镁岩、菱镁岩和透闪岩等。蚀变岩多呈带状和透镜状, 产状与 NWW 向韧性剪切带一致。根据与围岩的接触

关系, 超基性岩侵入的地质时代应晚于震旦纪, 而早于印支期<sup>[13]</sup>。花岗斑岩侵位于超基性岩体中段南缘, 呈岩株状, 出露面积 0.34 km<sup>2</sup>, 闫臻等(私人通信)采用锆石 U—Pb 法测得同位素年龄为  $(216\pm 4)$  Ma。钠长斑岩分布较为广泛, 但主要集中在超基性岩体中部, 大致呈左行斜列的脉岩群, 构成了一个宽约 0.1~0.3 km 的脉岩带, 产状与 NWW 向韧性剪切带一致。

## 2 矿床地质特征

在煎茶岭矿区, 已发现的金矿化类型有 8 种之多<sup>[7]</sup>, 但现有矿体均属蚀变岩型。含金蚀变岩带位于蚀变超基性岩体与震旦系白云岩的北、东、南接触带处。在北、东部连续性较好, 而在南接触带, 由于后期断裂活动的破坏, 连续性较差。蚀变带累计长度大于 6 km, 宽度一般在 1~30 m 之间, 局部可达 60 余米, 延深超过 800 m。形态呈似板状, 沿走向和倾向均有膨缩变化, 产状与控矿剪切带一致。

目前已查明在北、东含金蚀变带赋存有 5 个金矿体, 其中一号矿体(位于北矿带 32~71 线间)为主矿体, 也是本次研究的主要对象。南含金蚀变带新发现一个金矿体, 正在勘探之中。北矿带矿体总体连续性较好, 形态以似板状为主, 局部膨大成透镜状, 沿走向和倾向均呈舒缓波状(图 2), 产状与含金蚀变带基本一致。矿体上盘为震旦系断头崖组白云岩, 下盘主要为蛇纹岩, 局部见滑镁岩。矿体中主要蚀变类型有硅化、白云石化和蛇纹石化, 且分带明显。矿体上部以硅化和白云石化为主, 蛇纹石化较弱, 而下部以蛇纹石化和白云石化为主, 硅化较弱。其中硅化呈细脉状、网脉状以及团块状; 白云石化以脉状为主, 栎状构造发育; 蛇纹石化呈团块状、条带状、簇状、放射状。另外, 在东段矿体下盘的滑镁岩中发育有铬云母化。矿石中黄铁矿有 3 个世代: 第一世代黄铁矿粒度较粗, 粒径多为 0.1~2 mm, 以半自形—自形立方体为主, 在矿石中沿糜棱面理或围绕碎斑呈浸染状、团块状分布。该世代黄铁矿中常含有磁黄铁矿、针镍矿、闪锌矿、方铅矿包体, 含金性差; 第二世代黄铁矿粒度细小, 呈粉尘状, 粒径为 0.002~0.100 mm, 以它形—半自形为主, 在矿石中呈浸染状和平行细脉状分布。该世代黄铁矿显著富砷, 含金性好; 第三世代黄铁矿肉眼不可见, 镜下呈黄白色, 它形—自形立

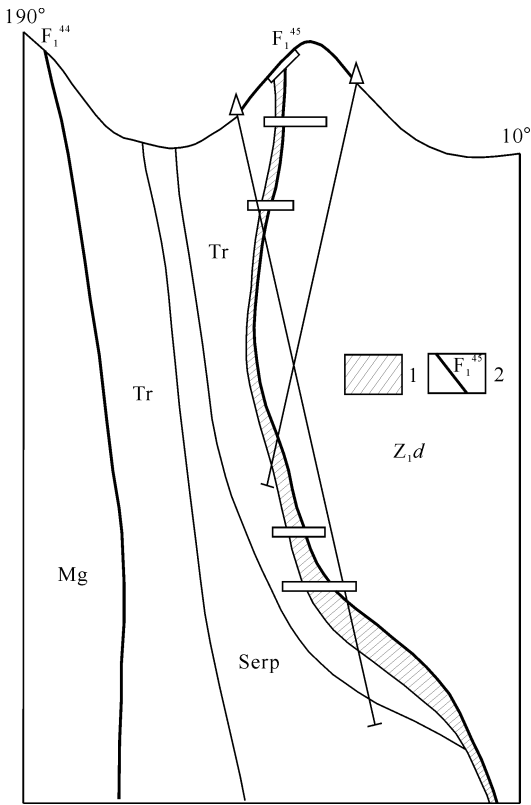


图2 煎茶岭金矿 60 勘探线剖面图(据任小华<sup>[8]</sup>, 2000, 修编)  
Fig.2 No. 60 line section of Jianchaling gold deposit  
(modified after Ren<sup>[8]</sup>, 2000)

1. 金矿体; 2. 断层及编号; Mg. 菱镁岩; Tr. 滑镁岩; Serp. 蛇纹岩; Z<sub>1</sub>d. 断头崖组白云岩

方体, 微粒状分布在晚期含雌黄、雄黄的石英碳酸盐细脉中。

南矿带矿体产于超基性岩体南侧接触带上的蚀变白云岩中(图 1), 呈大透镜状, 倾向 190°~210°, 倾角 60°~85°, 无论沿走向还是顺倾向均呈舒缓波状。其上盘围岩为震旦系九道拐组白云岩, 下盘为滑镁岩。矿体中硅化十分强烈, 主要呈细脉状和脉状。其中细脉宽度 1~2 mm, 呈密集平行排列, 脉体及其附近围岩中发育浸染状细粒黄铁矿; 石英脉宽度 20~30 cm, 其中可见浸染状和团块状黄铁矿。另外, 细脉状白云石化也较为发育, 局部可见白云母化。

东矿带矿体位于超基性岩体东侧的张家山一带, 亦为蚀变白云岩型。矿体呈透镜状, 倾向 60°~80°, 倾角 55°~80°, 其上盘围岩为断头崖组白云岩, 下盘为菱镁岩。围岩蚀变以硅化、白云石化和铬云母化为主, 其中硅化呈团块状和细脉状, 白云石化呈细脉状并切割石英脉, 铬云母化呈条带状, 广泛分布于矿体和下盘围岩中。矿石矿物

黄铁矿有 2 个世代: 第一世代黄铁矿呈中细粒自形一半自形结构, 浸染状、细脉状构造; 第二世代黄铁矿呈粉末状, 半自形—它形结构, 微细脉状构造, 为主要载金矿物。

### 3 矿床地球化学特征

#### 3.1 样品描述

本次研究对部分岩矿石样品进行了常量元素、微量元素和稀土元素测试(表 1, 表 2), 测试样品的地质特征如下。

D860H-1—4 采自北矿带何家岩金矿 860 中段, 其中 D860H-1 采自矿体上盘, 为弱蚀变白云岩, 主要蚀变类型为团块状硅化和细脉状白云石化; D860H-2 和 D860H-3 为矿石, 岩性为强蚀变白云岩, 蚀变类型主要有硅化、白云石化和蛇纹石化。矿石矿物黄铁矿有细粒和粉末状两个世代。两样品的不同之处在于 D860H-2 取自矿体上部(靠近白云岩), 蚀变类型以硅化和白云石化为主, 蛇纹石化较弱, 而 D860H-3 取自矿体下部(靠近蚀变超基性岩), 矿化蚀变更强, 蚀变类型除硅化、白云石化外, 蛇纹石化也十分强烈; D860H-4 为矿体下盘蚀变蛇纹岩, 蚀变类型以白云石化为主, 另外可见团块状、细脉状细粒自形一半自形黄铁矿。

D22H-1—3 采自南矿带, 其中 D22H-1 为矿体上盘碎裂白云岩, 发育弱硅化和白云石化; D22H-2 为矿石, 岩性为强蚀变白云岩, 蚀变以密集平行排列的细脉状硅化和白云石化为特征, 脉宽 1~2 mm, 其中石英脉多含有细粒半自形—它形黄铁矿; D22H-3 取自矿体中含黄铁矿的中粗粒石英脉。

PZH-1、4、6、8、10 来自郑家沟实测剖面, 其中 PZH-1 取自北矿带矿体上盘围岩, 为蚀变白云岩, 特征与 D860H-1 相似; PZH-4、6、8、10 位于北矿带矿体下盘且远离矿体, 岩性均为蛇纹岩, 代表矿区超基性岩的蚀变产物; D965H-1 亦为北矿带 965 中段矿体上盘蚀变白云岩, 特征与 D860H-1 相似; D9H-1 为黄铁矿化花岗斑岩, 斑晶为斜长石和石英, 基质由斜长石、钾长石和石英组成, 黄铁矿呈自形一半自形粒状, 浸染状分布, 含量约 6%。

#### 3.2 常量元素

矿区一号矿体矿石和围岩的常量元素含量如表 1 所示。与矿体上盘蚀变白云岩相比, 矿石中

表 1 煎茶岭金矿床矿石及围岩的常量元素含量( $w_B/\%$ )

Table 1 Major element contents of gold ores and wall rocks from Jianchaling gold deposit (%)

样号	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失量	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	总量
D860H-1	3.19	0.006	0.17	0.24	0.11	0.039	20.50	31.70	0.10	0.030	0.060	43.92	0.07	100.06
D860H-2	25.05	0.007	0.36	3.22	1.51	0.11	19.51	17.12	0.19	0.094	0.011	32.45	0.42	99.63
D860H-3	31.39	0.001	0.26	3.35	2.58	0.11	30.87	7.21	0.005	0.013	0.008	23.00	4.98	98.80
D860H-4	42.00	0.008	0.53	0.41	3.51	0.056	29.59	3.17	0.004	0.002	0.007	20.64	2.03	99.93
PZH-9	41.76	0.002	0.26	4.76	1.38	0.036	38.93	0.12	0.002	0.003	0.008	12.66	11.95	99.92
PZH-10	41.38	0.001	0.33	5.71	0.73	0.031	38.41	0.08	0.087	0.008	0.008	12.93	12.15	99.71

注：样品由西安地质矿产研究所测试。

表 2 煎茶岭金矿床岩石和矿石的微量元素含量( $w_B/(\mu\text{g/g})$ )

Table 2 Trace element contents of rocks and ores in Jianchaling gold deposit( $\mu\text{g/g}$ )

样号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Zr
D860H-2	11.590	0.259	4.319	14.16	1608	63.18	1071	9.736	49.98	2.669	5.133	93.49	2.193
D860H-3	15.690	0.162	5.917	19.69	2096	92.97	1314	6.135	73.76	2.345	1.597	45.92	1.154
D22H-2	6.654	0.372	3.400	8612	1817	89.83	686.9	105.9	695.1	7.344	2.937	154.7	33.69
D22H-3	9.149	0.308	2.941	54.10	777.5	46.07	366.0	45.52	290.0	28.32	11.69	113.3	45.61
D9H-1	3.927	1.126	0.002	13.24	39.74	9.569	12.44	44.70	42.88	30.14	6.637	25.77	130.9
PZH-4	2.581	0.164	8.284	18.77	2583	115.1	1362	11.50	40.20	1.022	0.298	3.302	0.621
PZH-6	2.929	0.221	7.234	22.78	1968	82.20	1488	18.58	46.47	1.058	0.350	1.717	0.338
PZH-8	1.945	0.237	7.989	31.32	2096	100.3	1582	14.70	40.72	1.159	0.276	1.621	3.235
PZH-10	1.083	0.195	8.703	21.16	2694	102.8	1740	5.335	41.75	1.194	0.365	1.250	1.343
PZH-1	2.714	0.106	3.623	9.084	19.96	11.65	48.02	10.28	44.54	2.893	2.866	123.8	8.988
D860H-1	1.413	0.091	4.212	3.133	64.98	10.03	72.76	3.439	11.24	1.507	0.738	65.30	1.615
D965H-1	1.463	0.129	4.372	2.808	51.33	7.084	30.46	4.810	22.87	1.590	0.415	92.92	2.691
D22H-1	2.531	0.022	4.176	27.88	70.94	10.15	28.74	7.856	71.68	2.209	0.789	83.09	1.839

样号	Nb	Cd	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U	W	Mo	As	Sb
D860H-2	0.173	0.270	1.079	30.52	0.052	0.012	19.54	0.177	0.100	5.25	0.95	2391	8.03
D860H-3	0.184	0.513	0.567	28.93	0.026	0.009	15.22	0.079	0.111	2.92	0.84	279	2.19
D22H-2	2.300	11.58	0.679	73.19	0.799	0.127	23.86	2.029	0.926	97.40	1.48	1865	21.70
D22H-3	2.587	3.707	1.222	361.4	1.167	0.195	33.53	2.941	1.084	16.40	0.81	1465	16.80
D9H-1	13.92	0.597	0.311	276.6	3.400	1.051	38.99	3.054	1.478	1.48	3.34	8.80	0.85
PZH-4	0.091	0.153	0.036	4.611	0.011	0.008	4.183	0.019	0.041				
PZH-6	0.051	0.084	0.107	7.148	0.007	0.003	4.699	0.015	0.148				
PZH-8	0.079	0.082	0.075	6.001	0.083	0.009	4.671	0.168	0.812				
PZH-10	0.122	0.042	0.008	6.925	0.034	0.009	6.022	0.042	2.868				
PZH-1	0.798	1.560	0.163	27.43	0.211	0.042	8.049	0.473	0.242				
D860H-1	0.077	0.051	0.027	20.18	0.035	0.006	3.042	0.091	0.409				
D965H-1	0.127	1.154	0.041	22.21	0.052	0.008	1.830	0.089	0.283				
D22H-1	0.154	3.221	0.027	30.16	0.044	0.009	3.473	0.125	0.782				

注：W、Mo、As、Sb 含量由西安地质矿产研究所测试中心测试，其余样品由长安大学国土资源部成矿作用及其动力学开放研究室采用 ICP-MS 测试。

SiO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 FeO 含量大幅度升高，而 CaO 含量显著降低。矿体下部（靠近蚀变超基性岩一侧）MgO 的含量显著增加，上部则接近蚀变白云岩；与下盘围岩蛇纹岩相比，矿石中 SiO<sub>2</sub> 和 MgO 含量较低，而 CaO 较高。从白云岩到蛇纹岩，矿石的常量元素含量具有过渡性质，这应与成矿过程中强烈的硅化、黄铁矿化和蛇纹石化有关，说明成矿热液带入了 SiO<sub>2</sub>、FeO<sub>T</sub> 和 MgO，而原岩中的部分 CaO 被带出。通过对比蚀变与未蚀变蛇纹岩的常量元素特征，可以发现，矿石中的 FeO<sub>T</sub> 和 MgO

来自超基性岩，而 SiO<sub>2</sub>应来自花岗斑岩。

3.3 微量元素

从煎茶岭金矿床岩石和矿石的微量元素含量(表 2)可以看出,矿石中 Cr、Co、Ni 的含量普遍较高,显示了金矿床与超基性岩的密切联系。然而在原始地幔标准化配分曲线(图 3(a))上,亲石元素 Li、Be、Rb、Cs、Ba、U、W 和亲铜元素 Zn、Cd、Pb、As、Sb 均表现出明显的富集特征,其中 Be、Cd、Cs、Pb 的富集倍数在数十至数百之间,而 W、As、Sb 的富集倍数均在数百至数千之间,最高可达一万多倍(As)。与蛇纹岩(图 3(b))相比,除 Cr、Co、Ni 含量稍低外,Rb、Sr、Zr、Nb、Cd、Cs、Ba、Hf、Ta、Pb、Th 含量均大幅升高,Li、Be、Cu、Zn 含量也显著增加。而与白云岩(图 3(c))相比,尽管所测样品均取自矿体上盘,可能不同程度地受到围岩蚀变的影响,但依然可以看出,两者曲线形态明显不同,主要表现在矿石中 Cr、Co、Ni、Cs、Pb 含量大幅升高,Li、Be、Cu、Zn、Zr、Nb、Cd、Ba、Hf、Ta、Th 含量也显著增加。有趣的是,矿石中除 Cr、Co、Ni 含量接近蛇纹岩外,其他含量显著增加的元素在花岗斑岩中的含量(表 2,图 3(b))均较高,表明成矿除与超基性岩有关外,还与花岗斑岩密切相关。

另外,从表 2 和图 3(a)中还可以看出,南矿带矿石样品中 Zr、Nb、Cd、Ba、Hf、Ta、Pb、Th、W、As、Sb 等元素的含量明显高于北矿带。在产出状态上,南矿带金矿与花岗斑岩同位于超基性岩的南接触带上,二者不仅距离近,而且构造连通性好(与北矿带相比)。表现在矿床特征上,南矿带金矿蚀变强度大,蚀变类型除北矿带常见的硅化、白云石化、蛇纹石化外,亦发育白云母化,而且硅化特别强烈,以至于形成宽 20 余厘米、长数米的中粗粒石英脉。南、北矿带金矿石微量元素的这种特点进一步说明了金矿与花岗斑岩的成因联系。

3.4 稀土元素

煎茶岭金矿床岩石和矿石稀土元素含量及特征参数见表 3,其球粒陨石(26 个球粒陨石平均值<sup>[15]</sup>)标准化配分模式如图 3 所示。与微量元素类似,南矿带矿石的稀土总量显著高于北矿带。与围岩蛇纹岩和白云岩相比,矿石的稀土总量高于蛇纹岩,而白云岩的稀土总量介于南、北矿带矿石之间;矿石 LREE/HREE、(La/Yb)<sub>N</sub>和(La/Sm)<sub>N</sub>比值明显高于蛇纹岩和白云岩,而(Gd/Yb)<sub>N</sub>比值及轻、重稀土相对分馏程度与蛇纹岩和

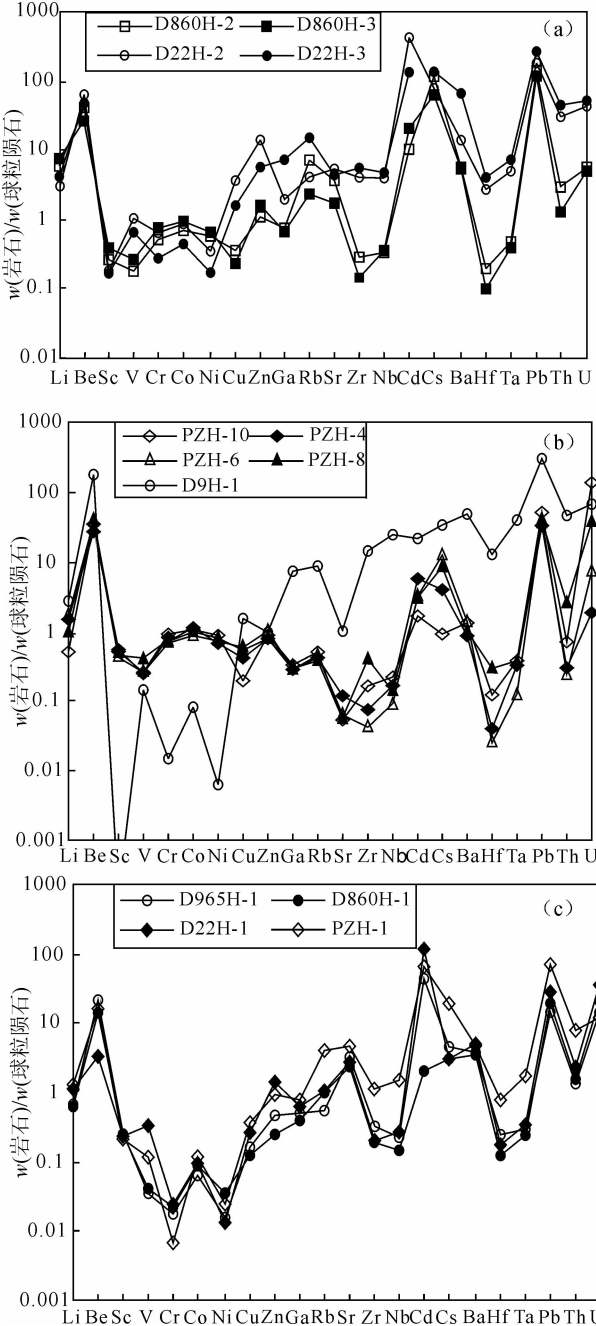


图 3 煎茶岭金矿床岩石和矿石的微量元素原始地幔标准化配分曲线

Fig. 3 Protomantle-normalized distribution patterns of trace element for ores and rocks from Jianchaling gold deposit (a)金矿石;(b)花岗斑岩和蛇纹岩;(c)白云岩

白云岩相近。这说明矿石比围岩更富轻稀土元素,其轻稀土元素分馏也更为显著。另外,矿石具有弱的 Eu 正异常,Ce 异常不明显,而蛇纹岩和白云岩显示弱的 Ce 负异常,δEu 值则有正有负。

与矿区花岗斑岩(表 3,图 4(b))相比,除稀土总量较低外,矿石的 LREE/HREE、(La/Yb)<sub>N</sub>、(La/Sm)<sub>N</sub>、(Gd/Yb)<sub>N</sub>和(La/Sm)<sub>N</sub>/(Gd/Yb)<sub>N</sub>比

表 3 煎茶岭金矿床矿石和岩石稀土元素含量和特征参数( $w_B/(\mu\text{g/g})$ )

Table 3 REE contents and characteristics parameters of ores and rocks in Jianchaling gold deposit( $\mu\text{g/g}$ )

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm
D860H-2	0.624	1.015	0.111	0.431	0.072	0.040	0.092	0.007	0.048	0.352	0.012	0.032	0.002
D860H-3	0.497	0.760	0.082	0.292	0.049	0.037	0.075	0.006	0.030	0.190	0.007	0.021	0.002
D22H-2	12.07	23.68	2.293	8.154	1.164	0.393	1.427	0.126	0.531	3.822	0.114	0.394	0.057
D22H-3	10.22	20.38	2.256	8.544	1.505	0.571	1.606	0.162	0.737	3.812	0.150	0.452	0.061
D9H-1	14.00	23.55	2.667	9.394	1.475	0.445	1.815	0.225	1.237	6.146	0.271	0.880	0.136
PZH-4	0.386	0.476	0.077	0.272	0.053	0.010	0.084	0.007	0.047	0.349	0.009	0.031	0.002
PZH-6	0.165	0.157	0.031	0.119	0.029	0.011	0.027	0.003	0.019	0.134	0.004	0.012	0.002
PZH-8	0.554	0.648	0.107	0.410	0.093	0.019	0.112	0.012	0.073	0.430	0.016	0.050	0.007
PZH-10	0.331	0.437	0.044	0.160	0.034	0.015	0.048	0.004	0.024	0.180	0.005	0.018	0.001
PZH-1	4.752	8.137	1.007	4.272	0.820	0.198	0.987	0.132	0.734	5.797	0.163	0.492	0.056
D860H-1	0.787	0.917	0.164	0.796	0.182	0.053	0.219	0.029	0.172	1.238	0.035	0.088	0.008
D965H-1	1.876	1.882	0.280	1.187	0.211	0.089	0.279	0.032	0.202	1.671	0.041	0.103	0.013
D22H-1	1.567	2.233	0.265	1.013	0.178	0.083	0.315	0.043	0.248	1.786	0.053	0.167	0.018
样号	Yb	Lu	$\Sigma$ REE	LREE/HREE	$(\text{La/Yb})_N$	$(\text{La/Sm})_N$	$(\text{Gd/Yb})_N$	$\delta\text{Eu}$	$(\text{La/Sm})_N/(\text{Gd/Yb})_N$				
D860H-2	0.026	0.003	2.867	10.329	14.250	5.417	2.169	1.676	2.498				
D860H-3	0.022	0.003	2.073	10.343	13.413	6.339	2.089	2.082	3.034				
D22H-2	0.379	0.057	54.661	15.479	18.909	6.481	2.308	1.040	2.808				
D22H-3	0.460	0.062	50.978	11.782	13.192	4.244	2.140	1.253	1.983				
D9H-1	1.011	0.147	63.399	9.006	8.222	5.932	1.100	0.928	5.391				
PZH-4	0.022	0.002	1.827	6.245	10.418	4.552	2.340	0.511	1.945				
PZH-6	0.008	0.002	0.723	6.649	12.246	3.556	2.069	1.341	1.719				
PZH-8	0.037	0.008	2.576	5.813	8.890	3.723	1.855	0.635	2.007				
PZH-10	0.018	0.003	1.322	8.438	10.918	6.085	1.634	1.267	3.723				
PZH-1	0.344	0.046	27.937	6.495	8.202	3.622	1.759	0.751	2.060				
D860H-1	0.059	0.006	4.753	4.706	7.920	2.703	2.275	0.906	1.188				
D965H-1	0.072	0.008	7.946	7.367	15.470	5.557	2.375	1.251	2.340				
D22H-1	0.130	0.017	8.116	5.387	7.157	5.202	1.485	1.196	3.705				

注：样品由长安大学国土资源部成矿作用及其动力学开放研究实验室采用 ICP-MS 测试。

值均与花岗斑岩相近，而且两者 Ce 异常均不明显，表明矿石与花岗斑岩之间具有密切的成因联系。

**3.5 硫同位素**

本次研究共测试硫同位素样品 9 件，其中金矿体 8 件，花岗斑岩 1 件，均为细粒黄铁矿。花岗斑岩中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值为  $+10.02\text{‰}$ ，矿石中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值变化于  $+12.33\text{‰} \sim +17.08\text{‰}$  之间(表 4)，平均值为  $+15.32\text{‰}$ 。另外，甘先平等<sup>①</sup>测得蚀变超基性岩中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值介于  $+7.8\text{‰} \sim +15.3\text{‰}$  之间(平均值  $+11.8\text{‰}$ )，白云岩中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值介于  $+10.3\text{‰} \sim +16.4\text{‰}$  之间(平均值  $+14.1\text{‰}$ )。可以看出，矿石中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值无论是变化范围还是平均值均与蚀变超基性岩和白云岩相近，其中蚀变超基性岩的硫同位素组成远离镁铁、超镁铁质岩石的  $0 \sim +3\text{‰}$ <sup>[16]</sup>，而明显地富集重硫，故不能简单而笼统地得出矿石中硫来自超基性岩和白云岩的结论。野外调研发现，矿区蚀变超基性岩和白云岩均位于 NWW 向韧性剪切带中，蚀变超基性岩中的黄铁矿并非原岩残留，而是超基性岩在蚀变过程中形成的；而白云岩中的黄铁矿普遍与硅化和碳酸盐化相伴，因此也应是剪切带长期活动期间热液蚀变的产物，而不能代表原始白云岩的硫同位素组成。由此看来，矿石、超基性岩和白云岩硫同位素组成的相似性只能说明所测样品黄铁矿具有相似的形成作用和一致的硫源。研究表明<sup>②[17]</sup>，超基性岩的蚀变作

① 甘先平等. 煎茶岭金矿及超基性岩体研究报告. 1994.  
② 姜修道等. 煎茶岭金镍矿田构造演化及成矿作用研究报告. 2009.

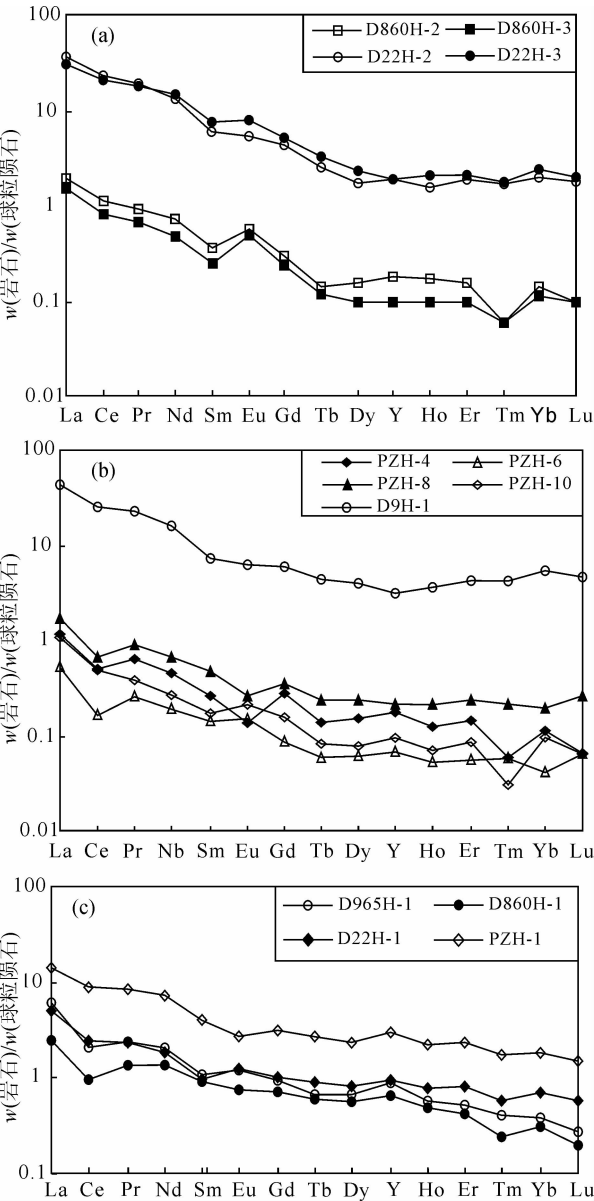


图4 煎茶岭金矿床矿石和岩石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线

Fig. 4 Chondrite-normalized distribution patterns of REE for ores and rocks from Jianchaling gold deposit

(a) 金矿石; (b) 花岗斑岩和蛇纹岩; (c) 白云岩

用与花岗斑岩的侵入有关。从硫同位素组成来看,花岗斑岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值与矿石、超基性岩和白云岩中黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值也颇为接近,不同之处在于从花岗斑岩到蚀变超基性岩,再到白云岩和矿石, $\delta^{34}\text{S}$ 值有逐渐升高的趋势,而这种趋势与它们在空间上的分布规律一致(蚀变超基性岩作为直接围岩环绕花岗斑岩分布,白云岩产于超基性岩外围,而金矿赋存在蚀变超基性岩和白云岩的接触带上)。这说明矿石、蚀变超基性岩和白云岩样品中的硫均来自花岗斑岩,形成地质条件和物

表4 煎茶岭金矿床黄铁矿中硫同位素组成  
Table 4 Sulfur isotope composition of pyrite from the Jianchaling gold deposit

样品编号	测试矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}/\text{‰}$	产状
D006-1	黄铁矿	+16.26	北矿带蚀变白云岩型金矿
D006-2	黄铁矿	+17.08	北矿带蚀变白云岩型金矿
D860S	黄铁矿	+16.71	北矿带蚀变白云岩型金矿
D860B-2	黄铁矿	+16.52	北矿带蚀变白云岩型金矿
D093-1	黄铁矿	+12.33	东矿带蚀变白云岩型金矿
PD900YMC-1	黄铁矿	+13.31	东矿带蚀变白云岩型金矿
PD970WCM3	黄铁矿	+13.47	东矿带蚀变白云岩型金矿
PD970CM6	黄铁矿	+16.90	东矿带蚀变白云岩型金矿
D9S	黄铁矿	+10.02	花岗斑岩

注:样品由宜昌地质矿产研究所同位素地球化学实验室测试。

理化学条件的差异导致其硫同位素组成有所不同。

3.6 氢、氧同位素

矿体及矿化体中石英流体包裹体的氢、氧同位素组成如表5所示(测试样品均采自矿体及矿化体中的石英脉),从中可以看出, $\delta^{18}\text{O}$ 值变化于 $-8.89\text{‰}$ ~ $1.42\text{‰}$ 之间, $\delta\text{D}$ 值变化于 $-84.0\text{‰}$ 和 $-64.2\text{‰}$ 之间。在成矿热液的氢、氧同位素组成图(图5)上,矿石的氢、氧同位素组成均位于岩浆水和雨水线之间,且大部分样品聚集在雨水线附近,表明成矿热液是由岩浆水和大气降水组成的复合水。

表5 煎茶岭金矿床石英流体包裹体的氢、氧同位素组成  
Table 5 Oxygen and hydrogen isotope compositions of fluid inclusions in the quartz from Jianchaling gold deposit

样品编号	测试矿物	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	产状
D006-1	石英	1.42	-80.4	北矿带金矿体中石英细脉
D158-1	石英	-3.84	-69.2	北矿带金矿体中石英细脉
D078-1	石英	-5.58	-64.8	南矿带金矿体中石英脉
D151-1	石英	-6.37	-67.4	南矿带金矿化体中石英细脉
D153-1	石英	-7.29	-68.9	南矿带金矿化体中石英细脉
D162-1	石英	-4.22	-64.2	南矿带金矿化体中石英细脉
PD900YMW-1	石英	-7.21	-72.8	东矿带金矿体中石英细脉
PD900YMW-2	石英	-8.68	-84.0	东矿带金矿体中石英细脉
PD900CM6	石英	-8.89	-69.5	东矿带金矿体中石英细脉

注:样品由宜昌地质矿产研究所同位素地球化学实验室测试。

4 成矿作用讨论与结论

煎茶岭含金蚀变带位于蚀变超基性岩体与震



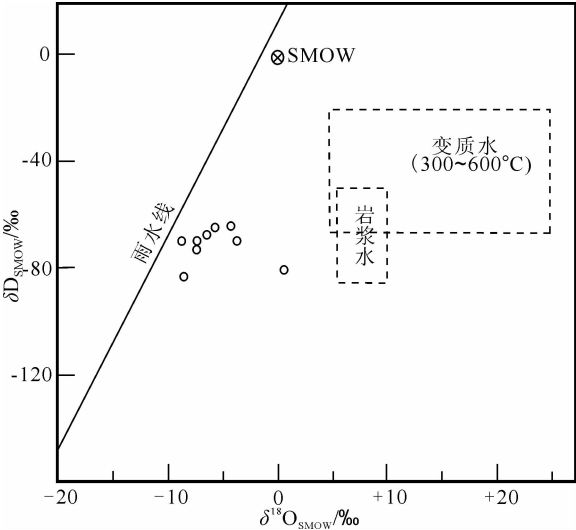


图 5 煎茶岭金矿床石英流体  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} - \delta\text{D}_{\text{SMOW}}$  图解  
Fig. 5 Diagram showing  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} - \delta\text{D}_{\text{SMOW}}$  of fluid inclusion in the quartz from Jianchaling gold deposit

旦系白云岩的接触带上，已探明矿体均分布于距离花岗斑岩 600 ~ 2 300 m 的范围内，其中主要矿体集中在 600 ~ 1 100 m 之间，矿体严格受控矿剪切带控制。

从地球化学特征来看，矿石中  $\text{FeO}_T$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Co}$ 、 $\text{Ni}$  含量普遍较高，表明了金矿床与超基性岩的亲缘性，加之超基性岩的金含量显著高于其他围岩<sup>[8]</sup>、成矿与超基性岩蚀变同期，因此认为超基性岩是金矿的矿源岩；而矿石中富集  $\text{SiO}_2$ 、亲石元素 ( $\text{Li}$ 、 $\text{Be}$ 、 $\text{Rb}$ 、 $\text{Cs}$ 、 $\text{Ba}$ 、 $\text{U}$ 、 $\text{W}$ ) 和亲铜元素 ( $\text{Zn}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{As}$ 、 $\text{Sb}$ )，又显示了与花岗斑岩的密切关系。由于超基性岩稀土元素含量普遍较低，因此矿石的稀土元素特征更多地表现出与花岗斑岩的一致性。

稳定同位素组成特征表明，矿石中硫来源于花岗斑岩；成矿流体中水为岩浆水和大气降水组成的混合水。

矿区花岗斑岩的锆石  $\text{U} - \text{Pb}$  年龄为  $(216 \pm 4)$  Ma，应代表成矿年龄上限。矿床中铬云母的  $\text{K} - \text{Ar}$  法年龄为  $(114.2 \pm 14.9)$  Ma<sup>[18]</sup>，鉴于其分布范围较之矿体更为宽泛，在矿体中可见呈细脉状分布，故应为成矿末期产物。据此，认为煎茶岭金矿床的形成时代为印支中期—燕山中期。

综上所述，煎茶岭金矿床的成矿过程可概括为：中元古代末期，在接官亭组沉积之后，区内发生了韧性剪切变形，形成 NWW 向和 NE 向共轭韧性剪切带。晚元古代晚期，研究区随扬子板块

一同进入稳定的被动大陆边缘演化阶段，广泛沉积了震旦统断头崖组 and 九道拐组；加里东—海西期，NWW 向和 NE 向张扭性韧性剪切带交汇部位为超基性岩浆的侵入提供通道，形成了煎茶岭超基性岩。印支期，随着华北板块与扬子板块的碰撞拼合<sup>[19]</sup>，区内构造活动再次加强，北西西向和北东向韧性剪切带发生第三期活动(压扭性)，花岗斑岩再次沿其交汇部位侵入于超基性岩体中段。花岗斑岩的侵入，导致超基性岩的彻底蚀变，在形成蛇纹岩、菱镁岩、滑镁岩的同时，原岩中的金等成矿物质被释放出来，并进入热液。花岗斑岩不仅提供了初始的成矿流体，也提供了成矿所需的硫。在含矿热液沿韧性剪切带运移的过程中，大气降水不断加入其中。随着温度压力的降低，当含矿热液运移到超基性岩与震旦系白云岩的接触带时，由于白云岩性脆，在韧性剪切作用下易产生裂隙，加之化学性质活泼，含矿热液便在接触带附近的白云岩中通过充填、交代使金等成矿物质沉淀，形成了煎茶岭金矿床。

致谢：野外调研期间，得到何家岩金矿、实达公司镍矿和煎茶岭镍业公司的大力支持，在此表示衷心的感谢。

参考文献：

[1] 廖俊红. 煎茶岭金矿床地质特征及找矿前景分析 [M] // 王相, 王东生. 陕西勉略阳火山岩带主要金属矿化类型及超大型矿床成矿远景探讨. 兰州: 兰州大学出版社, 1990: 85 - 103.

[2] 王相, 唐荣扬, 李实, 等. 秦岭造山与金属成矿 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 273 - 300.

[3] 胡建明. 煎茶岭金矿床的控矿因素分析及找矿方向 [J]. 矿产与地质, 2002, 16(1): 17 - 21.

[4] 张复新, 汪军谊. 陕西煎茶岭超基性岩与金矿床成因关系 [J]. 黄金地质, 1999, 5(2): 14 - 20.

[5] 庞奖励, 裴渝卓, 刘雁. 论超基性岩在煎茶岭金矿床成矿过程中的作用 [J]. 地质找矿论丛, 1994, 9(3): 59 - 65.

[6] 庞奖励, 孙根年. 陕西煎茶岭矿床的稀土元素地球化学行为 [J]. 中国稀土学报, 1999, 17(4): 359 - 364.

[7] 廖俊红. 陕西略阳煎茶岭金矿床成矿规律及成矿模式 [J]. 有色金属矿产与勘查, 1999, 8(1): 21 - 28.

[8] 任小华. 陕西煎茶岭金矿床地质特征及其成因意义 [J]. 矿产与地质, 2000, 14(2): 70 - 75.

[9] 王瑞延, 赫英, 王新. 煎茶岭大型金矿床成矿机理探讨 [J]. 西北地质科学, 2000, 21(1): 19 - 26.

[10] 胡建明, 董光法. 略阳县煎茶岭金矿矿体的空间展布规律及找矿方向 [J]. 大地构造与成矿学, 2002, 26(1): 75 - 80.

[11] 王平安, 陈毓川, 裴荣富, 等. 秦岭造山带区域矿床成矿

系列、构造-成矿旋回与演化 [M]. 北京: 地质出版社, 1998: 14-90.

[12] 郑崔勇, 刘建党, 袁波, 等. 与煎茶岭金矿有关超基性岩体地球化学特征 [J]. 地质与勘探, 2007, 43(6): 52-57.

[13] 姜修道, 魏刚峰, 聂江涛. 煎茶岭镍矿: 是岩浆还是热液成因 [J]. 矿床地质, 2010, 29(6): 1112-1124.

[14] 聂江涛, 魏刚峰, 姜修道, 等. 煎茶岭韧性剪切带的厘定及其地质意义 [J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(1): 1-19.

[15] 赵振华. 稀土元素地球化学研究方法 [J]. 地质地球化学, 1982, 10(1): 26-33.

[16] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985: 7-23.

[17] 庞春勇, 陈民扬. 煎茶岭蛇纹岩氢、氧同位素组成特征及形成机制 [J]. 矿产与地质, 1993, 7(1): 65-71.

[18] 黄婉康, 甘先平, 单祖翔, 等. 陕西煎茶岭金矿区的岩石及成矿时代研究 [J]. 地球化学, 1996, 25(2): 150-156.

[19] 齐金忠, 杨贵才, 罗锡明. 甘肃阳山金矿带构造岩浆演化与金矿成矿 [J]. 现代地质, 2006, 20(4): 564-572.

[15] 赵振华. 稀土元素地球化学研究方法 [J]. 地质地球化学,

《现代地质》征稿简则

《现代地质》是中国地质大学(北京)主办的地学领域的综合性学术刊物, 是中文核心期刊和中国科技核心期刊, 其影响因子近 6 年来一直保持在 1.0 以上, 并荣获“中国高校优秀科技期刊”奖。本刊广泛征集地学领域各学科及其边缘学科的学术论文和最新研究成果的稿件, 内容包括: 地层、古生物、构造、岩石、矿物、矿床、地球化学、地球物理、找矿勘探、能源地质、水文地质与工程地质、数学地质、遥感地质、海洋地质、灾害地质以及探矿工程等。欢迎广大作者踊跃投稿。

来稿要求及注意事项:

(1)稿件篇幅(含图表)一般不超过 10 000 字, 要求论点明确、论据充分、数据可靠、文字精练、结构清晰严谨。每篇论文必须有中英文题目、作者姓名、作者单位、邮政编码、摘要、关键词(3~8 个)及正文、参考文献; 在首页地脚处注明论文属何基金项目资助、项目编号, 并提供第一作者简介: 姓名, 性别, 职称, 学术职务, 出生年, 专业, 目前主要从事的研究方向以及 Email 地址。

(2)摘要应尽量写成报道性文摘, 简要阐述研究的目的、方法、结果、结论(为什么做此项研究? 使用什么方法? 得到什么结果? 根据得到的结果作者得出什么结论?), 内容一般为 300 字左右。英文摘要应尽量与中文摘要相对应, 内容也可以更详细。

(3)引言需要言简意赅, 概括出研究背景和目的: 前人在相关领域所做的工作和研究概况, 目前的研究热点、存在的问题以及作者作此项研究的目的与意义; 本文的理论依据、实验基础和研究方法, 简单阐述研究内容、意义与前景等。

(4)量和单位一律使用国家法定计量单位, 须分清大、小写, 正、斜体, 注意上、下脚标。第一次出现的符号、变量需要注明其意义, 指明其使用的单位。

(5)图和表应有自明性, 附有相应的中、英文图表名。图件要求简明清晰, 大图宽度 < 16 cm, 小图宽度 < 8 cm。线条图使用 CorelDraw 软件清绘, 其他格式图件提供分辨率 > 600 dpi 的 TIF 图。涉及国界的图应使用国家正式出版的蓝图作底图; 图中线条和各种符号要求清晰, 纵坐标、横坐标及其单位必须写清楚, 图中要注明图例。如图、表中使用他人的研究成果, 请注明文献来源。

(6)参考文献按文内出现的先后顺序编号(如 [1]、[2]、[3]、[4] …)在文后列出。

作者不能一稿两投。来稿须经有关专家评审通过后才可录用发表; 编辑部有权对稿件作文字和技术性修改, 观点和内容的修改需征得作者的同意; 编辑部将按篇酌付稿酬, 并赠送刊物和单行本(10 份); 编辑部对发表的论文征收一定的版面费; 来稿请注明作者单位地址、邮政编码、联系电话、电子信箱。

来稿邮寄地址: 北京市海淀区学院路 29 号中国地质大学《现代地质》编辑部; 邮编: 100083; 电话: 010-82322463; Email: xddz@cugb.edu.cn; 也可通过《现代地质》“网络投稿系统”投稿, 网址: <http://www.geoscience.net.cn>。