

文章编号: 1000-4734(2006)02-0203-07

四川大岩子铂族元素低温成矿特征: BSE 微区分析证据

郭利果^{1,2}, 刘玉平¹, 苏文超¹, 周国富¹, 叶霖¹, 徐伟^{1,2}

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:通过电子探针背反射图像(BSE)和能谱(ES)分析,结合岩矿鉴定和前人研究资料,确定大岩子 PGE 矿床与矿化有关的主要是一套低温矿物组合。与成矿特征相似的 New Rambler Mine 矿床进行了对比,并综合前人有关 PGE 低温成矿的论述和实验研究,认为大岩子 PGE 矿床具有明显的低温成矿特征,其成矿温度低于 300 °C,经历了富 S 体系溶液下的富集成矿和紧随其后的富 Cl 体系溶液下活化再富集成矿两个过程,后期矿化可能相当于或者强于前期矿化。

关键词:铂族元素;低温;成矿;四川大岩子

中图分类号:P619.5301 **文献标识码:**A

作者简介:郭利果,男,1981 年生,在读硕士,从事地球化学研究. E-mail: ligo2000@163.com

铂族元素(PGE)包括 Pt、Rh、Ru、Pd、Os、Ir 等 6 个元素,一般认为主要来源于地幔和天体,在地壳中丰度最高的是基性-超基性岩,可达到 $1 \times 10^{-9} \sim 10 \times 10^{-9}$ 。PGE 是重要的贵金属元素,在地壳中的丰度极低。由于近年来 PGE 需求量持续增长,PGE 矿床的找寻和相关的成矿作用研究成为国内外地质矿业界的热点之一。尤其在我国,PGE 自给产量不到需求量的 1/10,因而作为一类紧缺急需矿产资源长期受到科研部门和生产部门的重视。

根据国内一些学者对世界上 PGE 矿床的总结^[1-2],PGE 矿床主要可以分为 3 大类:①与基性-超基性岩有关的 PGE 矿床,包括铬铁矿型、铜镍硫化物型,各种与基性-超基性岩有关的叠加热液型和砂矿型;②与中酸性岩有关的 PGE 伴生矿床,包括斑岩铜钼型、热液型、矽卡岩型;③与黑色岩系有关的铂族金属矿床。PGE 的赋存状态可以分成:金属元素及金属互化物;各种化合物,包括硫化物、砷化物、碲化物及硫砷碲铋锑复杂化合物等等;伴生铂族元素矿物。从规模上看,与基性-超基性岩有关的以金属元素及金属互化物、硫砷碲铋化合物形式存在的 PGE 矿床均占有主要地

位^[3]。对于此类 PGE 矿床的形成,近年来进展迅速的地幔柱及其相关的成矿作用理论认为是在幔源岩浆的持续侵入过程中熔离分异形成。基于这个模型,国际上研究最为成功的是世界最主要 PGE 产区的南非的布尔什维德地幔柱。我国四川、云南、贵州等部分地区属于构造上划分的峨眉山大火山岩省,王登红等^[4]通过与布尔什维德地幔柱比较后认为:两者虽然分属不同的构造单元,形成于不同的时代,但本质类似,属于同一种成岩-成矿系列类型,可以用来进行对比从而指导中国的 PGE 成矿研究。在中国西南部被称之为峨眉山地幔柱的地区,迄今为止尚未发现类似布尔什维德地幔柱那种大规模、相对低品位的 PGE 矿化,只是在某些地区如杨柳坪、金山等发现了规模较小、品位相对较高的 PGE 矿化,这一点值得注意。

四川会理大岩子 PGE 矿床,是四川攀西地质大队 1999 年在该地区新发现的独立铂族元素矿床^[5]。它处于冕宁—西昌—会理韧性剪切带的德昌—会理铜镍矿成矿带中,为安宁河断裂和磨盘山—小关河断裂所夹持,其大地构造位置为康滇地轴中段攀西裂谷带。按照造山带观点,位于扬子地台西缘龙门山—锦屏山陆内造山带的锦屏山前缘基底隆起带上。

本文利用 EPMA-1600 型电子探针、EDAX 能谱仪,对大岩子矿床矿石进行了测试分析。结合

收稿日期:2005-09-21

基金项目:中国科学院重要方向项目(KZCX3-SW-125);矿床地球化学国家重点实验室基金。

BSE 图像,比较详细地研究了铂族元素矿物的共生组合,认为大岩子矿床具有低温热液成矿的特征。

1 矿床地质特征

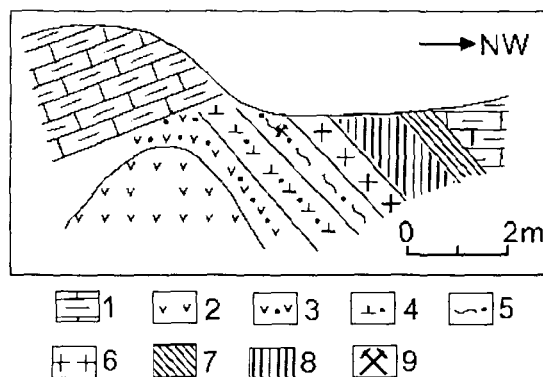
矿区出露地层以震旦系灯影组白云岩为主, 次为白垩系小坝组泥质砂岩及第四系残坡积层。发育有一系列断裂及次级褶皱、剪切带, 并形成构造岩片。与成矿有关的基性-超基性岩体, 归属晚二叠纪峨眉山暗色岩套, 主要呈大脉状产于安宁河断裂带东侧, 有多条岩脉分布, 总体走向 NNE, 倾向 NW, 倾角较陡, 出露岩石以辉绿岩脉居多, 其次为辉石岩脉和辉长岩脉和橄辉岩脉。岩体沿断裂顺层侵入到震旦纪灯影组白云岩中或者是处于褶皱构造的核部并与震旦纪灯影组白云岩接触。

矿体主要产在基性-超基性岩与白云岩接触破碎带的石英脉和碳酸盐岩脉中。矿化石英脉和碳酸盐岩脉主要以厘米级或毫米级穿插于断层破碎带角砾岩和断层附近的白云岩中^[6]。矿化体沿断层和接触带走向展布, 沿矿脉中心依次出现褐铁矿化—孔雀石、蓝铜矿化—黄铜矿化、斑铜矿、孔雀石、蓝铜矿化, 表明氧化作用由边部到中心逐渐减弱。经初步工程揭露, 圈出 4 个矿体, 矿石品位变化较大, Pt + Pd 从 0.34 ~ 16.39 g/t, 其中最主要的 I、IV 号矿体 D + E 储量 3086 kg^[5]。王登红^[7]等近期的研究发现, 在地表探槽和坑道中找到的蚀变基性-超基性岩除了辉长岩、辉绿岩之外, 还有一种辉石岩, 其中含有橄榄石的假象, 可能属于橄辉岩。坑道中相对新鲜者 PGE 达 1.068×10^{-6} , 蚀变者 0.528×10^{-6} , 地表强烈蚀变者 0.435×10^{-6} , 表明原始岩浆岩携带铂族元素, 并且在蚀变过程中“活化转移”。在地表蚀变并穿插有网脉状、浸染状蓝铜矿和孔雀石的矿化白云岩中, PGE 含量可达 $11.792 \times 10^{-6} \sim 27.132 \times 10^{-6}$ 。矿石矿物主要有孔雀石、蓝铜矿、辉铜矿、黄铁矿、自然铜、黄铜矿、斑铜矿、蓝辉铜矿、自然银、自然铂、铂钼矿等; 脉石矿物主要为方解石、石英、方解石、辉石、绿泥石、透闪石、滑石、绢云母等。由于 PGE 矿物粒度极细, 光片中和重砂矿物中矿物鉴定难度大。因此, 前人对该矿床 PGE 的赋存形式研究较少^[5-6, 8], 目前鉴定出来的只有自然铂、铂钼矿、砷铂矿、铜铋钼矿、碲铋钼矿等几种矿物。另外, 矿石中低温矿物的大量出现, 暗示该矿床的形成

可能不仅仅与基性-超基性岩侵入有关。

2 样品与分析方法

测试样品采于辉石岩与白云岩接触破碎带外侧的小褶曲核部, 为矿化细网脉状碳酸盐-石英脉穿插的含矿白云岩(图 1)。由于氧化程度较高, 主要发育一套次生矿物组合。



- 1.白云岩 2.辉石岩 3.硅化白云岩 4.褐铁矿化白云岩
5.孔雀石化矿石 6.铜蓝孔雀石化矿石 7.孔雀石化白云岩
8.褐铁矿化白云岩 9.采样点

图 1 大岩子接触带铂矿蚀变带剖面示意图

(据文献[2]修改)

Fig.1. The profile sketch map of alteration in contact zone of the Dayanzi PGE deposit.

样品制成光薄片后先在光学显微镜下观察, 确定的主要矿物为微晶石英/玉髓 + 方解石 + 白云石 + 孔雀石 + 褐铁矿 + 蓝铜矿, 次要矿物为黄铜矿 + 斑铜矿 + 铜蓝等, 是一套比较典型的低温矿物组合。可见微量的铂族元素矿物呈细粒星点状与上述矿物共生, 由于颗粒细小(多数 $< 5 \mu\text{m}$), 难以准确鉴定, 依据其亮白色、高反射率、相对硬度较小等特征, 推测为自然铂或铂钼矿。进行电子探针观测时, 先在 BSE 低分辨率状态下进行快速面扫描, 找到可能为铂族矿物的测点后, 调高分辨率进行观察并拍照, 然后将电子束进行聚焦, 利用 ES 对测点进行定量分析。BSE 分析的仪器为日本岛津公司产的 EPMA-1600 型电子探针, 定量分析采用的是 EDAX 公司产的 GENESIS 能谱仪。电子束斑直径小于 $10 \sim 15 \mu\text{m}$, 加速电压 25 kV, 电流 5 nA, 分析谱线选择及背景值扣除主要采用仪器内置程序完成。分析过程中对默认状态下的某些错误谱峰进行了人工修正。由于缺少铂族元素及矿物标样, 整个分析流程采用的是无标样快速定量分析。

3 分析结果

本次分析在其中的一个样品中找到可供测试的铂族元素单矿物 (PGM), 粒度为几到十几 μm , 呈不规则粒状、叶脉状、星点状, 嵌布于微晶石英/玉髓、白云石、方解石、褐铁矿、孔雀石等矿物之中或不同颗粒之间 (图 2a, b, c, d, e, f); 同

时, 我们还发现了不少与之共存的螺硫银矿 (图 2g, h)。孔雀石、褐铁矿和蓝铜矿均存在早晚两期, 早期主要为板片状-细脉状孔雀石、球粒状-细脉状褐铁矿, 与 PGM、螺硫银矿、微晶石英/玉髓、方解石、白云石等矿物等共生; 晚期孔雀石和褐铁矿主要为皮壳状-被膜状, 包裹、交代早期形成的矿物。

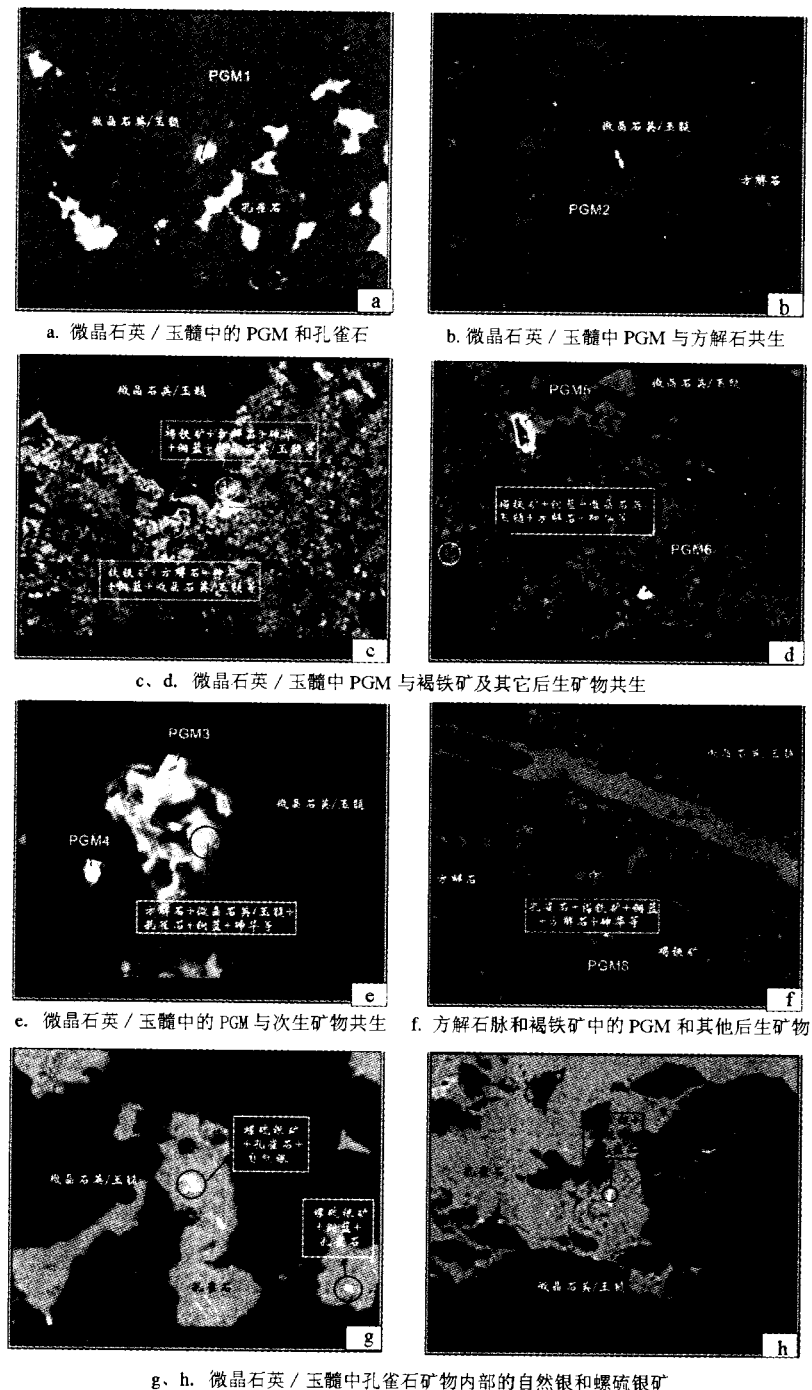


图 2 四川会理大岩子 PGE 矿床铂族矿物的显微特征

Fig. 2. The micrograph of Platinum group minerals from Dayanzi deposit in Huili area, Sichuan Province.

表1是12个PGM测点的分析结果。由于电子束斑直径较大,加之样品氧化程度高,许多矿物的粒度细小,因而测定的结果实际上受到PGM周围矿物的干扰。综合能谱(ES)定量分析和显微镜观测结果,表明样品中构成矿物的阴离子元素主要为O、C、S等,其次还包括As、Te、Bi等。所有PGM周边主要为微晶石英/玉髓和方解石、白云石等矿物,如果对PGM定名则可以剔除Ca、Mg、Si等元素。除DYZ-PT-1和DYZ-PT-3测点之外,其余10个PGM测点由于周围有褐铁矿、孔

雀石等金属矿物存在,所以很难界定测点中的Cu、Fe以及Mn、Co、Ni等伴生金属元素是存在于周围矿物之中还是PGM中。同时,在EDAX能谱测量系统中,氧元素由于处于低能级,测定结果不准确;S元素仪器内部程序设定的背景值偏大,使得该元素峰形拟合度较差,测量值可能偏小;样品测试前经过了喷碳处理,碳的含量无法进行测定。由于O、C、S等主要的阴离子元素的测定结果存在较大误差,影响了对这些矿物进行准确的定名。

表1 四川会理大岩子PGE矿床铂族矿物电子探针EDAX测点分析结果

Table 1. Electron microprobe EDAX analysis of Platinum group minerals from Dayanzi deposit in Huili area, Sichuan Province, China

Samples	Pt	Pd	Te	Bi	Sb	O	S	As	Ca	Mg	Fe	Si	Cu	Ni	Mn	Co	总和
DYZ-PT-1	32.29	10.66	1.52	1.29		13.73	1.41	8.53	3.94		0.69	3.89	20.56			0.30	98.81
	8.77	5.31	0.63	0.33		45.46	2.33	6.03	5.21		0.66	7.34	17.14			0.27	99.48
DYZ-PT-3	33.80	3.67	0.79	3.45		16.90		5.05	2.15		0.54	20.51	10.30			0.23	97.39
	7.44	1.48	0.27	0.71		45.40		2.89	2.30		0.42	31.37	6.97			0.17	99.42
DYZ-PT-6	42.67	4.46	2.58			16.71	0.74	4.28	10.77			0.56	16.33		0.89		99.99
	11.12	2.13	1.03			53.09	1.18	2.91	13.66			1.01	13.07		0.83		100.00
DYZ-PT-7-1	36.85	1.94	1.65			16.86	0.52	11.99	5.63		0.60	4.35	15.95	1.03	1.70	0.92	99.99
	9.12	0.88	0.62			50.87	0.79	7.72	6.78		0.52	7.48	12.12	0.85	1.49	0.76	100.00
DYZ-PT-7-2	41.16	2.42	1.13			23.72	0.49	5.56	2.97			7.74	10.50	1.01	1.70	0.95	99.35
	8.77	0.95	0.37			61.66	0.63	3.08	3.08			11.46	6.87	0.71	1.29	0.67	99.54
DYZ-PT-11	50.9	3.57	2.10			9.85		4.12	3.32		4.46	4.69	11.55	2.00	1.73	1.04	99.33
	16.45	2.11	1.04			38.80		3.47	5.22		5.03	10.52	11.46	2.15	1.98	1.11	99.34
DYZ-PT-12	42.36	0.58	3.34			12.34	0.38	11.70	5.02		8.14	2.08	12.03	0.76	0.85	0.43	100.00
	12.35	0.31	1.49			43.88	0.68	8.88	7.12		8.29	4.21	10.77	0.74	0.88	0.41	100.00
DYZ-PT-12-3	16.41	0.25	1.08			21.57	1.15	3.49	2.13		6.82	6.24	18.9	4.39	8.99	5.32	96.74
	3.21	0.09	0.32			51.43	1.37	1.78	2.03		4.66	8.48	11.35	2.86	6.24	3.45	97.27
DYZ-PT-13	68.52	5.03	1.48			7.20	0.80	2.82	1.88		1.79	0.85	8.82		0.43		99.62
	29.72	4.00	0.98			38.08	2.10	3.18	3.97		2.71	2.55	11.74	0.00	0.66		99.69
DYZ-PT-14	39.24	2.46	3.53			17.57	0.12	13.3	4.46		3.46	1.64	10.10	1.32	0.68		97.88
	10.09	1.16	1.39			55.09	0.19	8.91	6.09		3.11	2.92	7.97	1.12	0.62		98.66
DYZ-PT-15	30.91	10.77	2.59			13.99	0.26	8.92	3.65		5.63	0.88	22.40				100.00
	8.53	5.45	1.09			47.08	0.43	6.41	4.90		5.43	1.70	18.98				100.00
DYZ-PT-16-3	60.63	0.11	0.28	1.28	0.76	10.07			0.75	1.14	10.68	2.62	7.70	1.58	0.91		98.51
	20.88	0.07	0.15	0.41	0.42	42.30			1.25	3.16	12.85	6.26	8.14	1.81	1.11		98.81

注:列出的每个样品数据,上面1行表示质量分数(%),下面1行为摩尔分数(%).

对照PGM测点成分分析和周围矿物的分析结果,推测PGM主要为自然铂、铂钯矿和铂钼(铜)硫砷碲铋锑的复杂化合物。更为重要的是,通过BSE图像分析,显微镜观察及能谱定量分析,发现除了孔雀石、蓝铜矿、褐铁矿等氧化次生矿物外,还存在先期发育的一套较低温度下形成的矿物组合(典型矿物如微晶石英/玉髓、方解石、自然银和螺硫银矿等);PGM主要产出在微晶石英/玉髓、褐铁矿矿物之间;铂族元素与Cu密切相关(表现在共生共存的含量上)。

4 讨论和结论

比较美国怀俄明州 Medicine Bow Mountains New Rambler Mine 矿床与大岩子PGE矿床,发现两者具有诸多的相似之处:①两者均属产于剪切带中的Cu-PGE矿床,仅存在规模上的差别;②矿床成矿元素组合基本相同,均为Cu、Ni、PGE、Ag、Au组合;③在原生矿石中,PGE矿化主要与剪切破碎带中蚀变的辉石岩、白云岩有关,与以黄铜矿、磁黄铁矿为主的硫化物矿物紧密共生,并且两

个矿床原生矿石的矿物组合基本类似。

两者最显著的区别在于大岩子矿床孔雀石化程度远远强于 New Rambler Mine 矿床,其主要原因可能是由于围岩性质不同。有意思的是,大岩子矿床早期孔雀石化矿石中 PGE 含量特别高,研究表明 PGM 主要与孔雀石、石英及褐铁矿密切共生(图 2a);New Rambler Mine 矿床后生矿石中也出现 PGE 富集,但规模上要弱许多^[5,10]。

美国 New Rambler Mine 矿床的研究表明^[9,12],其 PGE 矿化形成温度大致在 335 °C 以下,属于典型的低温热液成矿。Watkinson^[13-14]在研究阿拉斯加 Salt Chuck 侵入体中的 PGE 矿化时,也证明了富含 Cu、PGE、Ag 的流体可以在大约 300 ~ 400 °C 范围以下形成了相关的矿化。笔者尝试利用流体包裹体及同位素测温来反演大岩子矿床的成矿温度,但是矿石中的石英和方解石颗粒较小,包裹体含量少并且碎裂严重,不适合作为测试对象;矿床后生作用严重,原生矿石极少并且存在采样上的困难,亦很难开展 S 同位素分析和温度计算。但 New Rambler Mine 矿床的研究,可以从一个侧面反映大岩子矿床原生矿石中 PGE 矿化温度应该不超过 335 °C。

从赵支刚等^[5]发表的资料来看,矿床 Ni 的品位也比较高,矿床总体上表现出较高的 Ni/Cu 比值,Naldrett 等^[15]证明了在温度为 300 °C 以下时,磁黄铁矿能够吸收质量分数超过 15% 的 Ni 进入固溶体中,Ewers^[16]也证明了 Ni 在 200 °C 以上时能够被磁黄铁矿吸收。前人研究表明,大岩子矿床 PGE 与 Ni 并不相关^[5,17],笔者认为,这种不相关可能是由于较为强烈的 PGE 后生再富集作用造成。大岩子矿床 Ni 的赋存矿物主要为原生镍黄铁矿和磁黄铁矿,为早期热液成矿阶段的产物,因而用 Cu/Ni 比值估计原生矿石中 PGE 的形成温度仍具有一定的借鉴意义。从 Cu 和 Ni 相对含量来看,原生矿石中 PGE 成矿温度亦不高,可能在 300 °C 以下。

从 BSE 图像中看出,赋存在微晶石英/玉髓中与 PGM 共生的早期孔雀石棱角鲜明或者成脉状(图 2a, f, g, h),充填于微晶石英/玉髓的粒间或缝隙中,与表生作用形成的晚期皮壳状被膜状孔雀石(图 2c, f)存在明显的区别,显微镜下亦可观察到早期孔雀石与碳酸盐脉密切共生的现象,表明早期孔雀石及 PGM 可能是含有 Cu 和 PGE 的成矿热液与碎裂白云岩发生水-岩反应、交代蚀变的

结果。这一过程同时也形成了微晶石英/玉髓、方解石、白云石、自然银、辉银矿/螺硫银矿等矿物,这套矿物组合的形成温度比前者更低,明显具有低温成矿的特点。

前人对流体包裹体的研究表明,流体相是 PGE 富集过程的必要的一部分^[18-19]。实验和实例证明^[20-24]:①在 300 °C 条件下的 NaCl/H₂SO₄ 溶液中,Pt 和 Pd 在高盐度酸性条件下具有相当的溶解度,主要以氯的络合物形式迁移;在超临界温度条件下,Pt 和 Pd 可能溶解度更高;在 pH 和溶液浓度变化,温度降低等条件下重新沉淀。②在 30 ~ 300 °C 的富 H₂S 溶液中,Pt 和 Pd 溶解度较低,主要以 HS⁻ 的络合离子迁移,当 H₂S 活度降低和氧逸度达到 PtS 和 PdS 稳定范围之外时,沉淀形成新的 PGE 矿物。许多学者对 PGE 的迁移形式进行了研究^[25-28],探讨了低温甚至是表生条件下 PGE 的迁移富集形式。研究表明,与传统的认识不同,PGE 在低温条件下具有一定的活动性,可以在流体中发生迁移、富集。

综合上述研究,我们认为大岩子矿床 PGE 矿化可能主要是在一种相对比较氧化的富 Cl 体系下的产物,PGE 富集成矿可能经历了:岩浆熔离分异-PGE 初步富集、岩体侵位-早期热液成矿、韧性剪切-晚期热液成矿和次生氧化迁移等几个主要阶段。岩浆熔离分异过程中,基性-超基性岩 PGE 发生了初步富集^[8],富集元素组合为 Cu-Fe-Ni-PGE(由于岩体内部未发现有意义的矿化,推测这些元素主要呈分散状态);岩体侵位驱动了地层围岩中的流体运移,并与岩体发生水-岩反应,PGE 以 S²⁻和 HS⁻的络合离子形式迁移并在韧性剪切带下部或者小褶皱核部沉淀形成早期矿化,成矿元素组合主要为 Cu(黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿等)-Fe-Ni(镍黄铁矿-磁黄铁矿、黄铁矿等)-PGE(可能主要以硫砷碲铋锑等化合物形式存在);岩体侵位后冷却收缩,导致韧性剪切带活动,大气降水成因为主的流体下渗、并与围岩(包括地层和基性-超基性岩)和早期的矿石相互作用,大量 S²⁻、HS⁻和 Cl⁻离子在蚀变过程中进入流体,由于围岩比较破碎,相对来说是一个较为开放的氧化环境,热液中的一部分 HS⁻和 S²⁻被氧化成 SO₄²⁻,从而可能形成酸性程度较高的富含 Cl 的热液,并在以破碎辉石岩、白云岩为主的断裂带中重新沉淀富集,形成晚期 Cu-PGE 矿化,成矿元素组合为 Cu(孔雀石、蓝铜矿、自然铜、铜蓝等)-PGE(自然铂、铂钼矿等)-

Ag(自然银、辉银矿/螺状硫银矿等);此后的次生氧化作用主要使某些部位残余的硫化物最终形成皮壳状、被膜状、斑驳状的褐铁矿、孔雀石、镍华、砷华等次生矿物,并使一部分的PGE元素,尤其是Pd以OH的络合物离子形式,经过地表水体搬运,迁移到矿区外围形成比较明显的PGE地球化学分散晕^[17]。

综上所述,大岩子PGE矿床具有明显的低温成矿特征,其主要成矿温度应该在300℃以下,其形成演化过程可能主要经历了与有关的岩浆熔离

分异-初步富集、岩体侵位-早期富S体系热液成矿、韧性剪切-晚期富Cl体系热液成矿以及次生氧化四个阶段。从矿石比例来看,富Cl体系热液成矿的重要性可能大于或等于富S体系热液成矿。

致谢:在实验阶段,得到了中国科学院矿床地球化学重点实验室刘世荣博士的大力帮助;在数据处理阶段及成文阶段,与钟宏研究员、宋谢炎研究员、皮道会博士深入交流了意见。在此一并表示感谢!

参 考 文 献:

- [1] 中国矿床编委会.中国矿床(中册)[M].北京:地质出版社,1994:249-266.
- [2] 刘秉光.中国PGE矿床类型分析[J].地质与勘探,2002,38(4):1-7.
- [3] 朱训.中国矿情(第二卷),金属矿产[M].北京:科学出版社,1999,468-488.
- [4] 王登红,应汉龙,骆耀南,等.试论与布什维尔德杂岩体有关的铂族元素-铬铁矿床成矿系列及其对中国西南部的意义[J].地质与资源,2002,11(4):243-249.
- [5] 赵支刚,杨大宏,杨铸生.四川会理大岩子铂矿地质特征及在找矿模式[J].西昌地质,2000,(65):1-14.
- [6] 张光弟,李九玲,熊群尧,等.四川会理大岩子铂矿矿化特征与成因初探[J].矿床地质,2002,21(增刊):763-766.
- [7] 王登红,傅德明,付小方.攀西地区铂族元素研究新进展[J].地质论评,2004,50(1):i001-i001.
- [8] 成抗新,沈瑞平,赵传东,等.一个高品位铂矿地球化学标样的可行性研究[J].地质与勘探,2005,41(1):48-50.
- [9] McCallum M E, Loucks R R, Carlson R R, et al. Platinum metals associated with hydrothermal copper ores of the New Rambler Mine, Medicine Bow Mountains, Wyoming[J]. *Economic Geology*,1976,71:1429-1450.
- [10] Yund R A, Gunnar K. Thermal stability of assemblages in the Cu-Fe-S system[J]. *Journal of Petrology*,1966,7:454-488.
- [11] Gunnar K, Yund R A, Moh G H. Phase relations in the Cu-Fe-S, Cu-Ni-S system[A]. Wilson H D B. *Magmatic Ore Deposits*[C].Lancaster PA:Economic Geology Publ. Co., 1969:323-343.
- [12] Sugaki A, Shima H, Kitakaze A, et al. Isothermal phase relations in the system Cu-Fe-S under hydrothermal conditions at 350℃ and 300℃ [J]. *Economic Geology*,1975,70:806-823.
- [13] Watkinson D H. *Platinum-Group Minerals in Cu-Rich Sulfides from North American Mafic-Ultramafic Rock Complexes*[R]. Mineralog Soc Korea Symposium on Modern Mineralogy,2nd, Seoul, Korea, 1990:37-51.
- [14] Watkinson D H, Melling D R. Hydrothermal origin of Platinum-group mineralization in low-temperature copper sulfide-rich assemblages, Salt Chuck intrusion, Alaska[J]. *Economic Geology*,1992,87:175-184.
- [15] Naldrett A J, Craig J R, Gunnar K. Pentlandite exsolution in iron-nicked sulfide ores [J]. *Geo Soc America*, 1967, 101:149.
- [16] Ewers W E. Nickel-iron exchange in pyrrhotite[J]. *Australasian Inst Mining Metallurgy Proc*, 1972,241:19-25.
- [17] 成抗新,赵传东,庄广民,等.四川大岩子Pt-Pd矿床水系沉积物中的地球化学异常特征及外围找矿预测[J].地球化学,2004,33(1):89-93.
- [18] Ballhaus C G, Stumpfl E F. Sulfide and platinum mineralization in the Merensky reef;Evidence from hydrous silicates and fluid inclusions[J]. *Contr Mineralogy Petrology*,1986,94:193-204.
- [19] Johan Z, Watkinson D H. Phase fluide riche en NaCl-C-H-N et son rôle dans la concentration des éléments groupe de platine et de la chromite: "Upper Critical Zone" complexe de Bushveld in Guides de prospection pour les gisements de plantinoides dans les complexes ophiolitiques et stratifiés, Rapport final. Brussels[C]. Comm Communautés Européennes,1987:61-85.
- [20] Mountain B W, Wood S A. Solubility and transport of platinum-group elements in hydrothermal solutions: Thermodynamic and physical chemical constraints [A]. Prichard H M et al. *Geoplatinum 87*[M].London:Elsevier,1988:57-82.
- [21] Van Middlesworth J M, Wood S A. The stability of palladium(II) hydroxide and hydroxyl geochemistry of platinum and palladium;I. Solubility of platinum and palladium sulfide minerals in NaCl/H₂SO₄ solutions at 300℃[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,1992,56:3881-3894.
- [22] Gammons G H, Bloom M S, Yu Y. Experimental investigation of the hydrothermal geochemistry of platinum and palladium;I. Solubility of platinum and palladium sulfide minerals in NaCl/H₂SO₄ solutions at 300℃[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,1992,56:3881-3894.
- [23] Gammons G H, Bloom M S. Experimental investigation of the hydrothermal geochemistry of platinum and palladium; II. The solubility of PtS and PdS in aqueous sulfide solutions to 300℃[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*,1993,57:2451-2467.

- [24] Boudreau S J, Mathez E A, McCallum I. Halogen geochemistry of the Stillwater and Bushveld complexes: Evidence for transport of the platinum-group elements by Cl-rich fluids[J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27:967-986.
- [25] Gammons G H. Experimental investigations of the hydrothermal geochemistry of platinum and palladium: V. Equilibria between platinum metal, Pt (II), and Pt (IV) chloride complexes at 25 to 300 °C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60:1683-1694.
- [26] 郁云妹. 低温下铂族元素(PGE)稳定性的热液实验[A]. 涂光炽, 等. 低温地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 175-189.
- [27] Van Middlesworth J M, Wood S A. The stability of palladium(II) hydroxide and hydroxy chloride complexes: An experimental solubility study at 25 - 85 °C and 1 bar [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63:1751-1765.
- [28] Azaroual M, Romand B, Freyssinet P, et al. Solubility of platinum in aqueous solutions at 25 °C and pHs 4 to 10 under oxidizing conditions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65:4453-4466.

CHARACTERISTICS OF LOW TEMPERATURE PGE-MINERALIZATION IN DAYANZI, SICHUAN PROVINCE, CHINA: EVIDENCE FROM BSE AND ES MICROANALYSIS

GUO Li-guo^{1,2}, LIU Yu-ping¹, SU Wen-chao¹, ZHOU Guo-fu¹, YE Lin¹, XU Wei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: According to BSE and ES microanalyses, rock-mineral identification and geologic records of the Dayanzi PGE deposit, the authors have confirmed that a set of low-temperature mineral assemblages is associated with PGE mineralization. Based on the above result, a comparison between the Dayanzi deposit and the New Rambler Mine deposit was made, in combination with previous explanations and experiments on PGE mineralization at low temperatures, the authors held that the Dayanzi PGE deposit is characteristic of low-temperature mineralization; its mineralization temperature is lower than 300 °C, and it experienced the processes of concentration and deposition in aqueous H₂S-rich solutions and subsequent activation, and the processes of concentration and deposition in aqueous Cl-rich solutions. The records suggest that the latter process may be equal to or greater than the former process.

Key words: Dayanzi; PGE; low temperature; mineralization