煎茶岭大型金矿床地球化学特征、成矿地球动力学及找矿标志

王瑞廷[1)]，王东生[1)]，李福让[2)]，陈荔湘[2)]，代军治[1)]，王义天[3)]，闫臻[4)]

1）西北有色地质勘查局，西安，710054； 2）西北有色地质勘查局711总队，陕西勉县，724212；
3）中国地质科学院矿产资源研究所，北京，100037； 4）中国地质科学院地质研究所，北京，100037

内容提要：煎茶岭大型金矿床的地球化学特征表明，超基性岩体是金的主要矿源层，成岩物质具幔源特点，金成矿过程与早期构造岩浆热液作用及后期构造热液蚀变作用有关，成矿流体为混合岩浆热液，晚期中酸性岩浆水是引起超基性岩蚀变变质的主要流体成分，金矿化过程中的硫是多期次、多来源。初步认为该矿床为造山型金矿床，成矿可分为两期，即晋宁晚期-加里东期和印支-燕山期，以后者为主，其主成矿期对应于区域上的后碰撞造山过程，陆内挤压造山是其成矿地球动力学背景。超基性岩体的褪化蚀变、F_1^{45} 断裂的长期活动及与其大角度相交的上、下盘次级断裂、裂隙系统与灯影组白云岩是煎茶岭金矿床的主要控矿因素。结合该区找矿实践，认为 F_1^{45} 断裂带、Au-Ag-As-Hg-B 等组合化探异常和蚀变白云岩为其重要的找矿标志。煎茶岭地区仍具有较好的找矿潜力，这对于指导该地区进一步勘查并取得找矿突破具有重要的现实意义。

关键词：煎茶岭；金矿床；地球化学；成矿地球动力学；找矿标志

煎茶岭大型金矿床位于秦岭造山带陕西段勉(县)-略(县)-宁(县)多金属矿集区，是于1971～1985年间发现和勘查成功的大型金矿，具有30多年的找矿和研究历史。自从20世纪70年代发现以来，由于其特有的成矿背景和地质条件，许多学者对煎茶岭金矿床进行了不少研究(庞春勇等，1993a；庞奖励等，1994；黄婉康等，1996；王相等，1996；任小华，2000；王瑞廷等，2000，2003，2007；王瑞廷，2005❸；毛景文等，2005a)，取得了一些成果。九十年代以后随着矿山开采利用的不断深入，对煎茶岭金矿床的成因类型、成矿作用、成矿机制、控矿因素等也获得了新的认识。近年来，通过对煎茶岭金矿床的深入研究和As的地球化学异常查证，在煎茶岭超基性岩体南侧新发现了庙儿沟-水草坪金矿床，已圈定一定规模的金矿体。本文结合该区综合研究和勘查实际，以构造-岩浆-流体成矿系统理论为指导，系统研究分析煎茶岭金矿床(含南带金矿床)的地球化学特征，探讨其成矿地球动力学机制，在此基础上分析控矿因素，总结找矿标志，以进一步为该矿区的成矿预测和扩大找矿提供科学依据。

1 成矿地质背景

区域上煎茶岭大型金矿床位于松潘-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。该区北以略阳-褒河深断裂为界，以勉-略蛇绿构造混杂岩带与秦岭造山带南秦岭褶皱系相接，南以汉江深断裂为界与扬子地块龙门山-大巴山褶皱带相连，区内北部鱼洞子地体和南部碧口地体对接拼贴构成一个三角形构造复合地体，即勉-略-阳三角区(图1)，同时其内也形成一个金铜镍矿化集中区(王相等，1996；王瑞廷等，2000)。鱼洞子地体属扬子地块太古代结晶基底，是区内最古老的岩块，U-Pb同位素年龄为2657±9Ma(秦克令等，1992)，沿勉略构造带南部边界断裂展布，具新太古代花岗-绿岩建造特征，岩性为深变质火山沉积岩。碧口地体为扬子地块西北缘中新元古代增生地体，岩性为浅变质火山沉积岩，细碧石英角斑岩建造。该区伴随着秦岭造山带的形成演化，构造岩浆活动频繁强烈，晋宁期发生大规模超镁铁-镁铁质岩浆侵入、喷出作用，超镁铁-镁铁质侵入体主要沿碧口地体与鱼洞子地体拼接碰撞带及其鱼洞子地体内挤压

注：本文为“十一五”国家科技支撑计划项目(编号 2006BAB01A11)资助的成果。
收稿日期：2009-06-20；改回日期：2009-09-26；责任编辑：郝梓国。
作者简介：王瑞廷，男，1969生。博士，教授级高工。主要从事矿产地质、地球化学综合研究与勘查技术管理工作。通讯地址：710054，西安市碑林区雁塔中路78号；Email：wrtyf@163.com。

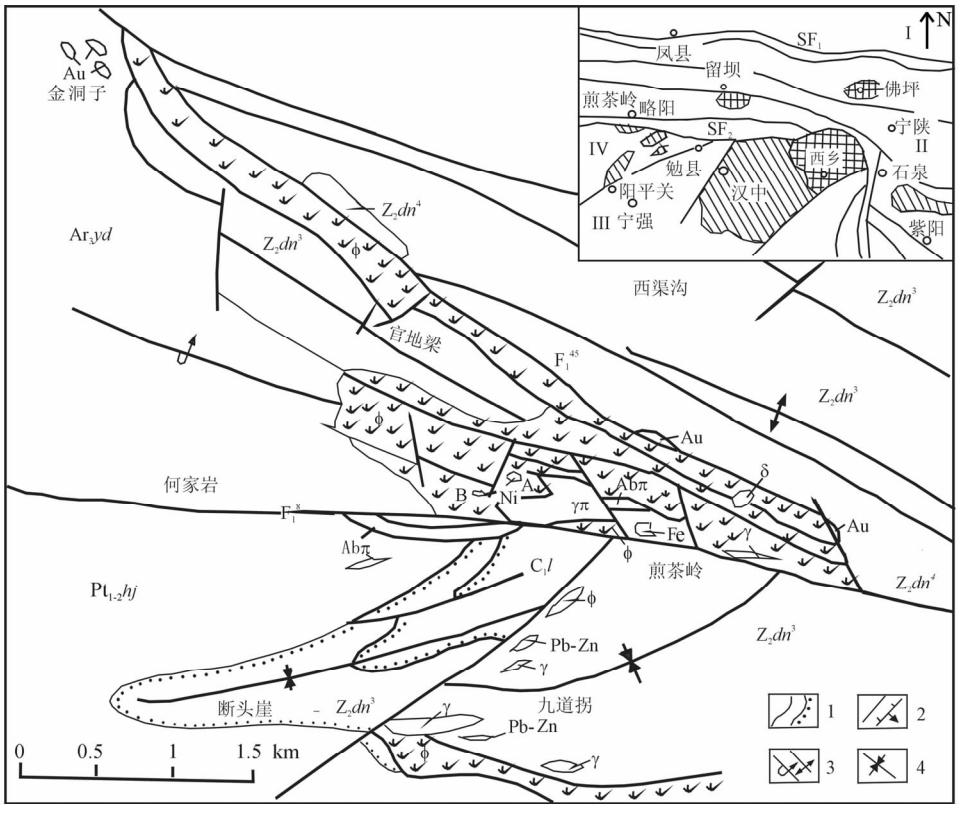


图 1　煎茶岭金镍矿田地质图

Fig. 1　Sketch geological map of the Jianchaling gold and nickel ore field

C_1l—下石炭统略阳组灰岩;Z_2dn^3—灯影组白云岩、灰岩、板岩;Z_2dn^4—灯影组白云岩;$Pt_{1\text{-}2}hj$—何家岩岩群细碧角斑岩;Ar_3yd—鱼洞子群混合岩、片麻岩;φ—超基性岩;γ—花岗岩;$\gamma\pi$—花岗斑岩;δ/Abπ—闪长岩/钠长斑岩;1—整合、不整合地层界线;2—断层、逆断层及编号;3—倾伏倒转背斜,背斜;4—向斜。Ⅰ—华北地块;Ⅱ—秦岭造山带;Ⅲ—扬子地块;Ⅳ—摩天岭微地块;SF_1—商丹缝合带;SF_2—勉略缝合带。Au—金矿;Ni/Fe—镍矿/铁矿;Pb-Zn—铅锌矿。A、B—采样位置。右上角为矿田区域位置图

C_1l—limestone in Lueyang group; Z_2dn^3—dolomite, limestine, slate in Dengying group; Z_2dn^4—dolomite in Dengying group; $Pt_{1\text{-}2}hj$—spilite keratophyre in Hejiayan rock swarm; Ar_3yd—chorismite, gneiss in Yudongzi formation; φ—ultrabasic rocks; γ—granite; $\gamma\pi$—granitophyre; δ/Abπ—diorite/albitophyre; 1—conformable and unconformable stratigraphic boundary; 2—fault, reversed fault and its number; 3—plunging overturned anticline, anticline; 4—syncline. Ⅰ—northern China block; Ⅱ—Qinling orogeny belt; Ⅲ—Yangzi block; Ⅳ—Motianling microblock; SF_1—Shangdan suture zone; SF_2—Miannue suture zone. Au—gold deposit; Ni/Fe—nickel deposit/iron deposit; Pn-Zn—lead and zinc deposit. A、B—sampling location. Insert illustrates regional location of the deposit. There is the regional location map of the ore field in the upper right-hand corner

褶皱断裂构造带分布,在区内形成了北东东和北西西走向两个最大的超基性-基性岩带。其内绝大多数岩体与围岩呈断层接触关系,该期超镁铁-镁铁质侵入岩属于阿尔卑斯型构造侵位超基性岩石组合类型(王相等,1996)。区内地体拼接带存在 NWW 和 NEE 走向的两组构造交汇,除超基性岩外,还分布有印支期中酸性侵入体。该拼接带动热变质作用十分强烈,是一个长期活动的大型构造岩浆活动带和地体拼接挤压韧性剪切带,其中大部分岩石已发生糜棱岩化作用,同时也是煎茶岭大型金矿床的宏观控矿构造。

煎茶岭金矿床主要赋存于超基性岩体北侧与震旦系白云岩的接触断裂带中。该带构造蚀变强烈、富含金,构成了煎茶岭金矿田的北矿带,也是煎茶岭金矿床的主要组成部分(图 2)。F_1^{45} 接触断裂带既是导矿构造,又是容矿构造,含金矿化蚀变带与 F_1^{45} 断裂产状一致,在走向与倾向上均呈舒缓波状,金矿体完全产于蚀变带中,厚度小于或等于蚀变体厚度。金矿体出露于 36～72 线之间,延长 1950m,平均厚度 3.30m,平均品位 7.28×10^{-6}。矿体主要蚀变为黄铁矿化、褐铁矿化、白铁矿化、蛇纹石化、滑石化等;金属矿物主要有黄铁矿、少量白铁矿以及褐铁

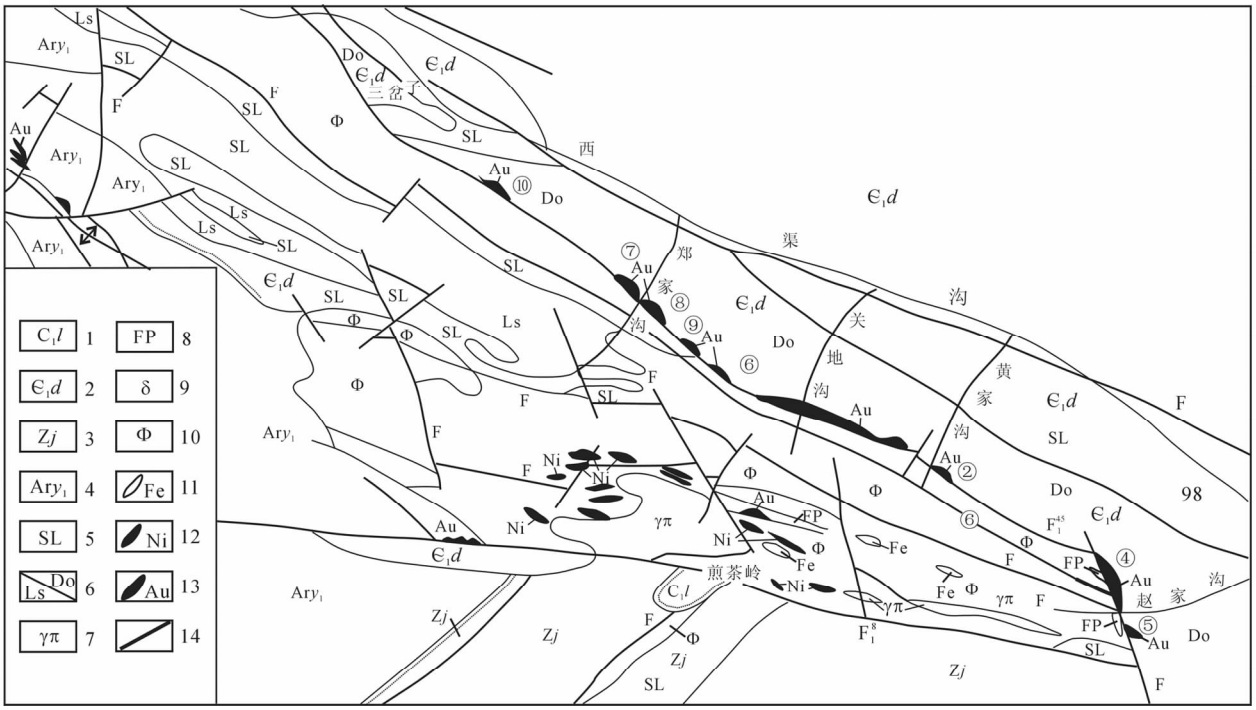


图 2 煎茶岭金矿床地质略图(据王相等,1996 修改)

Fig. 2 Geological sketch map of the Jianchaling gold deposit(modified after Wang X, et al, 1996)

1—下石炭统略阳组灰岩; 2—震旦-寒武系断头崖组白云岩、砾岩、板岩及灰岩;3—震旦系九道拐组碳酸盐岩;4—新太古界鱼洞子群片岩、混合岩、片麻岩、变粒岩; 5—板岩;6—石灰岩/白云岩;7—花岗斑岩;8—钠长斑岩;9—闪长岩;10—超基性岩(蛇纹岩、滑镁岩、菱镁岩);11—铁矿体;12—镍矿体;13—金矿体及编号;14—断层及编号

1—limestone in Lueyang group; 2—dolomite, conglomerate, slate and limestone in Sinian-Cambrian System Duantouya Group; 3—carbonate rock in Jiudaoguai group; 4—schist, migmatite, gneiss in Late Archean Yudongzi Group; 5—slate; 6—limestone or dolomite; 7—granite porphyry; 8—albitophyre; 9—diorite; 10—ultrabasic rocks(serpentinite, listvenite, magnesite); 11—iron ore body; 12—nickel ore body; 13—gold ore body and its number; 14—fault and its number

矿;非金属矿物主要有白云石、石英、蛇纹石、滑石等。通过对 413 件矿石光片观测,金主要为微细粒状,呈粒间金、裂隙金和包裹金三种类型。

F_1^{45} 断裂为区域上略褒断裂(勉略缝合带南界断裂)与 F_1^8 断裂(略阳-方家坝断裂)之间一斜向断裂(图 1),它切割深度较大,向西北控制了鱼洞子花岗-绿岩地体的边界。说明 F_1^{45} 活动时间早,具基底构造特点,同时 F_1^{45} 与 F_1^8 断裂控制三角地区北部岩浆岩的分布,为一大型构造,说明了该区受这一大型构造的控制。F_1^{45} 断裂控制了金矿化蚀变带和金矿体的分布,具有重要的控矿作用。同时 F_1^{45} 断裂局部产状变化及力学性质转换部位制约着矿体形态、规模与品位的变化。

煎茶岭金矿区及周边地层经历多阶段变形变质作用,矿区断裂构造的空间分布与组合受区域上略褒深断裂及褶皱构造的控制,沿基底何家岩背斜的南北两翼边缘形成的从属于略褒深断裂的次级近东西向的 F_1^8 断裂及与 F_1^8 断裂同期发育的次一级断裂 F_1^{45} 断裂为主干断裂,形成一系列更次级的走向断裂,均以压扭型为主,表现多期活动特点,它们在煎茶岭地区构成一个主要的断层交汇区。

2 矿床地球化学特征

煎茶岭金矿床产于超基性岩体的北侧,与超基性岩体关系密切,同时超基性岩体具有较高的金背景值(表 1),并在其中发现有球粒状金产出。从表 1 中还可以明显看出,随着岩体的进一步从纤胶蛇纹岩变质到滑镁岩,Au 含量依次升高,说明了变质作用对 Au 具有明显的活化富集作用,是金成矿的主要作用之一,超基性岩体则是金的主要矿源层,具有一定的控矿作用。

表 2 反映煎茶岭金矿床矿石的 MgO 含量(4.17% ~ 16.12%)低于白云岩(21.47% ~ 30.51%)和蛇纹岩(19.52% ~ 34.48%),而 Mn 含

表 1　煎茶岭超基性岩体、近矿围岩和金矿石微量元素平均含量统计

Table 1　Trace element average content statistics of Jianchaling ultrabasic intrusion, near orebody wall rock, and gold ore

岩性	元素含量					
	Au	Ni	Co	Cr	Cu	As
滑镁岩	9.0	1917	106	934	21	10
菱镁岩	9.0	1759	108	1106	22	17
叶蛇纹岩	4.82	1555	90	909	10	17
纤胶蛇纹岩	4.82	943	72	1427	<5	23
白云岩	5.93	14.16	<5	11.47	7.12	—
蚀变白云岩	51.86	606.4	29.94	614.25	15.13	—
含石英菱镁岩	96.0	1514	4.5	—	2.48	69.6
钠长岩	10.3	42	4.3	—	30.5	7.4
矿化蚀变岩	229	162	15.8	—	—	51.1
金矿石	3492	1419	59.2	—	24.0	437
大陆地壳	2.5	56	24	126	25	1.7

注:Au 含量单位:$\times10^{-9}$,其他:$\times10^{-6}$;据王相等,1996;大陆地壳据 Wedepohl, 1995。

量(431×10^{-6}～998×10^{-6})高于白云岩(203×10^{-6}～463×10^{-6})和蛇纹岩(410×10^{-6}～629×10^{-6})。

由表 3 可知,金矿石的品位变化较大,在(0.3～65)$\times10^{-6}$之间波动,26 件贫矿石样品的平均品位为 0.181×10^{-6},矿体的平均品位为 5.228×10^{-6},矿体附近所采蛇纹岩、白云岩的金含量在(0.3～0.6)$\times10^{-6}$之间变化(王瑞廷,2005❸),表明蛇纹岩与白云岩的接触带矿化强度大,这与矿体主要赋存于该接触断裂带部位相一致。

根据对煎茶岭矿区各类岩、矿石稀土元素的分析测定及计算(表 4、表 5),超基性岩(蛇纹岩、叶蛇纹岩、滑镁岩、菱镁岩)稀土总量较低,富集轻稀土,重稀土分异不明显,稀土分配模式为右倾型,∑REE 变化范围为 0.431×10^{-6}～19.1×10^{-6},$(La/Yb)_N$ 为 3.068～60.818,δEu 为 0.866～8.20,平均为 2.555,除 1 件矿化蛇纹岩外,其余蛇纹岩均为正铕异常(图 3),这可能与蛇纹石化过程中 Eu^{2+} 的优先活化(Sun et al.,1978)有关,另外,蚀变超基性岩出现 Gd、Tb 的异常,可能表明成岩过程中有地壳物质的混染;矿区中酸性岩(花岗斑岩、钠长斑岩)稀土总量较高,明显富集 LREE,以具负铕异常为特征,稀土分配模式亦为右倾型,∑REE 变化范围为 114.28×10^{-6}～226.03×10^{-6},$(La/Yb)_N$ 为10.67～

表 2　煎茶岭金矿区岩、矿石常量元素含量

Table 2　Major element content of rock and ore in the Jianchaling gold field

样号	m1	m2	m3	m5	m6	m7	m18	m19	m20	m21	m22	m23
岩(矿)石性质	金矿石	金矿石	白云岩	金矿石	金矿石	金矿石	白云岩	金矿石	蛇纹岩	白云岩	金矿石	蛇纹岩
Al_2O_3	6.12	4.87	8.10	4.57	2.94	0.54	0.10	0.37	0.65	0.25	1.06	0.45
Na_2O	0.04	0.04	0.03	0.05	0.05	0.07	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.14
CaO	7.78	8.79	0.39	9.29	10.67	13.56	27.17	20.49	25.66	25.67	14.25	0.63
Fe_2O_3	7.15	6.37	7.48	5.49	5.69	4.42	0.46	3.34	4.09	0.52	8.34	5.16
K_2O	0.16	0.36	0.03	0.67	0.22	0.05	0.05	0.10	0.14	0.04	0.23	0.09
MgO	4.17	4.24	30.51	7.93	8.87	11.22	22.19	16.12	19.52	21.47	6.21	34.48
Mn	640	834	203	998	796	631	463	747	629	266	431	410
P	310	91	506	317	36	35	1410	42	45	72	51	46
Ti	2479	1254	3371	900	433	75	72	95	102	130	343	101
V	75	60	95	84	83	57	16	26	7.2	13	51	5.6

注:m1、m2、m3、m5、m6、m7 样品采自煎茶岭金矿床;m18、m19、m20、m21、m22、m23 样品采自煎茶岭南带金矿床;Mn、P、Ti、V 含量单位为$\times10^{-6}$,其它为$\times10^{-2}$,样品由有色金属西北矿产地质测试中心采用 ICP-MS 分析,所用等离子体质谱仪型号为 Finnigan MAT ELEMENT。

表 3　煎茶岭金矿区岩、矿石成矿元素含量(10^{-6})

Table 3　Ore-forming element contents of rock and ore in the Jianchaling gold field(10^{-6})

样号	m1	m2	m3	m5	m6	m7	m18	m19	m20	m21	m22	m23
岩(矿)石性质	金矿石	金矿石	白云岩	金矿石	金矿石	金矿石	白云岩	金矿石	蛇纹岩	白云岩	金矿石	蛇纹岩
Au	24.2	17.0	0.6	50.7	65.0	33.9	0.3	1.4	4.1	0.3	40.3	0.4
Ni	444	471	352	307	294	506	37	397	777	60	400	1198
Co	45	50	40	51	56	42	5.2	38	110	5.2	49	116
Cu	64	52	55	79	88	87	19	59	82	32	45	36
Pb	41	33	42	25	39	52	25	78	64	36	51	219
Zn	154	153	195	308	426	328	37	134	114	76	163	262

注:分析单位及测试方法同上。

42.84，δEu 为 0.73～1.39，平均为 0.91(王瑞廷等，2002)，分配模式与超基性岩相似，反映了中酸性岩与超基性岩具同源性；金矿石稀土总量变化较大，∑REE 变化范围为 0.196×10^{-6}～71.8×10^{-6}，$(La/Yb)_N$为 0.763～14.697，δEu 为 0.778～9.265，平均为2.723，个别样品具负铕异常，多数为正铕异常，分配形式与超基性岩、中酸性岩极其相似，亦为 LREE 略富集的右倾型，反映了对其成矿物质的继承性。矿区白云岩(含矿化/蚀变白云岩)稀土总量波动大，明显富集 LREE，以具负铕异常为特征，稀土分配模式也为右倾型，略微富集轻稀土，∑REE 变化范围为 1.704×10^{-6}～107.289×10^{-6}，$(La/Yb)_N$为5.79～13.598，δEu 为 0.563～3.57，平均为 1.410，其矿化/蚀变白云岩稀土总量在 16.172×10^{-6}～107.289×10^{-6}之间变化，明显高于未矿化/蚀变白云岩，$(La/Yb)_N$为 5.992～13.598，均为负铕异常，δEu 为 0.697～0.965，平均为 0.825，可能与热液活动过程中稀土元素的活动性有关，白云岩分配模式与矿石、超基性岩相似，反映了与成矿的相关性。

铂族元素通常作为重要的贵金属矿产资源进行研究(Naldrett et al.，1980)，但它在示踪超镁铁和镁铁质岩石演化与成因上还具有不可替代的重要应用价值(Naldrett et al.，1976，1981；Garuti et al.，

表 4 煎茶岭金矿床岩、矿石稀土元素含量($\times10^{-6}$)

Table 4 REE contents of rock and ore in the Jianchaling gold deposit($\times10^{-6}$)

样号	JPD-1	JCL-01	JCL-02	JCL-03	JCL-04	ZK-1	ZK-2	ZK-3	ZK-4
岩(矿)石性质	原生金矿石	白云岩	蛇纹岩	氧化金矿石	原生金矿石	白云岩	氧化金矿石	矿化蛇纹岩	蛇纹岩
La	0.466	0.633	0.129	1.384	0.086	0.409	0.426	3.989	0.091
Ce	0.711	0.629	0.228	1.525	0.056	0.487	0.443	3.945	0.178
Pr	0.163	0.158	0.026	0.224	0.005	0.085	0.055	0.465	0.020
Nd	0.826	0.784	0.095	0.867	0.019	0.363	0.188	1.471	0.079
Sm	0.274	0.184	0.015	0.145	0.004	0.076	0.031	0.141	0.012
Eu	0.079	0.037	0.009	0.074	0.012	0.019	0.054	0.042	0.005
Gd	0.359	0.224	0.015	0.157	0.004	0.079	0.035	0.159	0.014
Tb	0.075	0.033	0.002	0.025	0.000	0.012	0.005	0.017	0.002
Dy	0.518	0.190	0.013	0.150	0.002	0.074	0.035	0.092	0.010
Ho	0.120	0.045	0.002	0.037	0.001	0.016	0.009	0.019	0.003
Er	0.321	0.105	0.007	0.093	0.002	0.039	0.025	0.049	0.006
Tm	0.059	0.014	0.001	0.015	0.000	0.006	0.004	0.006	0.001
Yb	0.354	0.060	0.008	0.086	0.004	0.034	0.026	0.038	0.008
Lu	0.052	0.011	0.001	0.013	0.001	0.005	0.004	0.005	0.002
样号	Y-Mg	J50	J187	P406	P404	J65	J190	P404B	J17
岩(矿)石性质	菱镁岩	滑镁岩	矿化白云岩	金矿石	金矿石	蚀变白云岩	金矿石	矿化白云岩	叶蛇纹岩
La	0.376	0.554	3.99	2.11	0.402	12.41	0.761	24.9	1.314
Ce	0.801	1.112	6.36	4.36	0.388	25.02	1.524	41.9	2.047
Pr	0.083	0.147	0.81	0.46	0.075	3.56	0.223	5.45	0.219
Nd	0.318	0.423	2.91	1.78	0.302	15	0.664	22.3	0.485
Sm	0.094	0.105	0.54	0.331	0.061	3.23	0.133	3.58	0.163
Eu	0.038	0.048	0.11	0.134	0.02	1.06	0.032	0.9	0.073
Gd	0.037	0.072	0.44	0.373	0.04	3.56	0.1	2.88	0.131
Tb	0.006	0.01	0.06	0.052	0.006	0.53	0.016	0.363	0.02
Dy	0.034	0.051	0.42	0.36	0.035	2.88	0.073	1.98	0.108
Ho	0.01	0.013	0.09	0.095	0.011	0.58	0.016	0.488	0.025
Er	0.03	0.033	0.212	0.206	0.032	1.38	0.037	1.06	0.104
Tm	0.006	0.005	0.03	0.026	0.006	0.21	0.004	0.128	0.021
Yb	0.071	0.028	0.17	0.236	0.043	1.2	0.03	1.2	0.208
Lu	0.047	0.005	0.03	0.053	0.019	0.17	0.005	0.16	0.036

注：Y-Mg、P406、P404、P404B 据马建秦，1998❶；J50、J187、J65、J190、J17 据陈民扬等，1994；其他样品由中国科学院地球化学研究所资源环境测试分析中心及西北大学教育部大陆动力学重点开放研究实验室采用 ICP-MS 分析完成。所用等离子体质谱仪型号分别为 ELAN6100DRC 及 Finnigan MAT ELEMENT。

表 5　煎茶岭金矿床岩、矿石稀土元素特征参数

Table 5　REE feature parameter of rock and ore in the Jianchaling gold deposit

样号	JPD-1	JCL-01	JCL-02	JCL-03	JCL-04	ZK-1	ZK-2	ZK-3	ZK-4
岩(矿)石性质	原生金矿石	白云岩	蛇纹岩	氧化金矿石	原生金矿石	白云岩	氧化金矿石	矿化蛇纹岩	蛇纹岩
ΣREE	4.377	3.107	0.551	4.795	0.196	1.704	1.34	10.438	0.431
LREE	2.44	2.388	0.493	4.145	0.17	1.42	1.143	10.011	0.38
HREE	1.858	0.682	0.049	0.576	0.014	0.265	0.143	0.385	0.046
LREE/HREE	1.356	3.556	10.245	7.325	13	5.430	8.371	26.112	8.340
La/Yb	1.316	10.55	16.125	16.093	21.5	12.029	16.385	104.974	11.375
Ce/Yb	2.008	10.483	28.5	17.733	14	14.324	17.038	103.816	22.25
La/Sm	1.701	3.440	8.6	9.545	21.5	5.382	13.742	28.291	7.583
Eu/Sm	0.288	0.201	0.6	0.510	3	0.25	1.742	0.298	0.417
$(La/Yb)_N$	0.763	6.112	9.342	9.324	12.456	6.969	9.493	60.818	6.590
δEu	0.778	0.563	1.853	1.515	9.265	0.757	5.063	0.866	1.191
δCe	0.604	0.465	0.921	0.641	0.632	0.611	0.677	0.678	0.976
样号	Y-Mg	J50	J187	P406	P404	J65	J190	P404B	J17
岩(矿)石性质	菱镁岩	滑镁岩	矿化白云岩	金矿石	金矿石	蚀变白云岩	金矿石	矿化白云岩	叶蛇纹岩
ΣREE	1.951	2.606	16.172	10.576	1.44	70.79	3.618	107.289	4.954
LREE	1.71	2.389	14.72	9.175	1.248	60.28	3.337	99.03	4.301
HREE	0.241	0.217	1.452	1.401	0.192	6.95	0.281	8.259	0.653
LREE/HREE	7.095	11.009	10.138	6.549	6.5	8.673	11.875	11.991	6.586
La/Yb	5.296	19.786	23.471	8.941	9.349	10.342	25.367	20.75	6.317
Ce/Yb	11.282	39.714	37.412	18.475	9.023	20.85	50.8	34.917	9.841
La/Sm	4	5.276	7.389	6.375	6.590	3.842	5.722	6.955	8.061
Eu/Sm	0.404	0.457	0.204	0.405	0.328	0.328	0.241	0.251	0.448
$(La/Yb)_N$	3.068	11.463	13.598	5.180	5.416	5.992	14.697	12.022	3.660
δEu	1.990	1.705	0.697	1.178	1.250	0.965	0.857	0.866	1.543
δCe	1.061	0.912	0.828	1.036	0.523	0.881	0.866	0.842	0.893

表 6　煎茶岭金矿床(北矿带)和南矿带岩、矿石铂族元素与金含量($\times10^{-9}$)及其特征参数

Table 6　PGE and Au contents($\times10^{-9}$)and its feature parameter of rock and ore in Jianchaling north and south gold belt

采样位置	样号	岩(矿)石性质	Os	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd	Au	ΣPGE	Pt/Pd	Pd/Ir
北矿带	J-8	蛇纹岩	1.0	1.2	3.0	0.3	<1	1.0	4.2	<6.5	—	0.83
	JN-2	矿化滑镁岩	2.4	2.5	4.3	4.0	6.3	2.5	160	22	2.52	1.00
	J-42	矿化滑镁岩	2.2	2.0	6.0	6.0	2.5	1.0	120	19.7	2.50	0.50
	JN-1	矿化透闪岩	4.4	5.0	7.0	6.0	2.7	6.1	120	31.2	0.44	1.22
	J-41	金矿石	6.0	6.6	14.7	7.0	3.1	1.1	14100	38.5	2.82	0.17
	Pt1	金矿石	2.8	4.6	7.1	0.8	0.8	2.1	0.31	18.2	0.38	0.46
	Pt2	金矿石	5.5	6.9	11	1.5	3.2	1.5	8.9	29.6	2.13	0.22
	Pt3	金矿石	2.8	5.4	4.6	0.9	2.6	0.8	37.8	17.1	3.25	0.15
	Pt4	叶蛇纹岩	3.6	4.1	8.9	1.1	2.4	1.8	0.03	21.9	1.33	0.44
	Pt5	金矿石	3.3	5.3	7.3	1.1	3.6	2.4	6.9	23	1.50	0.45
	Pt6	金矿石	2.7	7.2	11	1.1	2.9	0.5	3.3	25.4	5.80	0.07
	JCL03-1	金矿石					1.67	0.67	3500	>2.34	2.49	—
南矿带	Pt7	滑镁岩	4.0	5.7	11	1.6	3.7	1.4	0.01	27.4	2.64	0.25
	Pt8	金矿石	2.2	4.6	6.7	0.9	3.5	1.1	15.6	19	3.18	0.24
	Pt9	金矿石	0.6	0.2	0.7	0.2	1.1	1.6	1.6	4.4	0.69	8.00
	Pt10	矿体内石英脉	0.2	0.1	0.3	0.1	0.4	0.6	4.9	1.7	0.67	6.00
	Pt11	碎裂白云岩	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	1.7	0.06	2.4	0.18	17.00
	Pt12	滑镁岩	1.1	1.3	2.3	0.3	1.5	1.2	0.04	7.7	1.25	0.92
	Pt13	褐色蚀变白云岩	1.0	1.6	3.1	0.4	2.1	1.4	0.16	9.6	1.50	0.88
	Pt14	碎裂白云岩	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.06	1.1	0.50	4.00
	Pt15	金矿石	2.4	4.1	7.4	1.1	3.2	1.8	3.8	20	1.78	0.44
	Pt16	金矿石	3.2	3.7	6.6	0.9	3.0	1.8	4.2	19.2	1.67	0.49
地壳丰度(Wedepohl,1995)			0.05	0.05	0.1	0.06	0.4	0.4	2.5	3.56	1.00	8.00

注:J-及 JN-据冉红彦等,1996;Pt1～Pt16、JCL03-1 由有色金属西北地质矿产测试中心采用 ICP-MS 分析测试,仪器型号为 ELAN6100DRC;其它样品由国家地质实验中心采用 ICP-MS 分析测试。ΣPGE 为铂族元素的总含量。

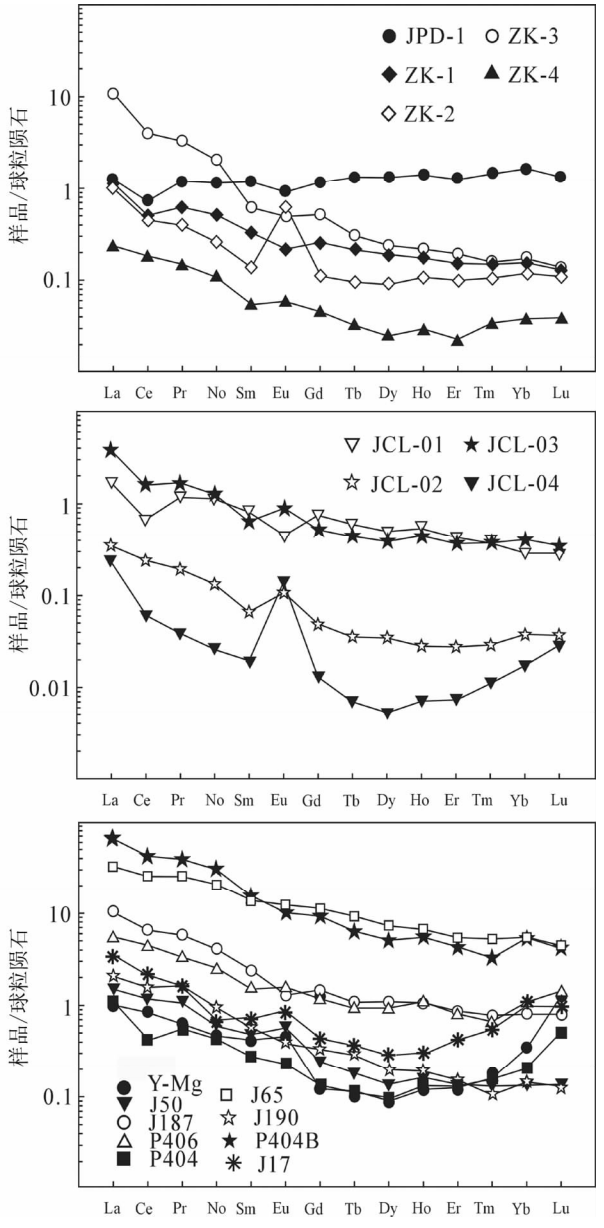


图 3 煎茶岭金矿床岩、矿石 REE 球粒陨石标准化配分模式(标准化值据 Sun et al.,1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE distribution patterns for rock and ore in the Jianchaling gold deposit

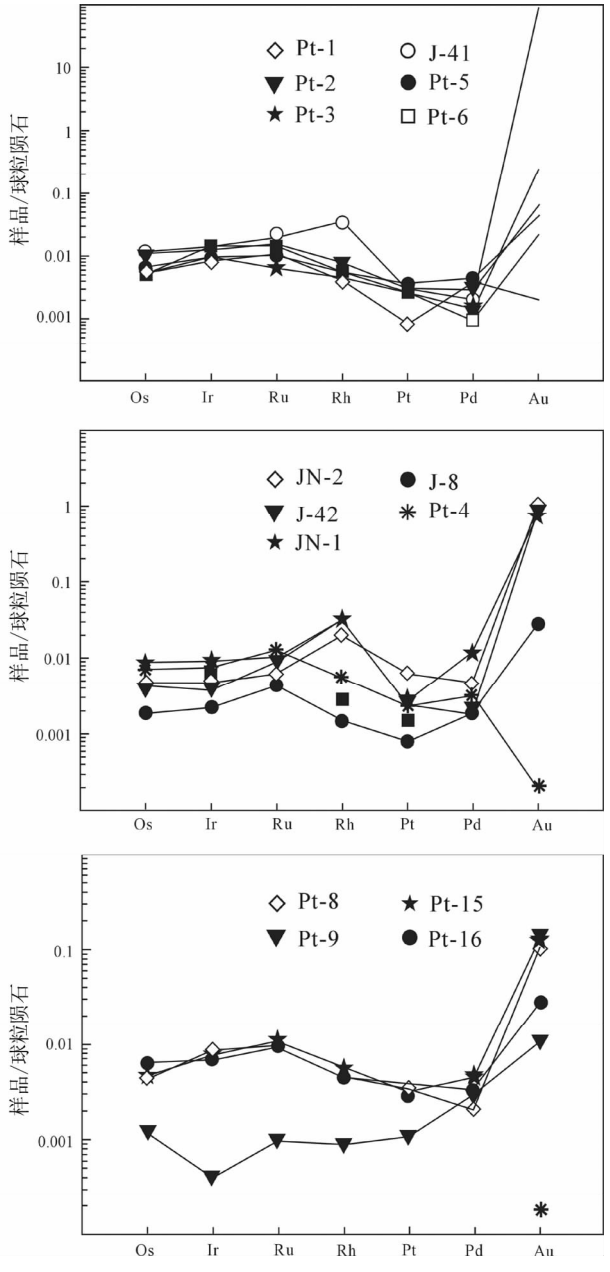


图 4 煎茶岭金矿床及南带岩、矿石 PGE 及 Au 球粒陨石标准化配分模式(标准化值据 Sun et al.,1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized PGE and Au distribution patterns for rock and ore in the Jianchaling gold deposit

1997;储雪蕾等,2001)。对煎茶岭金矿床的铂族元素已开展过一些研究工作(冉红彦等,1996;王瑞廷,2005❸)。近年来对热液活动中 PGE 的富集作用研究越来越多(张生,1995;许成等,2003),煎茶岭金矿床与超基性岩有关,构造岩浆热液成矿作用发育,对其铂族元素的研究有助于进一步揭示其成矿机制。采自煎茶岭金矿床及南带的 18 件不同类型岩、矿石样品铂族元素及金的测试数据及前人对于该区蚀变超基性岩和金矿石 PGE 及 Au 的分析结果列于表 6。这些不同矿石与岩石的球粒陨石标准化 PGE 及金分布模式如图 4。由图 4 可知,金矿石的铂族元素配分曲线为向右升高的左倾型,钌、铑呈高峰,具有铂(钯)的低谷,蚀变超基性岩的铂族元素配分模式和矿石相似,这指示该超基性岩体提供了 Au 成矿的物质来源,其本身为钯组铂族元素矿化,大多数岩、矿石 Pd/Ir<1,Pt、Pd 含量低,与其镁质超基性岩体的性质是一致的。其矿石铂族元素总量 ΣPGE 在 17.1×10^{-9}~38.5×10^{-9}之间变化,平均为 25.3×10^{-9};4 件超基性岩的铂族元素总量 ΣPGE 在<

$6.5\times10^{-9}\sim22.0\times10^{-9}$之间变化,平均约为 17.53×10^{-9},小于矿石的平均值。南带(庙儿沟-水草坪)岩、矿石的铂族元素配分曲线与北带(煎茶岭)略有不同,其金矿石虽也为向右升高的左倾型,但仅显示钌的高峰,具有钯的低谷,铂族元素总量 ΣPGE 在 $4.4\times10^{-9}\sim20\times10^{-9}$之间变化,平均为 15.65×10^{-9};2 件滑镁岩的铂族元素配分曲线与矿石相似,只是金的含量很低,相对表现为钯的峰,ΣPGE 为 7.7×10^{-9}和 27.4×10^{-9};3 件白云岩的铂族元素配分曲线与滑镁岩相似,但出现铱的低谷,铂族元素总量更低,ΣPGE 变化范围为 $1.1\times10^{-9}\sim9.6\times10^{-9}$;矿体内石英脉的铂族元素配分曲线与矿石相似,ΣPGE 仅为 1.7×10^{-9},这些说明其成矿与蚀变超基性岩及白云岩均有关。煎茶岭岩体南北侧岩、矿石铂族元素的配分特征大体相似,但 Ru、Rh、Pd 的变化较明显,由于造成 PGE 分异的可能机制有蚀变作用、部分熔融和结晶分异(Barnes et al.,1985),而蚀变作用对 Pd 组 PGE 的分异影响大,因此这也说明金成矿过程与后期构造热液蚀变作用关系密切。

煎茶岭金矿床矿石中黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 变化范围较大,在 6.39‰～29.1‰(11 件)(陈民扬等,1994;王瑞廷,2005)之间波动,平均 16.72‰,1 件金矿石的全矿 $\delta^{34}S$ 值为 20.94‰。超基性岩中黄铁矿 $\delta^{34}S$ 为 7.89‰～15.3‰,白云岩中黄铁矿 $\delta^{34}S$ 为 12.5‰,钠长斑岩中黄铁矿 $\delta^{34}S$ 为 9.0‰～17.5‰,说明了金矿化过程中的硫是多期次、多源成因的。

金矿石中石英的 $\delta^{18}O$ 值为+9.98‰～10.03‰(陈民扬等,1994;庞春勇等,1993b),δD 为－88.4‰～－92.4‰。根据矿物爆裂温度,利用矿物-水关系式计算出金矿成矿热液水的 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 为＋2.29‰～3.72‰,低于岩浆水的下限,表明成矿热液是岩浆热液与地下水的混合热液。超基性岩(从蛇纹岩到滑镁岩、菱镁岩)随着变质程度加深,$\delta^{18}O$ 值由＋6.4‰～9.95‰增大到＋10.2‰～＋13.45‰,与中酸性岩脉相近,反映了晚期中酸性岩浆水是引起超基性岩蚀变变质的主要流体成分。

矿区白云岩的 $\delta^{13}C$ 为 2.3‰,显示了海相碳酸盐的特征。超基性岩的 $\delta^{13}C$ 为－3.0‰～－3.8‰,具有原生碳的特点。金矿石的 $\delta^{13}C$ 为－0.4‰～－1.6‰,变化范围小,计算出成矿流体 $\delta^{13}C_{H_2O}$ 值为－8.42‰,$\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为 5.67‰～13.52‰[1],落于混合岩浆热液碳($\delta^{13}C$ 为－4.0‰～－9.5‰)范围内,也说明金的成矿流体为混合岩浆热液。

矿区内矿石及其上、下盘围岩中石英的 $\delta^{30}Si$ 变化范围小,为－0.1‰～＋0.2‰[2],平均为 0.05‰,与沉积层控型金矿床($\delta^{30}Si=-0.5‰\sim-0.3‰$)、火山岩型金矿床($\delta^{30}Si=-3.1‰\sim-0.4‰$)有较明显的差别,和岩浆成因花岗岩($\delta^{30}Si=-0.20‰\sim+0.20‰$)比较接近。目前研究认为,$SiO_2$ 从热液中沉淀时存在较大的 Si 同位素分馏,即在低温下溶解的硅以较慢速度沉淀时,沉淀硅比热液条件下形成的硅更富集^{28}Si,热液条件下形成的硅要比沉积条件下形成的更富集^{30}Si,而本区 $\delta^{30}Si$ 更接近于花岗岩,说明后期成矿热液来自与花岗斑岩有关的深部地壳。

煎茶岭矿区岩、矿石和矿物的铅同位素组成(陈民扬等,1994;马建秦,1998)在 $^{207}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$图解(图 5)中呈线状分布,主要分布在造山带铅演化线及其附近,反映了铅的多源性及成岩物质主要来源于上地幔。

花岗斑岩的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值为 0.709768～0.749689,稍高于地幔的锶同位素比值,投点接近于玄武岩区演化线,表明成岩物质来源于地幔,侵入过程中混有地壳物质组分。超基性岩体中纤胶蛇纹岩的 Nd^{143}/Nd^{144} 值在 0.511126～0.512326 之间变化,由 Sm-Nd 等时线计算获得的初始钕同位素比值为 0.510233,纤胶蛇纹岩的初始钕同位素比值为 0.510182～0.511095,Sm-Nd 同位素等时线年龄为 927.4±49Ma。对应的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值较大,为 9.1～32.6,Sm/Nd 较大,为 0.2355～0.5831,亦反映该岩体成岩物质来源于亏损的上地幔(陈民扬等,1994;王瑞廷,2002)。

金矿石热液矿物白云石流体包裹体的均一温度为 190～236℃[3],热液石英和白云石的爆裂温度为 230～269℃、319～341℃两组[1],蚀变白云岩型金矿石有标型矿物白铁矿存在,它转变为黄铁矿的温度为 350℃,反映了金成矿的多期性,成矿热液属中低温,成矿起始温度为 350℃,主要成矿温度在 200～320℃之间,晚期叠加了低温矿化作用。流体包裹体的盐度测定显示了成矿流体属低盐度卤水[1],有关流体包裹体盐度—均一温度－CO_2 含量关系的计算求得成矿压力相当于 1.5～3km 的静岩压力(马建秦,1998[1])。

对金矿石中石英、白云石、铁白云石、含铁方解石的包裹体成分测定显示,气体成分主要有 CO_2、H_2O、CH_4 和 H_2,液相成分阳离子主要有 Ca^{2+}、Mg^{2+}和 K^+、Na^+,阴离子 F^-、Cl^-、SO_4^{2-}。$K^+>$

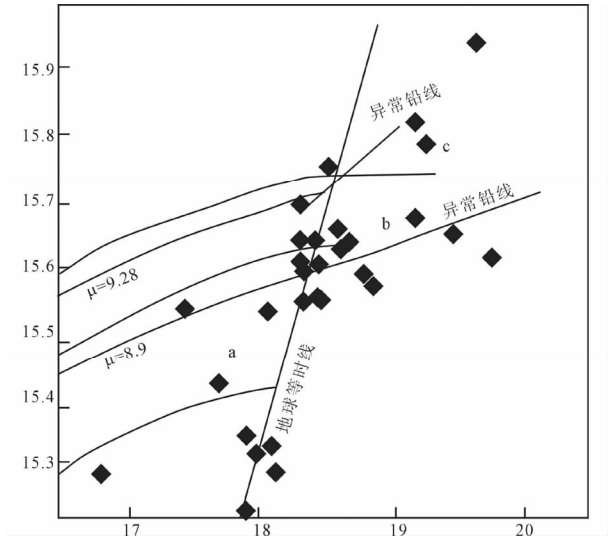


图 5 煎茶岭金矿区铅同位素构造演化图解

Fig. 5 Pb isotope tectonic evolution diagram for Jianchaling gold field

a—上地幔演化线;b—造山带演化线;c—上部地壳演化线

a—the upper mantle evolution line; b—orogenic belt evolution line; c—the upper crust evolution line

Na^+,$F^- > Cl^-$,$F^- + Cl^- > SO_4^{2-}$,盐度为 0.90%～1.35%,流体富钙碱质、碱质和卤素,与造山带中后生热液金矿床的深源成矿流体类似。

根据包裹体成分计算的成矿溶液 pH 值为8.36～8.60,均呈弱碱性,金矿石中普遍存在小颗粒石英,而石英沉淀的 pH 值为 4.8～7.4,且矿石中有白铁矿(酸性环境形成)存在,推测成矿热液中矿质是在碱性条件下搬运,在中性或弱酸性条件下沉淀,成矿晚期热液又变为碱性条件。成矿热液的 Eh 值为－0.95～－1.19,说明为还原条件下成矿,与矿床中所见的金与黄铁矿、砷硫化物共生现象相吻合[1]。

以往对于煎茶岭超基性岩采用不同测年方法和不同样品获得 2 组成岩等时线年龄数据:①采自同一岩相的纤胶蛇纹岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 927±49Ma(庞春勇等,1993a);②通过煎茶岭镍矿床蛇纹岩型镍矿石的 Re-Os 同位素年代学研究获得等时线年龄为 878±27Ma(王瑞廷等,2003)。二者基本接近,可以认为该年龄比较准确地界定了区内新元古代该期超镁铁质岩浆活动的时限。黄婉康等(1996)获得石英菱镁岩中铬水云母的 K-Ar 年龄为 144.7Ma,它代表岩体形成后与秦岭-扬子碰撞带后期张裂活动有关的金矿化年龄。王平安等(1998)认为煎茶岭金矿床成矿时代为加里东晚期,陈毓川等(2001)则认为该矿床成矿时代为燕山期。据同位素年龄测试并结合矿区地质构造综合分析认为,煎茶岭金矿床的成矿远晚于超基性岩体的侵位,但与其关系密切,可分为两个成矿期,即晋宁晚期-加里东期和印支-燕山期,以后者为主,成矿时代应在 240～140 Ma 之间,其金的成矿作用具有长期性、多期性、继承性和节律性。

煎茶岭金矿床属于南秦岭地区与地壳拉张幔源超基性岩浆侵入活动有关的 Ni、Au、Fe、Cu、Co 矿床成矿系列(王平安等,1998),成因类型前人研究较多(黄婉康等,1996;王相等,1996;任小华,2000;王瑞廷等,2000;张复新等,2001,2004),目前认为它是与超基性岩有关的构造破碎蚀变岩型金矿床。同时,依据 Groves et al. (1998) 和 Goldfarb et al. (1998)系统提出的强调造山过程、剪切带控矿和变质流体成矿三个要素的造山型金矿床概念及部分同位素特征,初步认为也可划入造山型金矿床,但在其成岩成矿精确定年等方面仍需进一步研究。

3 成矿地球动力学分析

煎茶岭地区岩浆活动频繁,为一典型的同位多期岩浆活动区。煎茶岭金矿床就位于勉-略-宁矿集区的西北缘,南距勉-略缝合带仅 3～4km,区域上强烈的构造岩浆活动为该区成矿提供了良好的条件。

晋宁期(927Ma)煎茶岭超基性岩体侵位于地壳浅部,在与深断裂平行或斜交的次级断裂之中形成后,历经区内加里东、华力西期等中晚期酸性岩浆活动(～400Ma),所引起的岩浆期后变质及带来的大量深源物质发生了物质、能量的广泛交换,产生金的初始矿化,为矿床形成奠定了重要基础。印支早期至三叠纪末,为秦岭造山带的陆-陆碰撞造山阶段,在南北向强烈挤压构造体制作用下,一方面导致地层褶皱变形、逆冲叠覆,另一方面发育脆-韧性剪切带,同时伴生强烈的岩浆热液作用(Mao et al., 2002;毛景文等,2005b),区内成矿物质得到进一步富集,再次形成了一些金矿(化)体。印支中晚期由于古秦岭洋盆消亡,勉略洋盆俯冲闭合,华北板块和扬子板块持续碰撞挤压,导致北侧勉略构造带剧烈活动,煎茶岭岩体在强烈的构造岩浆活动及富 CO_2 流体作用下彻底蚀变,并受后期浅成酸性岩浆侵入及变质变形作用影响,加之区域上东西方向大规模的走滑,又进一步促使含矿带内早期脆-韧性剪切带发生走滑脆-韧性剪切,使得金进一步活化搬运、迁移改造、富集成矿,伴随着成矿流体的运移,在断裂构造带(F_1^{45})的有利扩容空间富集成矿体。总之,区

内岩浆活动对金的活化迁移和初始富集起了重要作用,为燕山期伸展体制下以剪切走滑为主的构造环境中成矿打下了基础。燕山期秦岭造山带开始进入板内造山改造阶段,华北板块向南发生陆内俯冲,秦岭造山带进一步收缩挤压,区域上形成一系列紧闭倒转褶皱、叠瓦式逆冲推覆构造带。陆内造山使得陆壳伸展,区内以透入性剪切走滑作用为主,走滑-伸展作用导致强烈的岩浆活动,超基性岩体与围岩接触蚀变带处的构造再次活动,含矿酸性热液在构造破碎扩容带的相对氧化、碱性环境中,对赋存其中的金矿(化)体发生构造叠加热液改造作用,使矿体变形变位,富集增生,形成现今达大型规模的煎茶岭金矿床。可以说,煎茶岭金矿床的主成矿期对应于区域上的后碰撞造山过程,陆内挤压造山是其成矿地球动力学背景。

4　控矿因素及找矿标志

煎茶岭大型金矿床的发现经历了长期而复杂的认识过程。1971～1985 年在寻找镍、铁矿时初步查明超基性岩及镍、金矿化体含金性,矿区外围发现 3 处金矿点;1985～1986 年据国外多次发现与超基性岩有关的找金经验,在成矿区开展找金于煎茶岭超基性岩体南、北接触带上各发现一处金品位 2.4×10^{-6} 的样品,在区内进行 1∶5 万分散流扫面时煎茶岭地区发现 4 个大异常,覆盖了超基性岩体大部分面积;1987 年在煎茶岭超基性岩体北接触带经探槽系统揭露,发现 5 个金矿体(含金 1.02×10^{-6}～36.55×10^{-6});1988 年开始施工钻探、坑探探索深部金矿化,同时进行 25km^2 1∶1 万次生晕正规网扫面,发现了 3 个金矿化异常带和 1 号金矿体;1991～1993 年 1 号矿体经普查、详查及勘探在 950～800m 高程间投入工程,重点解剖含金蚀变带,经系统钻、坑探工程控制,证实矿体具有分段富集特征,并查明矿体内的无矿天窗,从地表 1280m 至最深控制到的 300～400m,共探明金工业储量 21.6 t。1998 年矿山建成投产。

综合分析、研究煎茶岭金矿床的成矿作用和勘查过程,认为其控矿因素如下:

(1) 超基性岩的褪化蚀变为金矿形成奠定了物质基础。煎茶岭超基性岩体的分布严格受构造控制,是超壳断裂切割导致地幔物质上涌的产物。新元古代煎茶岭超基性岩侵位,经强烈变质后形成现在长 5～7km,宽 0.3～1.2km,面积约 5km^2 的含金岩体。超基性岩体已强烈褪化蚀变,由无水硅酸盐铁镁矿物蚀变为含水硅酸盐铁镁矿物,进而碳酸岩化形成菱镁矿与石英组合。这种蚀变分解过程对含矿岩体中的金等成矿物质的解离具重要意义。当岩体遭受强烈变质后,其中的金向岩体边部迁移富集,岩体具备提供金的能力。矿区超基性岩体蚀变带随变质作用的加强,金的含量随之递增。煎茶岭金矿中金与黄铁矿、石英密切共生,超基性岩体 95% 以上发生滑石化、石英菱镁岩化现象。说明岩体变质逐渐增加时,体系中富 CO_2 的流体参与蛇蚊岩变质作用,随体系氧逸度增高,金随硫化物不稳定而发生活化迁移。金矿体和含金蚀变体与超基性岩石的各种褪化蚀变岩主要成矿元素和特征元素呈同步增长,而且随蚀变与矿化作用的加强,各成矿元素的含量具有大致的正消长关系,说明煎茶岭超基性岩的褪化蚀变作用促使了早期金的活化、富集。

(2)F_1^{45} 断裂的长期活动控制了金的富集就位。F_1^{45} 断裂是煎茶岭金矿床的控矿构造,它沿何家岩背斜北翼鱼洞子组边缘发育,属于区域上的鱼洞子-西渠沟断裂,总长 20km,其东端 4.4km 为金矿区控矿断裂,断裂总体走向 290°～110°,倾向北倾,倾角 35°～85°。西端挤压破碎带宽十几米到 50 余米,断裂中有几十厘米至 5cm 厚的糜棱岩和断层泥。东段沿断裂侵入有长达 7～8km 的煎茶岭北西向超基性岩体,形成几米到一百余米的挤压破碎带,断裂总体走向 130°～310°,倾向北西,倾斜方向波状变化幅度比走向变化要大。赋存矿体的 F_1^{45} 断裂及次级上、下盘的分支断裂、裂隙组成的北西向断裂带,具有明显的动力变质作用,兼有脆性和韧性变形特征并形成了一套构造角砾岩、糜棱岩、石香肠和片理化,表明断裂经历了长期构造演化,产生了动力热液,并萃取了岩体和围岩中的金元素(任小华,2000;王瑞廷等,2007),后期动热改造对成矿更重要(李人澍,1996)。因此,F_1^{45} 断裂及次级上、下盘的分支断裂、裂隙组成的北西向断裂带是煎茶岭金矿的主要导矿、赋矿构造,是有利的成矿部位。F_1^{45} 断裂带的空间产状呈波状变化而使各部位的力学性质不同,据矿山工程揭示 800～900m,900～1000m 标高间部分地段断层呈 36°向北缓倾,金矿体厚富,这说明矿化作用和 Au 元素富集受构造变形的宏、微观结构面等众多因素控制。F_1^{45} 控矿断裂带走向与倾向均呈舒缓波状,具压扭性质、高度逆冲剪切,挤压破碎带十几至五十余米,形成一些缓倾斜的局部开放地段,有利于形成富矿体。断裂组具有规模较大缓倾斜、近水平方向延展的相对张性开放区段,形成富

厚工业矿体。断裂扩容带是成矿流体淀积的有利场所,断裂结构面特征是影响金矿定位、产状变化以及贫富矿块形成部位的主要地质因素。

据地表和井下揭露分析 F_1^{45} 断裂活动期次大体为四期,第一期活动——成矿前期:与 F_1^8 断裂同时形成于何家岩背斜的晚期,沿背斜两翼鱼洞子组地层边缘展布,F_1^{45} 不如 F_1^8 强烈,断裂面呈舒缓波状;第二期活动——成矿母岩形成期:为高角度逆冲的压扭型活动,本期活动强烈,北部分枝超基性岩侵入,在岩体边部有许多白云岩碎块形成残留俘虏体,沿倾斜方向波状变化幅度大;第三期活动——成矿期:具压扭性活动特征,表现为沿断裂超基性岩旁侧及断裂带中产生一系列小规模次级平行断裂,侵入了后期花岗斑岩株、钠长斑岩脉等,并形成含金蚀变带,对断裂破碎带起了固结闭合作用,蚀变体中面理构造发育;第四期活动——成矿期后:主要表现为规模较小的以压扭性为主兼压性的逆断层(佘岳峰等,2008),造成矿石普遍氧化,并切割破坏矿体部分矿段。

(3) F_1^{45} 和 F_1^8 断裂及白云岩地层、超基性岩体构成的成矿系统决定了构造岩浆流体的输送、沉淀和成矿。煎茶岭金矿床的成矿作用受构造环境、岩浆体系、微观温压条件、成矿地球化学场、矿物物理化学性质、岩石的物理特征、变形时介质的物化条件等综合因素的影响,导致在同一成矿带不同区段形成矿体贫富、薄厚的变化。F_1^{45} 断裂产状在空间沿走向与倾斜方向呈舒缓波状变化及引起的局部力学性质差异控制了金矿的种种富集变化,即 F_1^{45} 断裂在一个近缓倾斜的局部开放地段形成厚富矿体。

简言之,煎茶岭金矿床的成矿作用经历了早期初始富集成矿和后期热液改造就位两个重要的成矿过程,表现出较明显的"二元控矿"规律。

本区域长期隆起,多次构造活动造成刚性的矿石及上盘白云岩(刚性)易碎裂、节理发育具有很大的渗透性,起着下渗和地下水渠道的作用;而下盘超基性岩相对隔水,在滑镁岩的屏蔽下,聚集岩浆来源的热液和蚀变水,形成下盘热水体系,两个体系在循环、交换过程中形成含矿流体。F_1^{45} 断裂及次级上下盘发育的分枝断裂、裂隙与白云岩组合成适当的开启封闭成矿空间,提供了物质运移、集淀的通道,成为聚矿构造。超基性岩中的捕虏体一般都有蚀变矿化,平均品位多在 $3\times10^{-6}\sim5\times10^{-6}$ 之间,如 810 中段发现的捕虏体中的金矿体,平均品位达 5×10^{-6},870 和 915 中段捕虏体中的金矿体,平均品位在 3×10^{-6} 左右(任小华,2000;王瑞廷等,2007)。

空间上煎茶岭金矿床矿体产于蚀变岩石中,蚀变体与金矿体是含金量不同的同一地质体。蚀变白云岩、蚀变超基性岩是煎茶岭金矿赋矿、找矿的重要标志。超基性岩与白云岩的接触断裂带控制了含金蚀变体及矿体的规模、形态和产状,是最直接的找矿标志。一般认为,煎茶岭金矿床是受区域性主断裂(F_1^{45})控制,可是近年来的勘探和生产实践发现,区域性主断裂(F_1^{45})的上下盘分枝断裂及超基性岩的捕虏体中都找到了新矿体。因此,总结、回顾煎茶岭金矿床的勘查历史,结合该区找矿实践,分析认为其找矿标志可概括如下:

(1)具有一定规模和多期活动特点的断裂挤压破碎带及其分枝断裂。

(2)以金为主的金、银、砷、汞、硼、镍、钴、铬、锰、锌多元素化探组合异常,特别是原生晕金、砷异常的较强部位。

(3)断裂带中见有蚀变白云岩带,蚀变组合为黄(褐)铁矿化、硅化、碳酸盐化、叶蛇纹石化、滑石化、铬云母化。

(4)含金背景值高的超基性岩体,超基性岩体内有后期的中酸性侵入岩,并使得超基性岩体遭受了强烈改造变质。

(5)有利于交代作用进行的碳酸盐岩等围岩或地层岩性。

(6)区域上长期的构造岩浆活动。

5 结论与讨论

综上所述,煎茶岭大型金矿床的地球化学特征表明,超基性岩体是金的主要矿源层,成岩物质具幔源特点,金成矿过程与早期构造岩浆热液作用及后期构造热液蚀变作用有关,成矿流体为混合岩浆热液,晚期中酸性岩浆水是引起超基性岩蚀变变质的主要流体成分,金矿化过程中的硫是多期次、多来源的。该矿床为造山型金矿床,成矿可分为两期,即晋宁晚期-加里东期和印支-燕山期,以后者为主,其主成矿期对应于区域上的后碰撞造山过程,陆内挤压造山是其成矿地球动力学背景。超基性岩体的褪化蚀变、F_1^{45} 断裂的长期活动及与其大角度相交的上、下盘次级断裂、裂隙系统与灯影组白云岩是煎茶岭金矿床的主要控矿因素。F_1^{45} 断裂带、Au-Ag-As-Hg-B 等组合化探异常和蚀变白云岩为其重要的找矿标志。

研究表明,F_1^{45} 断裂带空间上规模较大,已发现

的含金矿化体延长与延深都颇具规模。煎茶岭矿区存在的不是一个单独的金矿床,而是一个找矿远景可观的金矿带。煎茶岭矿区长达 5200m 的含金蚀变构造带空间连续性、稳定性均较好,含金蚀变构造带经 1∶5 万水系沉积物测量已圈出何家岩—煎茶岭—张家山 Au 异常带。在成矿区 1∶1 万土壤测量工作基础上共圈出 20 个金异常带,地质普查圈划的金矿化构造蚀变带与煎茶岭金矿相类似,具备有利的成矿地质条件,并已圈出几个金矿体,控矿断裂规模大,矿区找矿前景可观。另外,根据工作程度和成矿条件分析,煎茶岭金矿矿体边部、深部及超基性岩体南、北两侧仍具有找矿潜力。所以,分析总结煎茶岭金矿床的地球化学特征和找矿标志、探讨其成矿地球动力学对于指导该区进一步找矿并取得突破具有重要的现实意义!

致谢:在本次研究与成文过程中与中国地质科学院矿产资源研究所王宗起研究员、北京大学刘树文教授、中国地质科学院地质研究所闫全人研究员、西北大学张复新教授进行了有益的讨论,评审专家的修改意见为本文的最终定稿起了较大作用,在此一并表示衷心感谢!

注　释

❶ 马建秦. 1998.秦岭勉略宁地区金矿床形成模式与找矿方向. 贵阳:中国科学院地球化学研究所博士学位论文, 1～88.

❷ 王瑞廷. 2002. 煎茶岭与金川镍矿床成矿作用比较研究. 西安:西北大学博士学位论文, 1～136.

❸ 王瑞廷. 2005.秦岭造山带陕西段主要矿集区典型金属矿床成矿模式和找矿预测研究.北京:中国地质大学博士后出站研究报告, 1～173.

参　考　文　献

陈民扬,庞春勇. 1994.煎茶岭镍矿床成矿作用同位素地球化学.见:陈好寿主编. 同位素地球化学研究. 杭州:浙江大学出版社, 56～81.

陈毓川,李兆鼐,母瑞身,沈保丰,邹光华,李华芹,等. 2001. 中国金矿床及其成矿规律. 北京:地质出版社,433～437.

储雪蕾,孙敏,周美夫. 2001.化学地球动力学中的铂族元素地球化学.岩石学报, 17(1):112～122

黄婉康,甘先平,单祖祥,陈荔湘,刘雁. 1996. 陕西煎茶岭金矿的岩石及成矿时代研究. 地球化学,25(2):150～156.

李人澍. 1996. 成矿系统分析的理论与实践. 北京:地质出版社,202～207.

毛景文,李晓峰,张荣华,王义天,赫英,张作衡,等. 2005a.深部流体成矿系统. 北京:中国大地出版社,269～320.

毛景文,李晓峰,李厚民,曲晓明,张长青,薛春纪,王志良,余金杰,张作衡,丰成友,王瑞廷. 2005b. 中国造山带内生金属矿床类型、特点和成矿过程探讨.地质学报, 79(3):342～372.

庞春勇,陈民扬.1993a. 煎茶岭地区同位素地质年龄数据及地质意义.矿产与地质, 7(5):354～360.

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

庞奖励,裘愉卓,刘雁. 1994. 论超基性岩在煎茶岭金矿床成矿过程中的作用. 地质找矿论丛, 9(3):59～65.

秦克令,何世平,宋述光. 1992. 碧口地体同位素地质年代学及其意义. 西北地质科学, 13(2):97～110.

冉红彦,黄婉康,甘先平,单祖翔,陶密,刘雁. 1996.蚀变超基性岩金(镍)矿床中的贵金属元素——以云南墨江金矿和陕西煎茶岭金矿为例. 地球化学, 25(5):520～528.

任小华. 2000. 陕西煎茶岭金矿床地质特征及成因意义. 矿产与地质, 14(2):70～75.

佘岳峰,王瑞廷,陈荔湘,代军治,刘莉霞. 2008. 煎茶岭金矿床控矿因素分析及找矿标志.矿产与地质,22(6):487～491.

王平安,陈毓川,裴荣富,吴淦国,等. 1998. 秦岭造山带区域矿床成矿系列、构造-成矿旋回与演化. 北京:地质出版社, 12～31.

王瑞廷,赫英,王新. 2000.煎茶岭大型金矿床成矿机理探讨. 西北地质科学, 21(1):19～26.

王瑞廷,赫英,刘明武,漆亮,王东生. 2002. 煎茶岭硫化镍矿床矿石地球化学特征. 地球学报, 23(6):535～540.

王瑞廷,赫英,王东生,刘民武. 2003.略阳煎茶岭铜镍硫化物矿床Re-Os同位素年龄及其地质意义. 地质论评, 49(2):205～211.

王瑞廷,任小华,王涛,高章鉴,刘莉霞. 2007. 陕西煎茶岭金镍矿田成矿分析与找矿进展. 中国地质, 34(增刊):151～154.

王相,唐荣扬,李实,李永祥,杨铭君,王东生,等. 1996. 秦岭造山与金属成矿. 北京:冶金工业出版社, 1～326.

许成,黄智龙,刘丛强,翟世奎,李文博,管涛. 2003. 铂族元素地球化学研究评述. 地学前缘, 10(4):520～528.

张复新,季军良,龙灵利,范春花. 2001. 南秦岭卡林型-似卡林型金矿床综合地质地球化学特征. 地质论评, 47(5):492～499.

张复新,肖丽,齐亚林. 2004.卡林型-类卡林型金矿床勘查与研究回顾及展望. 中国地质, 31(4):406～411.

张生. 1995. 铂族元素表生和热液活动的地质证据和实验研究. 地质地球化学,(3):7～9.

Barnes S J, Naldrett A J, Gorton M P. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas. Chem. Geol., 53: 303～323.

Garuti G, Fershtater G, Bea F, Bea P, Montero E V, Pushkarev F, Zaccarini. 1997. Platinum-group elements as petrological indicators in mafic-ultramafic complexes of the central and southern Urals: preliminary results. Tectonophysics, 276: 181～194.

Goldfarb R J, Phillips G N, Nokleberg W J. 1998. Tectonic setting synorogenic gold deposits of the Pacific Rim. Ore Geological Review, 13:185～218.

Groves D I, Goldfarb R. J, Gebre-Mariam M, Hagemann S G, and Robert F. 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of the crustal distribution and relationships to other gold deposit types. Ore Geology Reviews, 13:7～27.

Mao J W, Qiu Y M, Goldfarb R J, Zhang Z C, Garwin S and Ren F

S. 2002. Geology, distribution of gold deposits in the western Qinling belt, central China. Mineralium Deposita, 37(3):352～377.

Naldrett A J, Cabri L J. 1976. Ultramafic and related mafic rocks: their classification and genesis with special reference to the concentration of nickel sulfides and Platinum-group-elements. Econ. Geol., 71: 1131～1158.

Naldrett A J, Duke J M. 1980. Platinum metals in magmatic sulfide ores. Science, 208: 1417～1428.

Naldrett A J. 1981. Nickel sulfides deposits: classification, composition, and genesis. Econ. Geol., 6: 28～85.

Sun S S, Nesbitt R W. 1978. Petrogenesis of Archaean ultrabasic and basic volcanics: evidence from rare earth element. Contr. Miner. Petrol., 65: 301～325.

Wedepohl K H. 1995. The compositions of the continental crust. Geochim. Cosmochim. Acta, 59: 1217～1232.

Geochemical Characteristics, Metallogenic Geodynamics and Prospecting Indicator of the Jianchaling Large Gold Ore Deposit

WANG Ruiting[1)], WANG Dongsheng[1)], LI Furang[2)], CHEN Lixiang[2)], DAI Junzhi[1)], WANG Yitian[3)], YAN Zhen[4)]

1) *Geological Exploration Institution of Northwest Mining and Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals, Xi'an, Shaanxi*, 710054; 2) 711 *Party of Northwest Mining and Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals, Mianxian County, Shaanxi*, 724212; 3) *Institute of Mineral Resources, China Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037; 4) *Institute of Geology, China Academy of Geological Sciences, Beijing*, 100037

Abstract

The geochemical characteristics of Jianchaling gold ore deposit indicate that the Jianchaling ultramafic intrusion is the main source of gold and rock-forming substances displays the mantle-derived feature. The gold metallogenesis is related to early structure magmatic hydrothermal process and late structure hydrothermal alteration. Ore-forming fluid was hybrid magmatic hydrothermal one and the late intermediate-acid magmatic water was the main composition which is responsible for alteration metamorphossim of the ultramafic intrusion. The sulphur of gold mineralization was multiphase and polysources. The gold deposit should belong to orogenic-type deposit; its metallogenic process can be diviede into two periods, Late Jinning-Caledonian and Indosinian-Yanshanian, with the latter being dominating one. The main ore-forming time corresponds to the regional postcollisional orogeny. Therefore, intracontinental compressional orogeny formed its metallogenic geodynamics setting. Retrograde alteration of ultramafic intrusion, long-term activity of F_1^{45} fault and subsidiary fractures which intersect F_1^{45} at large-angles in its upper and heading side and its fissure system, and Dengying Group dolomite are main ore-controlled factors. Combined with exploration practice in this area, it is proposed that the fault belt, Au-Ag-As-Hg-B geochemical exploration anomaly, as well as alterated dolomite are important indicators for prospecting. Therefore, the Jianchaling area is potential for mineral exploration, and this study has important realistic signification to guide prospecting and get breakthrough in the area.

Key words: Jianchaling; gold deposit; geochemistry; metallogenic geodynamics; prospecting criteria