

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2025.01.002

四川盐边高家村岩体地质特征及 铂族元素地球化学特征

伏明珠, 凌亚军, 李俊

(四川省第四地质大队, 四川 成都 611130)

摘要: 高家村杂岩体位于川滇 SN 向构造带与南岭 EW 向构造带的西延复合部位, 赋矿岩体为橄榄岩, 矿石类型为硫化铜镍型。通过对高家村岩体铂族元素特征研究, 结果显示: 岩体 $w(\text{Ni})/w(\text{Cu})=0.37\sim 51.4$, $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})=2.18\sim 51.31$, $w(\text{Pt}+\text{Pd})/w(\text{Os}+\text{Ir}+\text{Ru})=1.86\sim 10.03$, $w(\text{Pt})/w(\text{Pt}+\text{Pd})=0.02\sim 0.73$, 说明高家村岩体原始岩浆为高镁玄武质岩浆。高家村岩体 $w(\text{Ir})=0.005\times 10^{-9}\sim 1.44\times 10^{-9}$, $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})=2.18\sim 51.31$, 平均为 15.62, 高于原始地幔值; $w(\text{Ni})/w(\text{Cu})=0.37\sim 51.4$, 平均为 10.22, 说明高家村岩体部分熔融程度较低。高家村岩体 $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})=3.03\sim 622.98$, 平均为 59.66, 平均值大于原始地幔 $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$ 值, 推测高家村岩体经历过深部的硫化物熔离, 之后剩余岩浆继续上升到浅部形成现在的高家村岩体。

关键词: 高家村杂岩体; 铂族元素; 地球化学特征; 盐边

中图分类号: P595 **文献标识码:** A

0 引言

铂族元素(PGE)属于Ⅷ族过渡金属元素, 由铂(Pt)、钯(Pd)、钌(Ru)、铑(Rh)、铱(Ir)、钇(Y)等6种元素组成。依据密度差异和元素共生特征, 将铂族元素划分为: ①重铂族组(Os、Ir、Pt)和轻铂族组(Ru、Rh); ②Pd族(Pt、Pd)和Ir族(Os、Ir、Ru、Rh)^[1]。铂族元素具有高度的亲铁性和亲硫性, 对开展岩浆硫化物矿床成因和幔源岩浆演化研究具有重要的意义。Barnes等^[2-3]研究发现成矿过程中铂族元素更多地表现出强烈或较强的亲硫性, 它们聚集在地幔中不足0.1% vol的Fe-Ni-Cu硫化物相中, 常伴随着镁铁-超镁铁岩中的贱金属硫化物(BMS, base metal sulfides)产出; 王焰等^[4]通过对铂族元素在不同的镁铁-超镁铁质岩浆中富集规律

的研究, 丰富了岩浆硫化物矿床成矿理论。

本次工作对四川盐边高家村岩体进行了铂族元素调查研究, 并对高家村岩体的成矿过程进行了制约。

1 区域地质背景

盐边高家村岩体位于扬子准地台(I₁)西缘之康滇地轴(II₁)南段之盐边台拱(III₂), 川滇SN向构造带与南岭EW向构造带西延的复合部位, 地质构造复杂(图1)。区域内SN向构造带中广泛发育SN向断裂, 次为EW向张裂隙, 加之区内岩浆活动频繁, 致使区内构造更加复杂。

区域内康定岩群咱里组及冷竹关组、盐边岩群渔门组、南华系荒田组及列古六组、震旦系观音崖组及灯影组发育, 以溱沱系咱里组及冷竹关组为主, 其次为青白口系渔门组。咱里组为一套原岩为中-基

收稿日期: 2024-10-22; 改回日期: 2025-01-10; 责任编辑: 沈名星

基金项目: 四川省地质局专项项目“四川省盐边县冷水箐地区镍矿靶区优选”(编号:SCDZ-DZKC202404)资助。

作者简介: 伏明珠(1983—), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事区域地质调查及矿产勘查工作。通信地址: 四川成都市温江区百利大厦。邮政编码: 611130。E-mail: 783244552@qq.com

通信作者: 凌亚军(1984—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事区域地质调查、矿产地质调查、矿产资源勘查及评价工作。通信地址: 四川成都市温江区百利大厦。邮政编码: 611130。E-mail: 286170947@qq.com

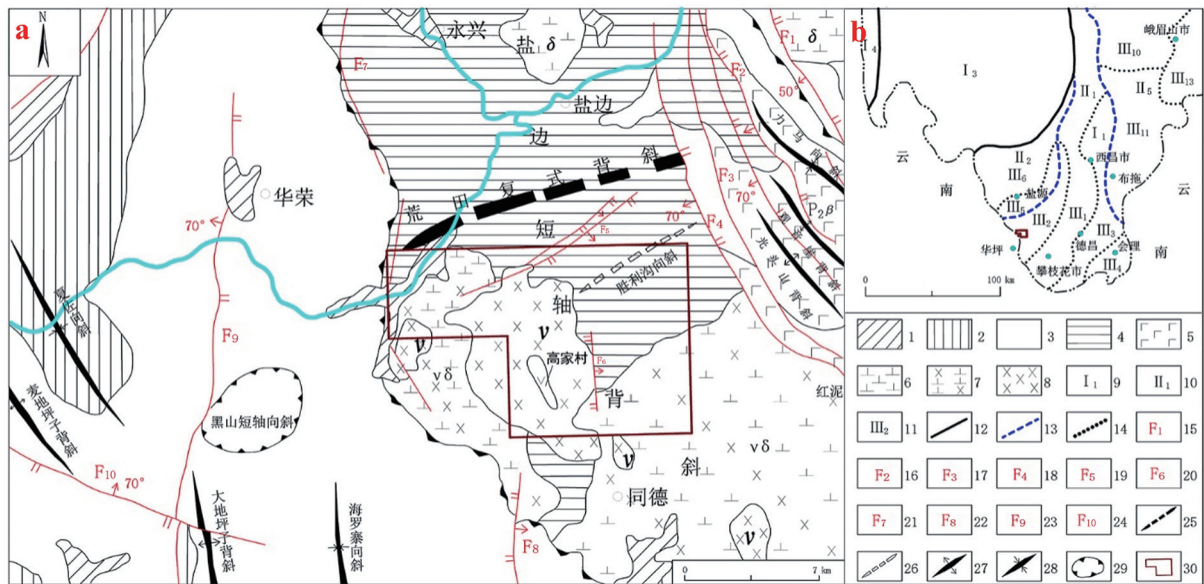


图1 调查区大地构造位置图

Fig. 1 Map showing geotectonic position of the study area

图a 据1:20万盐边幅区调;图b 据四川省区域地质志

1. 第三系至第四系;2. 三叠系至白垩系;3. 震旦系至二叠系;4. 前震旦系;5. 玄武岩($P_2\beta$);6. 闪长岩类(δ);
7. 辉长闪长岩类($\omega\delta$);8. 辉长岩、辉长辉绿岩类(ν);9. 扬子准地台;10. 康滇地轴;11. 盐边台拱;12. 一级构造单元界线;
13. 二级构造单元界线;14. 三级构造单元界线;15. 大石头断层;16. 力马断层;17. 西番田断层;18. 营盘山断层;
19. 新街田断层;20. 小井沟断层;21. 富阳村断层;22. 烂堡田断层;23. 狮子山断层;24. 下龙洞断层;
25. 背斜(基底);26. 向斜(基底);27. 背斜;28. 向斜;29. 短轴向斜;30. 调查区范围

性火山岩、大洋型玄武岩的基性火山岩建造;冷竹关组为一套原岩以中酸性火山、火山沉积为主的陆源碎屑岩建造;渔门组为一套原岩为含碳质细碎屑岩-泥砂岩建造。

新元古代岩浆岩在康滇裂谷内非常活跃,主要为晋宁期和澄江期侵入体。四堡运动促使扬子地块西缘产生洋壳俯冲,形成岩浆岛弧,如石棉大水沟斜长角闪岩^[5];对新元古代盐边岩群碎屑物研究表明,盐边地区最新岛弧火山岩碎屑锆石年龄为 ~ 880 Ma^[6]。之后盐边岩群在 ~ 860 Ma 形成弧后拉张盆地构造环境,同期侵入关刀山岩体^[7]。最后随着Rodina 超大陆的裂解和康滇裂谷的形成,该地区相继侵入了同德辉长闪长岩体(~ 820 Ma)、高家村镁铁质-超镁铁质岩体(~ 810 Ma)、攀枝花地区镁铁质-超镁铁质岩体(~ 750 Ma),后期还侵入一些基性岩脉。

2 矿区地质特征

2.1 高家村岩体特征

高家村杂岩体位于四川省攀枝花市盐边县、仁

和区及云南省华坪县交界处,岩体主体部分位于四川省境内。四川省106地质队20世纪70年代工作圈定岩体面积 60 km^2 ,20世纪80年代四川省冶金601队曾在岩体中部施工5个钻孔,但均未揭穿岩体。位于南部的通常称为同德岩体,其实也是高家村岩体的一部分,系高家村岩体的外围中酸性岩相。因此,高家村岩体的范围还应扩大,其实际出露面积应大于 150 km^2 ,为基性超基性-中酸性复合岩体。以高家村顶顶为核心,中心为基性超基性岩相,外围依次为基性岩相、基性-中性岩相,南部同德一带出露中酸性岩相。其中,岩体的基性-超基性岩相主要集中分布于高家村顶顶附近,面积约 5.5 km^2 。

盐边高家村地区岩浆岩活动以新元古代为主,高家村杂岩体规模最大,为镁铁质-超镁铁质岩体,为新元古代早期侵入^[8]。高家村周围发育数十个大小不等的卫星岩体,单个岩体多呈不对称的岩盆状、岩盘状、脉状,构成以高家村杂岩体为中心的冷水管复式岩体群。

高家村杂岩体周围主要的构造为断层和褶皱,断层主要为新街田断层及小井沟断层。岩体内也发育NNW向及近EW向断层。

2.2 赋矿岩体及矿石特征

目前高家村杂岩体内发现的铜镍矿含矿层位于高家村镁铁质-超镁铁质杂岩的中部及中下部^①,含矿层为黑色橄榄岩,矿层直接顶底板均为橄榄岩、辉石橄榄岩、橄辉岩、橄榄辉长岩、角闪辉长岩。共发现 I 号和 II 号 2 个矿体(图 2),其具体特征如下:

I 号矿体:位于高家村岩体北东部,地表未出露,深部由钻孔控制。矿体产于晋宁期镁铁质-超镁铁质岩体中部,含矿岩石为黑色橄榄岩,走向长 350 m,倾向延深约 280 m,产状 $62^\circ \angle 50^\circ \sim 62^\circ$,呈脉状。矿体厚度 1.35~1.82 m,平均 1.54 m,厚度变化系数 9%; $w(\text{Ni}) = 0.37\% \sim 1.47\%$,平均 0.69%, $w(\text{Cu}) = 0.23\% \sim 1.03\%$,平均 0.45%, $w(\text{Co}) = 0.01\% \sim 0.60\%$,平均 0.03%;品位变化系数 47%。矿石矿物为镍黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿等,脉石矿物主要为橄榄石,次为辉石(图 3),少量角闪石。此类矿石属硫化铜镍型。

II 号矿体:位于 I 号矿体下侧,地表未出露,深部钻孔控制。矿体产于晋宁期镁铁质-超镁铁质岩体中部,含矿岩石为黑色橄榄岩,走向长约 350 m,倾向延深约 270 m,产状 $62^\circ \angle 50^\circ \sim 62^\circ$,呈脉状。矿体厚度 1.20~3.80 m,平均 1.94 m,厚度变化系数 43%; $w(\text{Ni}) = 0.32\% \sim 1.31\%$,平均 1.21%, $w(\text{Cu}) = 0.23\% \sim 1.03\%$,平均 0.47%, $w(\text{Co}) =$

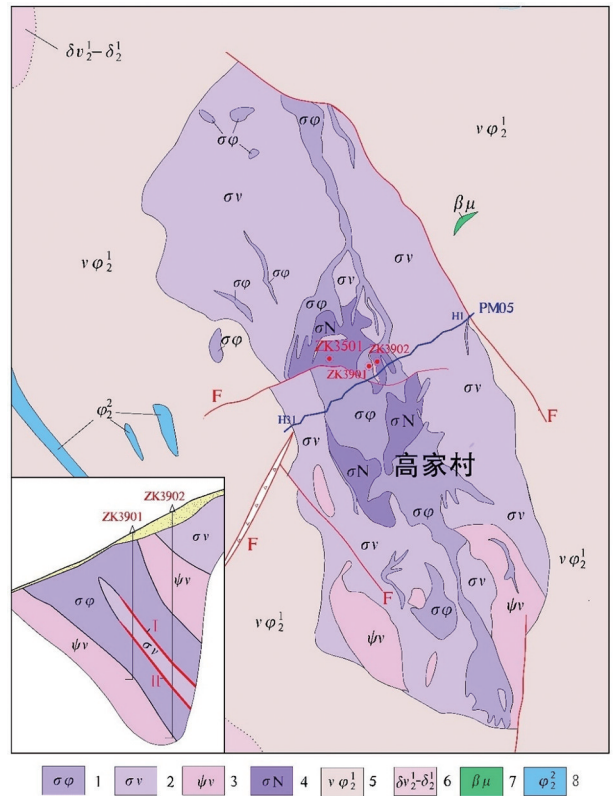


图 2 高家村杂岩体地质简图

Fig. 2 Geological sketch of Gaojiacun complex
 1. 橄榄岩类; 2. 橄榄苏长辉长岩; 3. 角闪辉长岩-闪长岩;
 4. 橄长岩; 5. 苏长辉长岩; 6. 闪长辉长岩-闪长岩;
 7. 辉绿岩; 8. 辉石岩

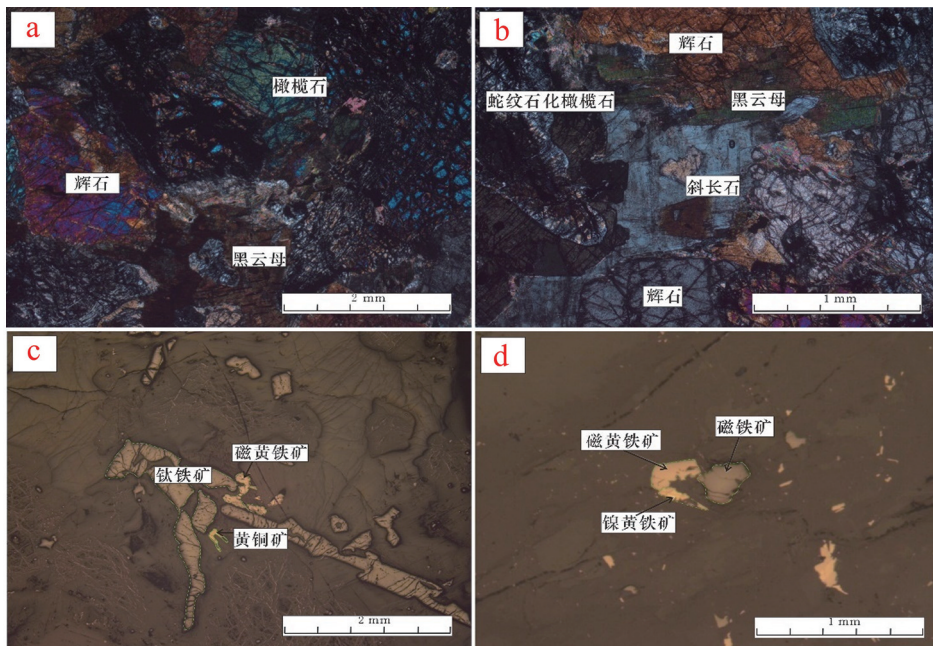


图 3 高家村镁铁质-超镁铁质杂岩体的岩石学显微特征(据注释①)

Fig. 3 Microscopic petrological characteristics of the complex

a. 半自形粒状橄榄石和辉石,片状黑云母;b. 半自形粒状蛇纹石化橄榄石、辉石和斜长石,片状黑云母;
 c. 半自形-自形板状或粒状钛铁矿,它形粒状磁黄铁矿和黄铜矿;d. 它形粒状磁铁矿、磁黄铁矿和镍黄铁矿连生

0.01%~0.10%，平均0.05%，品位变化系数41%；矿石矿物为镍黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿等，脉石矿物主要为橄榄石，次为辉石，少量角闪石。此类矿石属硫化铜镍型。

3 样品采集和分析方法

为了研究高家村杂岩体铂族元素地球化学特征，厘清高家村杂岩体铜镍矿的成矿地质条件，本次研究工作共采集样品31件，所有样品经过手标本和显微镜观察后，挑选出无蚀变或蚀变甚弱的样品。

Cu、Ni、S元素采用日本理学Primus II X射线荧光光谱仪(XRF)分析。铂族元素通过电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测量PGE。精确称量3g镁铁质样品或2g超镁铁质样品，并将其放入200ml可重复使用的卡洛斯管中，向每个样品中加入适量的同位素稀释剂。样品在220℃下用20ml逆王水消化约24h。冷却后，将溶液转移到100ml烧杯中，蒸发至干以去除HNO₃。将残余物用40ml的3mol/L盐酸溶解，并转移到50ml试管中。按照Qi等^[9-10]描述的程序，用该溶液通过Te共沉淀预浓缩PGE。测试过程中用标准样品WGB-1及UMT-1来监测数据的准确性，数据结果RSD优于5%，具体测试方法参考相关文献^[9-10]。

4 铂族元素特征

全岩PGE和Ni、Cu、S含量分析结果见表1。全岩的S含量总体较低(平均为0.18%，部分样品低于0.016%)，这与岩石中硫化物肉眼不可见的现象一致；仅有ZK3501-23、ZK3501-25岩石样品以及ZK3501-26矿石样品中S含量高于0.5%(最高2.61%)，可以见到较多的硫化物，如黄铁矿、镍黄铁矿、磁黄铁矿等。对高于0.5%的3个样品，采用100%硫化物换算后进行比较^[11]。

高家村杂岩体的PGE相对于Cu、Ni强烈亏损，矿石和含硫化物较多的岩石 $w(\text{Ni})$ 和 $w(\text{PGE})$ 高于其他样品。铂族元素含量总和 $w(\Sigma\text{PGE})$ 均较低($w(\Sigma\text{PGE})=0.32\times 10^{-9}\sim 16.39\times 10^{-9}$ ，平均 10.45×10^{-9})，相对于原始地幔值($w(\Sigma\text{PGE})=23.5\times 10^{-9}$ ^[2])明显偏低。橄长岩、橄榄辉长岩的 $w(\Sigma\text{PGE})$ 及 $w(\text{Ni})$ 明显低于矿石、纯橄岩、单辉橄岩、斜方辉石橄岩及角闪橄岩。铂族元素原始地幔标准化配分曲线(图5)整体呈左倾Pt-Pd配分型式，PPGE(Pt, Pd)相对富集，IPGE(Ir, Os, Ru, Rh)含量较低，PPGE含量明显高于IPGE， $w(\text{IPGE})/w(\text{PPGE})=0.14\sim 0.73$ ，平均值为0.31(表1、图5)，这与PPGE与IPGE在地幔部分熔融时的相容性差异

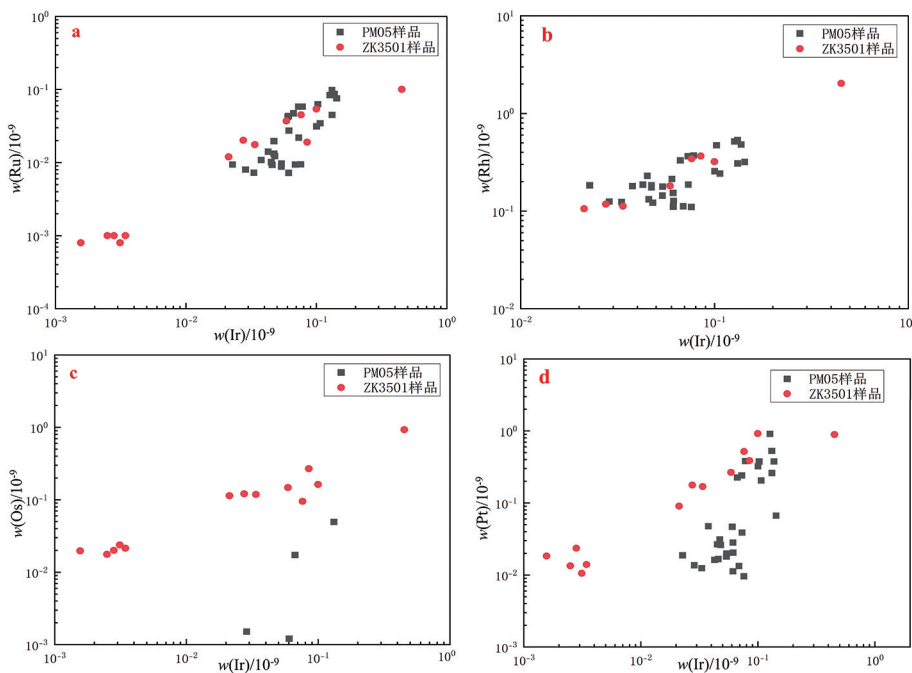


图4 高家村杂岩体岩石 Ir-Ru、Ir-Rh、Ir-Os、Ir-Pt 相关图

Fig. 4 Ir-Ru, Ir-Rh, Ir-Os, Ir-Pt correlation diagram of the complex
红色圆点数据据文献^[13]

表 1 高家村杂岩体岩石铂族元素分析结果

Table 1 PGE analysis of the complex

样品编号	岩性	Os	Ir	Rh	Ru	Pt	Pd	Ni	Cu	S	w (ΣPGE)	w(IPGE)/ w(PPGE)	w(Pt+ Pd)/ w(Os+ Ir+Ru)	w(Pt)/ w(Pt+ Pd)	w(Pt)/w(Ni)/ w(Pt)*w(Cu)	w(Pd)/ w(Ir)	w(Pd)/ w(Pt)	w(Cu)/ w(Pd) (×10 ³)	w(Ni)/ w(Pd) (×10 ³)		
ZK-23 *	单斜橄榄岩	0.323	0.244	0.309	0.225	3.687	3.369	700	40.3	0.824	8.160	0.16	8.91	0.52	4.23	17.37	13.81	0.91	11.96	207.78	
ZK-25 *		0.502	0.189	0.163	0.186	1.888	1.483	711	52	2.61	4.410	0.31	3.84	0.56	3.59	13.67	7.85	0.79	35.06	479.43	
ZK-32		0.411	0.088	0.106	0.101	1.255	0.867	622	23.6	0.114	2.830	0.33	3.54	0.59	4.24	26.36	9.85	0.69	27.22	717.42	
ZK-24	单斜橄榄岩 (矿)	0.911	0.272	0.330	0.095	2.752	1.297	1944	808	0.054	5.660	0.40	3.17	0.68	7.84	2.41	4.77	0.47	622.98	1498.84	
ZK-26 *		3.152	1.445	1.828	0.503	6.318	3.145	4351	1717	1.81	16.390	0.73	1.86	0.67	5.02	2.53	2.18	0.5	545.95	1383.47	
ZK-34	纯橄榄岩	0.555	0.320	0.289	0.270	6.539	3.518	820	54.5	0.037	11.490	0.14	8.78	0.65	6.71	15.05	10.99	0.54	15.49	233.09	
ZK-39		0.402	0.108	0.101	0.088	1.196	1.028	631	23.4	0.316	2.920	0.31	3.72	0.54	3.98	26.97	9.52	0.86	22.76	613.81	
PM-H1	角闪辉长岩	0.147	0.119	0.047	0.118	7.525	40.5	52.5	0.085	0.430				0.02	0.2	0.77	51.31	63.83	6.98	5.38	
PM-H2		0.243	0.099	0.047	0.068	1.588	69.7	41.4	0.048	0.457				0.04	0.25	1.68	6.54	23.33	26.07	43.89	
PM-H3		0.221	0.101	0.047	0.095	1.859	83.6	57.2	0.095	0.463				0.05	0.32	1.46	8.41	19.67	30.78	44.98	
PM-H22	角闪橄榄岩	0.168227	0.421	0.481	0.491	3.754	6.342	968	19.7	0.027	5.316	0.15	9.34	0.37	2.13	49.14	15.06	1.69	3.11	152.63	
PM-H23		0.439	0.432	0.435	2.673	4.797	920	17.9	<0.010	3.979				0.36	1.85	51.4	10.92	1.79	3.73	191.77	
PM-H24		0.406	0.464	0.419	6.449	2.333	893	26.5	0.032	7.738				0.73	6.52	33.7	5.75	0.36	11.36	382.73	
PM-H25		0.058737	0.213	0.297	0.236	1.605	3.493	932	39.3	0.016	2.411	0.16	10.03	0.31	1.77	23.72	16.37	2.18	11.25	266.79	
PM-H4		0.196	0.100	0.036	0.080	1.257	75.7	40.3	0.105	0.412				0.06	0.37	1.88	6.41	15.74	32.05	60.21	
PM-H5	橄榄辉长岩	0.342	0.218	0.172	1.456	2.521	109	34.7	0.07	2.188				0.37	2.21	3.14	7.38	1.73	13.76	43.24	
PM-H6		0.196	0.138	0.216	0.200	1.745	172	49	0.066	0.750				0.1	0.32	3.51	8.91	8.74	28.08	98.57	
PM-H7		0.172	0.129	0.044	0.128	4.775	116	34.6	0.075	0.474				0.03	0.28	3.35	27.68	37.35	7.25	24.29	
PM-H8		0.235	0.168	0.110	0.275	2.612	136	21.4	0.035	0.787				0.1	0.51	6.36	11.13	9.5	8.19	52.06	
ZK-45		0.387	0.068	0.095	0.060	0.641	1.349	493	159	<0.010	2.600	0.31	3.86	0.32	2.25	3.1	19.84	2.1	117.87	365.46	
PM-H9		0.321	0.230	0.156	2.283	3.172	137	46.8	0.067	2.990				0.42	3.24	2.93	9.89	1.39	14.75	43.19	
PM-H10		橄榄苏长 辉长岩	0.422	0.277	0.225	1.849	4.360	135	50.3	0.052	2.773				0.3	1.87	2.68	10.33	2.36	11.54	30.97
PM-H11			0.154	0.110	0.062	0.185	2.377	121	26.5	0.038	0.510				0.07	0.48	4.57	15.46	12.85	11.15	50.91
PM-H12	0.197	0.115	0.137	0.145	2.829	111	31.8	<0.010	0.593				0.05	0.23	3.49	14.36	19.54	11.24	39.24		
PM-H29	橄榄苏长 辉长岩	0.173	0.160	0.049	0.141	3.893	57.8	92.2	0.071	0.523				0.04	0.33	0.63	22.52	27.55	23.69	14.85	
PM-H30		0.151	0.157	0.098	0.221	2.040	57.4	155	<0.010	0.628				0.1	0.49	0.37	13.47	9.22	75.99	28.14	
PM-H31		0.121	0.162	0.054	0.337	2.893	107	41.9	<0.010	0.674				0.1	0.85	2.55	23.96	8.58	14.48	36.98	
PM-H19	斜辉橄榄岩	0.233	0.328	0.291	1.706	3.449	805	42.3	0.053	2.558				0.33	1.7	19.03	14.79	2.02	12.26	233.37	
PM-H20		0.328	0.425	0.314	2.665	7.618	892	23.1	0.041	3.732				0.26	1.72	38.61	23.22	2.86	3.03	117.09	
PM-H13	橄榄辉岩	0.250	0.334	0.292	2.716	7.138	813	53.4	0.067	3.591					15.22	28.55	2.63	7.48	113.89		
PM-H26	辉长岩	0.144	0.206	0.051	0.189	2.417	70.2	82.3	0.413	0.590				0.07	0.54	0.85	16.75	12.77	34.05	29.04	
PM-H27		0.151	0.165	0.066	0.196	2.820	55.2	33.1	0.066	0.579				0.07	0.45	1.67	18.63	14.38	11.74	19.58	
PM-H28		0.458	0.286	0.379	0.473	2.177	48.9	55.3	0.045	1.597				0.18	0.52	0.88	4.75	4.6	25.4	22.46	
ZK-1		橄长岩	0.081	0.010	0.015	0.004	0.075	0.137	138	17.3	<0.010	0.320	0.52	2.23	0.35	3.2	7.98	13.7	1.83	126.28	1007.3
ZK-15			0.067	0.005	0.010	0.004	0.130	0.173	203	26.3	<0.010	0.390	0.28	3.99	0.43	4.94	7.72	34.6	1.33	152.02	1173.41
ZK-16	0.068		0.009	0.021	0.005	0.167	0.183	225	17.1	<0.010	0.450	0.29	4.27	0.48	5.52	13.16	20.33	1.1	93.44	1229.51	
ZK-18	0.06		0.008	0.011	0.005	0.095	0.164	136	13.9	<0.010	0.340	0.32	3.55	0.37	3.32	9.78	20.5	1.73	84.76	829.27	
ZK-21	0.073		0.011	0.011	0.005	0.099	0.173	240	24.9	0.05	0.370	0.37	3.06	0.36	3.37	1.64	15.73	1.75	143.93	1387.28	
PM-H14	0.106		0.111	0.036	0.088	3.007	91.3	48.4	0.067	0.342				0.03	0.27	1.89	28.31	34.03	16.1	30.36	
PM-H15	0.004103		0.193	0.192	0.212	0.332	3.083	108	44.5	0.079	0.933	0.18	8.35	0.1	0.41	2.43	15.97	9.3	14.43	35.03	
PM-H16	0.005128		0.092	0.113	0.040	0.097	1.064	96.4	47.5	0.098	0.346	0.22	8.48	0.08	0.47	2.03	11.61	11.01	44.65	90.61	
PM-H17	0.137	0.168	0.070	0.115	1.670	87.1	45	0.129	0.490				0.06	0.33	1.94	12.22	14.54	26.95	52.17		
PM-H18	0.073	0.165	0.047	0.133	1.974	80.7	47.9	0.118	0.418				0.06	0.44	1.68	27.14	14.83	24.27	40.89		

注:量单位:w_B/10⁻⁹;w(S)/%;w(Ni,Cu)/10⁻⁶;PM代表PM05,ZK代表ZK3501;“*”代表该样品S含量>0.5%,并经过100%硫化物换算,换算过程参考文献[11];ZK3501的数据据文献[13],PM05样品由广州市拓岩检测技术有限公司测试;w(Pt)*=w(Pt)N/ $\sqrt{(w(Pt)_N \times w(Pd)_N)}$,标准化数据引自文献[12]。

有关,IPGE 趋于相容,而 PPGE 趋于不相容,明显的差异说明岩浆深部演化比较充分。除部分地表剖面的样品受风化作用影响外,其他样品全岩 Ir 与 Os、Ru、Rh、Pt 具有良好的正相关性(图

4),同样 Pt 与 Pd 也表现出良好的正相关(表 1),说明 PGE 在岩浆演化过程中具有相似的地球化学行为,同时表明 PGE 与硫化物之间强烈的相容性。

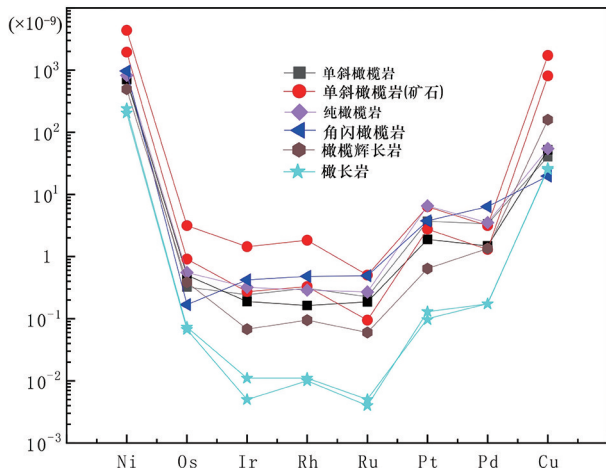


图5 高家村杂岩体 PGE 原始地幔标准化配分模式

Fig. 5 Primitive mantle-normalized diagram of PGE of the complex

原始地幔值据文献[12], $w_B/10^{-9}$, $w(Ni, Cu)/10^{-6}$

5 讨论

5.1 岩浆源区特征

Barnes 等^[2-3]研究表明,部分熔融程度高的科马提岩中 $w(Ni)/w(Cu) = 20.3$, $w(Pd)/w(Ir) = 5.9$; 部分熔融程度较低的苦橄岩中 $w(Ni)/w(Cu) = 5.79$, $w(Pd)/w(Ir) = 12.6$; 部分熔融程度低的拉斑玄武岩中 $w(Ni)/w(Cu) = 1.1$, $w(Pd)/w(Ir) = 47$, 在岩浆分异过程中, $w(Ni)/w(Cu)$ 和 $w(Pd)/w(Ir)$ 受结晶分异的影响较小, 所以可以根据两个比值之间的关系来确定原始岩浆的性质。高家村岩体 $w(Ni)/w(Cu) = 0.37 \sim 51.4$, $w(Pd)/w(Ir) = 2.18 \sim 51.31$, 根据 Ni/Cu—Pd/Ir 图(图

6a)可知,高家村岩体为高镁玄武质岩浆岩。而 Cu/Ir—Ni/Pd/图(图 6b)则显示高家村岩体落入层状侵入体内,这主要是因为 Ir、Pd 和 Cu、Ni 的分配系数相差两个数量级^[14],使得岩浆后期随着硫化物的熔离, Ir、Pd 比 Cu、Ni 更易进入硫化物,从而表现为 $w(Cu)/w(Ir)$ 和 $w(Ni)/w(Pd)$ 变高的现象。其次,可以利用 $w(Pt+Pd)/w(Os+Ir+Ru)$ 值和 $w(Pt)/w(Pt+Pd)$ 值来表征研究岩浆的来源和特征,一般情况下,玄武质岩浆型的铜镍矿床中 $w(Pt+Pd)/w(Os+Ir+Ru) = 5.7 \sim 55.6$, $w(Pt)/w(Pt+Pd) \approx 0.2$ ^[15],高家村岩体的 $w(Pt+Pd)/w(Os+Ir+Ru) = 1.86 \sim 10.03$, 平均值为 5.35, $w(Pt)/w(Pt+Pd) = 0.02 \sim 0.73$, 平均值为 0.27, 可以看出高家村岩体与玄武质岩浆比较接近,同时刘益^[13]推测出高家村原始岩浆 $w(MgO) = 11.54\%$ 。综上,说明高家村岩体原始岩浆为高镁玄武质岩浆。

5.2 部分熔融与热液蚀变

一般来讲,由于 IPGE 和 PPGE 的相容性存在差异,在地幔部分熔融的过程中,IPGE 相对来说为相容元素,而 PPGE 相对来说为不相容元素。这种差异使得岩浆部分熔融程度越低,则 $w(Pd)/w(Ir)$ 值越大,相反则 $w(Pd)/w(Ir)$ 值越小,地幔部分熔融程度越高, $w(Pd)/w(Ir)$ 值越靠近原始地幔比值^[2]。高家村岩体岩石的 $w(Ir) = 0.005 \times 10^{-9} \sim 1.44 \times 10^{-9}$, $w(Pd)/w(Ir) = 2.18 \sim 51.31$, 平均值为 15.62, 高于原始地幔值(1.22), 说明高家村原始岩浆部分熔融程度较低。由于岩浆体系中矿物熔离作用对 $w(Ni)/w(Cu)$ 值影响较小^[16], 所以 $w(Ni)/w(Cu)$ 也能反映部分熔融的程度^[2], 部分熔融程度越高, $w(Ni)/w(Cu)$ 值越大,反之则越小,高家村的 $w(Ni)/w(Cu) = 0.37 \sim 51.4$, 平均值为 10.22, 也

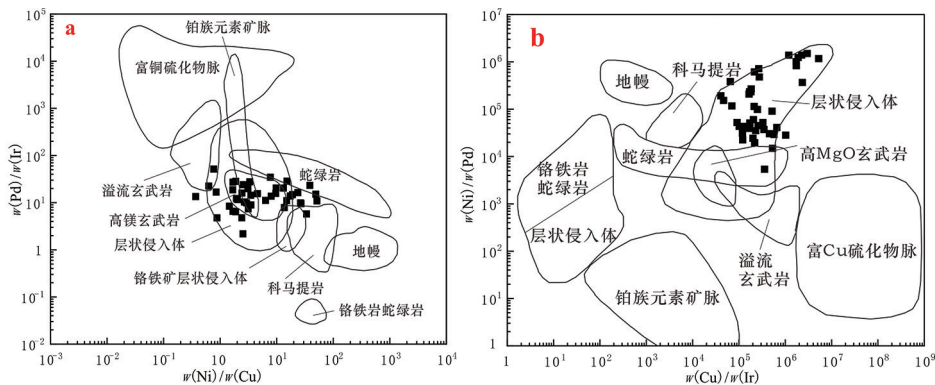


图6 高家村杂岩体 Ni/Cu—Pd/Ir (a) 和 Cu/Ir—Ni/Pd (b) 图

Fig. 6 Ni/Cu-Pd/Ir(a) and Cu/Ir-Ni/Pd (b) diagram of the complex

说明高家村岩体部分熔融程度较低。

牛耀龄^[17]根据实验结果推导出残余固相中 $w(\text{MgO})$ 与地幔熔融程度有如下关系: $F=0.03249 \times w(\text{MgO})$ 残余-1.234;之后陶琰等在这个公式的基础上推导出原始溶体中 $w(\text{MgO})$ 与部分熔融程度的关系: $F=0.03249 \times w(\text{MgO})$ 熔体-0.234。根据刘益对高家村原始岩浆的成分估算结果 ($w(\text{MgO})=11.54\%$, $w(\text{FeO})=12.41\%$) 推算高家村岩体的原始岩浆部分熔融的程度为 14.1%,也显示高家村岩体部分熔融程度较低。

由于热液蚀变会使 Pd 和 Ir 产生分馏^[18],造成热液硫化物矿床具有低 $w(\text{Ir})$ 和高 $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})$ 值,而岩浆硫化物矿床则有高 $w(\text{Ir})$ 和低 $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})$ 值,高家村的样品显示了岩浆硫化物矿床的特征。同时所有样品 $w(\text{Ir})$ 和其他 $w(\text{PGE})$ 具有较好的线性关系,说明 PGE 在演化过程中具有相似性,热液蚀变作用对 PGE 的影响较小。

5.3 硫化物熔离

在硫化物中 Pd 是强相容元素,而 Cu 则相对很小,两者在硫化物/硅酸盐中的分配系数相差很大 ($w(\text{Pd})=7000$ ^[19], $w(\text{Cu})=1383$)。在岩浆演化过程中,硫化物的熔离将使得岩浆中 $w(\text{Pd})$ 相对于 $w(\text{Cu})$ 变少, $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$ 值将大于原始地幔值;相反,如果岩浆中硫不饱和,则硫化物不会发生融离,岩浆中 $w(\text{Pd})$ 相对于 $w(\text{Cu})$ 变大, $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$ 值将小于原始地幔值。高家村岩体 $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})=3.03\sim 622.98$,平均值为 59.66,可见高家村岩体 $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$ 值较宽泛,平均值大于原始地幔 $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$ (6500),推测高家村岩体经历过深部的硫化物的熔离,之后剩余岩浆继续上升到浅部形成现在的高家村岩体。根据 Pt/Pt*—Pd/Ir 图解(图 7)也可以得出这样的结论,如图所示岩浆演化趋势近于水平,与结晶分异和部分熔融均呈一定角度,说明硫化物早期受到熔离作用,之后侵位并发生结晶分异。

导致玄武质岩浆硫化物熔离的原因可能是幔源深部岩浆的交代作用,使得幔源岩浆中的 S 达到饱和而产生熔离;其次,岩浆中 SiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 的加入和 FeO 的减少会导致硫化物溶解度的降低;最后,氧逸度的增加和硫逸度的降低也会导致硫化物溶解度降低,表明硫化物的熔离与地壳物质的混染有密切关系^[20]。刘益经过野外调查、Sr-Nd 同位素及其他地球化学的研究认为,高家村岩体的地壳混染程度较

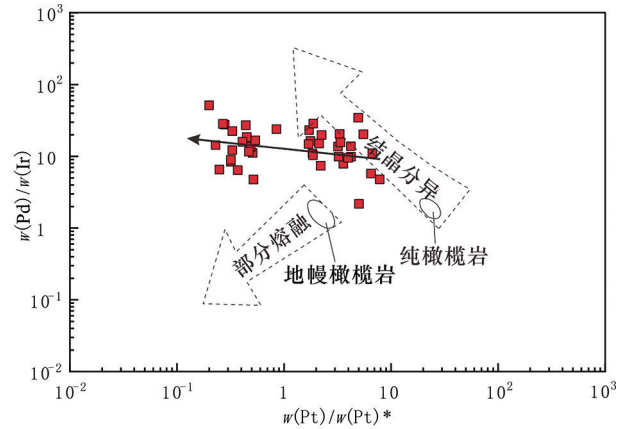


图 7 高家村杂岩体 $w(\text{Pt})/w(\text{Pt})^* - w(\text{Pd})/w(\text{Ir})$ 图解

Fig. 7 $w(\text{Pt})/w(\text{Pt})^* - w(\text{Pd})/w(\text{Ir})$ diagram

of the complex

结晶分异和部分熔融趋势引自文献[21]

低,硫化物融离主要是因为地幔交代引起的^[13]。

6 结语

(1) 高家村杂岩体的 $w(\text{Ni})/w(\text{Cu})=0.37\sim 51.4$, $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})=2.18\sim 51.31$, $w(\text{Pt}+\text{Pd})/w(\text{Os}+\text{Ir}+\text{Ru})=1.86\sim 10.03$,平均值为 5.35, $w(\text{Pt})/w(\text{Pt}+\text{Pd})=0.02\sim 0.73$,平均值为 0.27,同时推测高家村原始岩浆 $w(\text{MgO})=11.54\%$,说明高家村岩体原始岩浆为高镁玄武质岩浆。

(2) 高家村岩体岩石的 $w(\text{Ir})=0.005 \times 10^{-9} \sim 1.44 \times 10^{-9}$, $w(\text{Pd})/w(\text{Ir})=2.18\sim 51.31$,平均值为 15.62,高于原始地幔值(1.22);同时高家村的 $w(\text{Ni})/w(\text{Cu})=0.37\sim 51.4$,平均值为 10.22,说明高家村岩体部分熔融程度较低。高家村的样品显示 Ir 和其他 PGE 具有较好的线性关系,说明 PGE 在演化过程中具有相似性,热液蚀变作用对 PGE 的影响较小。

(3) 高家村岩体 $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})=3.03\sim 622.98$,平均值为 59.66×10^3 ,可见高家村岩体 $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$ 值较宽泛,平均值大于原始地幔 $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$ 值,推测高家村岩体经历过深部的硫化物的熔离,之后剩余岩浆继续上升到浅部形成现在的高家村岩体。

(4) 高家村原始岩浆部分熔融程度低,硫化物大部分被残留在地幔之中,但已经熔融的硫化物可能很大部分都进入了硅酸盐岩浆中,由于高家村岩体铂族元素整体相对地幔亏损,说明在岩体深部可能

存在硫化物熔离,有成矿的可能。但同时高家村的地壳混染程度较低,不利于硫化物饱和,也使得高家村岩体成矿受到限制。

注释:

- ① 四川省冶金地质勘查局六〇一大队. 云南省华坪县南阳铜镍矿详查报告(内部资料),2019.

参考文献:

- [1] 苏尚国,沈存利,等. 铂族元素的地球化学行为及全球主要铂族金属矿床类型[J]. 现代地质,2007,21(2):361-370.
- [2] Barnes S J, Maier W D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids. In *Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and their application in mineral exploration*. Editsd par Keays R R, Leshner C M, Lightfoot P C *et al.*, Farrow C E G. Geological Association of Canada, Short Course 1999(13), 69-106.
- [3] BARNES S J, COX R A, ZIENTEK M L. Platinum group Element, Gold, Silver and Base Metal Distribution in Compositionally Zoned Sulfide Droplets from The Medvezky Creek Mine, Noril'sk, Russia[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 152(2): 187-200.
- [4] 王焰,魏博,陈晨,等. 镁铁-超镁铁质岩浆中铂族元素的富集机理:综述与实例[J]. 地质学报,2023,97(11):3622-3636.
- [5] 沈渭洲,高剑峰,徐士进,等. 四川石棉蛇绿岩的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质论评,2003a,49(1):17-27.
- [6] 杜利林,郭敬辉,耿元生,等. 扬子西南缘盐边群时代及构造环境:来自碎屑沉积岩的约束[J]. 岩石学报,2013,29(2):641-672.
- [7] Du L L, Guo J H, Nutman A P, *et al.* Implications for Rodinia reconstructions for the initiation of Neoproterozoic subduction at ~860 Ma on the western margin of the Yangtze Block: Evidence from the Guandaoshan Pluton[J]. *Lithos*, 2014, 196-197: 67-82.
- [8] 朱维光,邓海琳,等. 四川盐边高家村镁铁-超镁铁质杂岩体的形成时代:单颗粒锆石 U-Pb 和角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学制约[J]. 中国地质,2004,49(10):985-992.
- [9] Qi L, Gao J F, Huang X W, *et al.* An improved digestion technique for determination of platinum group elements in geological samples[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2011, 26(9): 1900-1904.
- [10] Qi L, Gao J F, Zhou M F, *et al.* The design of re-usable Carius tubes for the determination of Rhenium and Osmium and platinum group elements in geological samples[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2013, 37: 345-351.
- [11] Barnes S J and Lightfoot P. The formation of magmatic nickel-copper-PGE sulfide deposits[J]. *Economic Geology*, 2005, (190): 135-154.
- [12] Mc Donough W F, Sun S S. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120: 223-253.
- [13] 刘益. 扬子地块西缘高家村杂岩体岩石成因与成矿潜力研究[D]. 中国地质大学(北京), 2018.
- [14] Fleet M E, Crocket J H, Liu M H, *et al.* Laboratory partitioning of platinum-group elements (PGE) and gold with application to magmatic sulfide-PGE deposits[J]. *Lithos*, 1999, 47: 127-142.
- [15] NALDRETT A J. Nickel sulfide deposits: classification, composition and genesis[J]. *Economic Geology*, 1981, 75(2): 628-655.
- [16] 唐冬梅,秦克章,孙赫,等. 东疆天宇岩浆 Cu-Ni 矿床的铂族元素地球化学特征及其对岩浆演化、硫化物熔离的指示[J]. 地质学报,2009,83(5):680-697.
- [17] Niu Y L. Mantle Melting and Melt Extraction Processes beneath Ocean Ridges: Evidence from Abyssal Peridotites[J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(8): 1047-1074.
- [18] Maier W D, Barnes S J, Deklerk W J. Cu/Pd and Cu/Pt of silicate rocks in the Bushveld complex: Implications for platinum-group element exploration[J]. *Economic Geology*, 1996, 91: 1151-1158.
- [19] FLEET M E, CROCKET J H, STONE W E. Partitioning of Platinum-group Elements (Os, Ir, Ru, Pt, Pd) and Gold Between Sulfide Liquid and Basalt Melt[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(13): 2397-2412.
- [20] 宋谢炎,胡瑞忠,陈列锰. 铜、镍、铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化和岩浆硫化物矿床研究中的意义[J]. 地学前缘,2009,16(4):287-305.
- [21] Garuti G, Fershtater G, Bea F, *et al.* Platinum-group elements as petrological indicators in mafic-ultramafic complexes of the central and southern Urals: Preliminary results[J]. *Tectonic Physics*, 1997, 276: 181-194.

Geological and PGE geochemical characteristics of Gaojiacun complex in Yanbian county, Sichuan province

FU Mingzhu, LING Yajun, LI Jun

(The 4th Geological Brigade of Sichuan Province, Chengdu 611130, Sichuan Province China)

Abstract: Gaojiacun complex is located at section where the NS Chuan (Sichuan province)-Dian (Yunnan province) structural belt and westward extension of EW Nanling structural belt are compounded. Peridotite is the ore-hosted rock. The ore is Cu-Ni-sulfide type. Geochemistry of the complex is that $w(\text{Ni})/w(\text{Cu}) = 0.37 \sim 51.4$, $w(\text{Pd})/w(\text{Ir}) = 2.18 \sim 51.31$, $w(\text{Pt}+\text{pd})/w(\text{Os}+\text{Ir}+\text{Ru}) = 1.86 \sim 10.03$, $w(\text{Pt})/w(\text{Pt}+\text{Pd}) = 0.02 \sim 0.73$ and indicates that the magma is originally high magnisium basaltic magma. $w(\text{Ir})$ value of the complex is $0.005 \times 10^{-9} \sim 1.44 \times 10^{-9}$, $w(\text{Pd})/w(\text{Ir}) = 2.18 \sim 51.31$ (averagely 15.12) higher than that primitive mantle, $w(\text{Ni})/w(\text{Cu}) = 0.37 \sim 51.4$ (averagely 10.22) indicate poor patial melting of the complex. $w(\text{Cu})/w(\text{Pd}) = 3.03 \sim 622.98$ (averagely 59.66), higher than $w(\text{Cu})/w(\text{Pd})$ of the pritive mantle suggesting deep sulfide melting partition of the magma then the remainder magma upward to be the complex.

Key Words: Gaojiacun complex; PGE; geochemical characteristics; Yanbian county