

白云岩和石英岩型铂族矿床中铂钯金的相态分析

闫红岭, 连文莉, 来新泽, 王 琳*, 郭家凡, 刘春霞
(河南省岩石矿物测试中心 国土资源部贵金属分析重点实验室, 郑州 450012)

摘 要: 以四川大岩子铂钯矿为研究对象, 在岩矿鉴定的基础上, 将白云岩、石英岩型铂族矿床中铂、钯和金的赋存状态划分为碳酸盐赋存相、硫化物赋存相、金属互化物相和残渣相。研究制定了各相态的浸取剂及浸取条件, 并采用 ICP-MS 测定各相态中铂、钯和金的含量。结果表明, 各元素各相态浸取量之和与样品各元素的总量之比分别为: 铂 94.3%~96.8%、钯 99.9%~108%、金 91.0%~99.1%; 矿物中铂、钯和金主要分布在硫化物赋存相、金属互化物相中。

关键词: 分析化学; 相态分析; 铂; 钯; 金; ICP-MS

中图分类号: O658.6, O655.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2016)01-0056-07

Phase Analysis of Pt, Pd and Au in Dolomite and Quartzite Type PGE Deposits

YAN Hongling, LIAN Wenli, LAI Xinze, WANG Lin*, GUO Jiafan, LIU Chunxia
(Ministry of Land and Resources Key Laboratory of Precious Metals Analysis Technology,
Henan Province Rock & Mineral Testing Centre, Zhengzhou 450012, China)

Abstract: The occurrence states of gold, platinum and palladium in Sichuan Dayanzi platinum-palladium in pyroxenite are described. Based on the information of mineral identification, the occurrence states of gold, platinum and palladium in minerals of dolomite and quartzite type PGE deposits are divided into carbonate occurrence phase, sulphide occurrence phase, intermetallic compound(PGE alloy) and residue phase. After establishing the extraction agent and conditions, contents of gold, platinum and palladium in each phase were determine by ICP-MS. The results showed that, the ratios of the extracted aggregates amount sum of Pt, Pd and Au in each phase to their total contents of each element are 94.3%~96.8%, 99.9%~108% and 91.0%~99.1%, respectively. The sulfide state and PGE alloy state are the major states of platinum, palladium and gold in the occurrence.

Key words: analytical chemistry; phase analysis; Pt; Pd; Au; ICP-MS

我国铂族矿床主要有岩浆成因、岩浆热液成因和沉积成因三大类^[1]。从岩石学、矿物学和地球化学的研究结果可知, 铂族元素及其组成矿物在不同岩石类型和不同成因矿床中, 其含量和矿物种类有着明显的差异。铂族元素矿物颗粒很细, 成分组合复杂, 很难选出单矿物作物相分析, 因此对铂族矿物的相态分析只能从其赋存的矿物相进行研究。

目前主要从岩矿鉴定的角度来研究各类矿床中

铂族元素存在的形式^[2-6]。成杭新^[7-8]在四川大岩子矿区通过对指示元素全量分析进行原生晕的测量, 对铂钯盲矿进行预测。这些方法只能探明铂族元素的赋存状态、矿床成因、预测盲矿。我国铂族元素矿床较为贫乏, 提高铂族元素的回收率、寻找隐伏的铂族矿床将会成为今后地质工作的重点。因此, 从化学相态角度研究铂族元素的赋存状态, 可对定量查明铂族元素在各矿物相的分布、提高综合利用

收稿日期: 2015-09-25

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项基金(201211016-3)。

第一作者: 闫红岭, 男, 高级工程师, 研究方向: 贵金属分析方法研究。E-mail: yhljjh@163.com

*通讯作者: 王 琳, 女, 教授级高工, 研究方向: 贵金属分析方法研究。E-mail: wanglin0630@126.com

率、化探异常评价、深部找矿提供理论依据^[9]。吕娅丽等^[10]采用镍铈试金预富集与中子活化分析相结合的分子活化法测定 6 个化学相态中的铂族金属；来雅文等^[11]用化学逐级溶解进行了各相态的浸取。这些铂族元素的相态划分方式、浸取剂、浸取过程以及测定方法各不相同。

白云岩、石英岩型铂族矿物为典型的岩浆热液成因型的铂族元素矿床，其是在岩浆期后气液流体的热液作用和交代作用所形成的含铂族元素的多金属矿床。该类矿物中铂族元素品位较高、磁性矿物较少，而且铂和钯元素主要以金属互化物形式存在。在前期甘肃铜镍硫化物矿床金铂钯相态分析的工作中^[12]，我们将甘肃铜镍硫化物中金、铂、钯划分为磁性部分(磁黄铁矿相、磁铁矿相、独立矿物相)和非磁性部分(硫化矿相、脉石中类质同象相、独立矿物相)共 6 个相态。

表 1 样品光片岩矿鉴定结果

Tab.1 Identification results of the mineral in sample (polished section)

样号	矿物性质	金属矿物及含量	脉石矿物
LD1	石英岩	蓝铜矿：3%~5%，孔雀石：2%~3%，铜蓝：5%~7%，褐铁矿：2%， 蓝辉铜矿：1%，辉铜矿：1%，赤铁矿、斑铜矿、黄铜矿：微量	石英、绢云母等
PD4	蚀变辉长岩	磁铁矿：5%，孔雀石：3%~5%，黄铜矿：1%，褐铁矿：2%， 赤铁矿、黄铁矿：微量	辉石、长石、绿泥石、滑石等
BYY4	破碎白云岩		白云岩、方解石、石灰石等

1.2 主要试剂、仪器设备

铂、钯和金标准贮存溶液(1.000 mg/mL，5% HNO₃)均采用质量分数不小于 99.99%的金属配制；铂、钯和金标准混合溶液(1.00 μg/mL，5% HNO₃)；Lu 元素内标溶液(10 ng/mL，3% HNO₃)。

乙酸铵、冰乙酸、氯乙酸、HCl、HNO₃、H₂O₂、HAc 等试剂均为分析纯，实验用水为去离子水。

浸取液 I：称取 154.1 g 乙酸铵置于 500 mL 烧杯中，加水搅拌溶解，移入 2000 mL 容量瓶，加 56 mL 冰乙酸，用水稀释至刻度，混匀，转入塑料瓶中保存；浸取液 II：称取 200 g 氯乙酸、40 g 氢氧化钠置于 500 mL 烧杯中，加水搅拌溶解，移入 1000 mL 容量瓶，用水稀释至刻度，混匀，转入塑料瓶中保存；浸取液 III：王水(HCl:HNO₃=3:1)，用时现配(配制不同浓度的王水时以水稀释)。

所用设备及仪器工作条件与文献^[13]相同。

本文研究了顺序浸取法分别浸取碳酸盐赋存相、硫化物赋存相和金属互化物相，用 ICP-MS 法测定各相态中铂、钯和金。建立了白云岩、石英岩等非磁性矿物的相态分析方法。

1 实验部分

1.1 样品的采集及岩矿鉴定结果

采集四川会理大岩子铂钯矿老硐 IV 号矿体(LD1)、标高 2097 m，大岩子平硐 III 号矿体(PD4)、标高 2034 m，大岩子铁质超基性岩(BYY4)，采用气流粉碎机将样品破碎至 200 目，利用犁刀式混合机充分混匀，储存于塑料瓶中备用。原矿经光、薄片等岩矿鉴定分析，得到矿物成份及目估含量，列于表 1。

1.3 铂、钯和金的测定

称取试样 10~20 g，精确至 0.1g，按文献^[13]方法进行锡试金富集—ICP-MS 测定样品中全量铂、钯和金。按文献^[12]方法用 ICP-MS 测定各相溶液中的铂、钯和金。

1.4 相态分析实验

1.4.1 相态分析流程

由岩矿鉴定的结果可知，该类矿物的主要矿物有孔雀石、蓝铜矿，脉石矿物为白云岩、方解石、石英、辉石，铂钯矿物可能与硫化物伴生和金属互化物的形式存在，因此，将该类矿物中铂、钯和金的赋存状态划分为：碳酸盐赋存相、硫化物赋存相、金属互化物相、残渣相。根据各矿物相的性质、常用的浸取剂及铂、钯和金的物化特性，确定适合的浸取试剂和工艺流程，如图 1 所示。

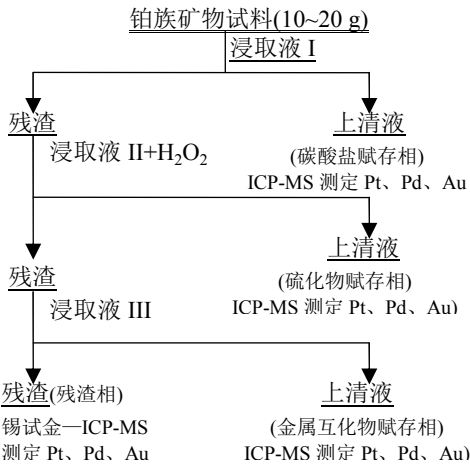


图 1 相态分析流程图

Fig.1 The flowchart of phase analysis

1.4.2 碳酸盐赋存相中铂、钯和金的分析

准确称取 20.0 g 碎至 200 目的矿石样品于 250 mL 塑料离心杯中，加入 100 mL 浸取液 I，充分搅匀，置于 35℃ 恒温水浴中振荡 4 h，取下，于离心机上 4000 r/min 离心 20 min。上清液置于 250 mL 锥形瓶中。残渣水洗，于离心机上 4000 r/min 离心 10 min，弃去水相，残渣备用。

上清液中加入 20 mL 王水置于电热板加热煮沸，取下，冷却，转入 100 mL 容量瓶中，稀释 10 倍(降低过高盐度对仪器测定准确度的影响)。用 ICP-MS 测定铂、钯和金含量。

1.4.3 硫化物赋存相中铂、钯和金的分析

向残渣(1.4.2)中加入 60 mL 浸取液 II，充分搅匀，置于 90℃ 恒温水浴中振荡 6 h，振荡过程中，每 5 min 加入 1 mL H₂O₂，共加入 40 mL H₂O₂。以下处理及测定同 1.4.2，残渣备用。

1.4.4 金属互化物相中铂、钯和金的分析

向残渣(1.4.3)中加入 100 mL 浸取液 III，充分搅匀，置于 95℃ 恒温水浴锅中振荡 2 h，取下，于离心机上 4000 r/min 离心 20 min。以下处理及测定同 1.4.2，保留残渣。

1.4.5 残渣相中铂、钯和金的分析

将残渣(1.4.4)于 105℃ 烘干，研磨，全部倒入试金坩埚。采用锡试金分离富集—ICP-MS 测定残渣相中的铂、钯和金。

2 结果与讨论

2.1 碳酸盐赋存相浸取条件

2.1.1 浸取剂的选择

文献^[9]介绍了多种碳酸盐浸取剂。因 1 mol/L 盐酸对金属钯有一定的溶解能力，不适合铂族元素碳酸盐赋存相的浸取，本法采用乙酸铵浸取。

2.1.2 浸取剂浓度、温度和时间对浸取率的影响

分别取 20 g LD1 样品进行浸取剂浓度、浸取温度、浸取时间试验，结果如表 2~4 所示。

表 2 乙酸铵浓度对铂、钯和金浸取量的影响

Tab.2 Effect of NH₄Ac concentration on extraction of Pt, Pd, Au

乙酸铵浓度/(mol/L)	浸取量/(ng/g)		
	Pt	Pd	Au
0.50	67.2	124	4.7
0.75	142	158	4.2
1.00	375	212	4.3
1.50	309	238	1.9
2.00	276	262	1.2

表 3 浸取温度对铂、钯和金浸取量的影响

Tab.3 Effect of leaching temperature on extraction of Pt, Pd, Au

浸取温度/℃	浸取量/(ng/g)		
	Pt	Pd	Au
30	411	187	2.8
50	395	216	2.9
70	286	229	2.2
90	307	244	3

表 4 浸取时间对铂、钯和金浸取量的影响

Tab.4 Effect of leaching time on extraction of Pt, Pd, Au

浸取时间/h	浸取量/(ng/g)		
	Pt	Pd	Au
2	375	217	3.6
4	418	235	4.3
6	404	238	4.6
8	415	240	3.8

综合表 2~4 的结果，碳酸盐赋存相最佳浸取条件为 100 mL 1.0 mol/L 乙酸铵溶液，在 35℃ 恒温水浴中振荡 4 h。

2.2 硫化物赋存相浸取条件

对文献^[9]介绍的硫化物相浸取剂进行了试验，冰乙酸-柠檬酸-过氧化氢和单独使用过氧化氢对硫化物中赋存的贵金属元素溶解能力较弱；溴-乙醇(5+95)在浸取硫化物赋存相的同时部分金属矿物会同时浸取而造成串相。最终采用氯乙酸缓冲溶液-过氧化氢浸取白云岩、石英岩等非磁性矿物中硫化物赋存相。首先考察了氯乙酸浓度对浸取量的影响，结果如表 5 所示。

表 5 氯乙酸浓度对对铂、钯和金浸取量的影响

Tab.5 Effect of ClCH₂COOH concentration on extraction of Pt, Pd, Au

氯乙酸浓度/(mol/L)	浸取量/(ng/g)		
	Pt	Pd	Au
1.0	1450	153	169
1.5	3089	1184	348
2.0	3935	1613	411
2.5	2965	1293	285
3.0	2886	1185	325

由表 5 可见，2.0 mol/L 的氯乙酸具有最好的浸取效果。进一步研究了氯乙酸-过氧化氢用量比例对浸取量的影响，结果如表 6 所示。

表 6 氯乙酸(2.0 mol/L)与过氧化氢(30%)用量对铂、钯和金浸取量的影响

Tab.6 Effect of amount of 2.0 mol/L ClCH₂COOH and 30% H₂O₂ on extraction amount of Pt, Pd, Au

氯乙酸 用量/mL	H ₂ O ₂ 用量/mL	浸取量/(ng/g)		
		Pt	Pd	Au
70	20 (+10 mL H ₂ O)	1872	656	39.5
70	30	2730	1016	236
60	40	3924	1479	430
50	50	2664	1153	410

表 6 结果表明，加入 60 mL 2.0 mol/L 氯乙酸、40 mL H₂O₂ 为最佳浸取比例。按照 2.1.2 的方法进行了浸取温度和时间实验，最终选择浸取温度为 95℃，振荡 4 h 为硫化相赋存相的最佳浸取条件。

2.3 金属互化物相浸取条件

按表 7 配比加入不同浸取剂对硫化物相态残渣进行浸取。其中，1[#]和 2[#]实验为 90℃ 振荡浸取 2 h，取上清液测定；3[#]于 250℃ 电热板溶解至小体积，加入盐酸、尿素分解残余硝酸，采用 717 树脂+活性炭减压抽滤、吸附、灰化，10 mL 王水溶解，定容测定。

表 7 浸取剂对铂、钯和金浸取量的影响

Tab.7 Effect of leaching reagent on extraction amount of Pt, Pd, Au

No.	浸取剂	加入量/mL	浸取量/(ng/g)		
			Pt	Pd	Au
1 [#]	50%王水	100	5310	1399	1345
2 [#]	HCl+H ₂ O ₂ +H ₂ O	50+30+20	5270	1438	1043
3 [#]	浓王水	100	5290	1388	1922

铂、钯很少以单质形式存在，从表 7 结果可知，3 种方式浸取铂、钯的结果基本一致。金在矿物中不仅以金属互化物的形式存在，而且存在单质金。用 3[#]浸取方式，在 250℃ 不仅能溶解金属互化物形式的金，单质金也同时被溶解，剩余残渣相中的贵金属也被浸取，导致金属互化物相中金结果偏高；由于金较铂、钯难溶，采用 2[#]浸取方式浸取 Au，浸取率略低于 1[#]浸取方式，因此，选用稀王水进行浸取，考察了不同浓度王水对浸取量的影响，结果如表 8 所示。

表 8 王水浓度对对铂、钯和金浸取量的影响

Tab.8 Effect of aqua regia concentration on extraction of Pt, Pd, Au

王水浓度/%	浸取量/(ng/g)		
	Pt	Pd	Au
40	5045	1331	1150
50	5128	1355	1280
60	4981	1380	1530

综合表 8 结果，考察了浸取温度和时间对浸取量的影响，选定 50%王水在 95℃ 振荡 2 h 作为金属互化物相浸取条件。

2.4 ICP-MS 测定

2.4.1 质谱测定干扰的消除

ICP-MS 测定相态分析中贵金属元素，主要干

扰来自物理干扰、同离子干扰和基体效应^[14]。

1) 物理干扰

采用 Lu 标准溶液(10 ng/mL)作为内标元素来消除物理干扰。

2) 基体效应

基体效应是由浸取贵金属的浸取剂基体较为复

杂、盐类较大而造成。在相态分析中，由于各相态的浸取剂差异较大，每次浸取时，空白都略有差异，因此，该类干扰对贵金属元素测定影响不容忽视。本法通过用各相态对应的试剂空白来稀释待测元素的标准溶液，制作标准曲线，以消除基体效应的影响。各相态的标准工作溶液如表 9 所列。

表 9 各相态的铂、钯和金标准工作溶液

Tab.9 The Pt, Pd and Au standard working solution of each phase			/(ng/mL)
相态	介质	标准工作溶液	
碳酸盐赋存相	0.1 mol/L 乙酸铵	0.0, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0, 50.0	
硫化物赋存相	0.2 mol/L 氯乙酸	0.0, 2.5, 5.0, 10.0, 25.0, 50.0, 100.0, 200.0	
金属互化物相、残渣相	2%王水	0.0, 10.0, 25.0, 50.0, 100.0, 200.0, 400.0	

3) 同离子干扰

同离子干扰是由待测元素的同位素及与待测元素具有相同质荷比的分子碎片引起的。根据文献^[15]提供的参数，¹⁹⁵Pt、¹⁰⁵Pd、¹⁰⁸Pd、¹⁹⁷Au 的灵敏度较高。考虑到贵金属样品中常常存在大量的 Cu，严重干扰 ¹⁰⁵Pd 的测定；样品中 Cd、Mo、Zr 的含量相对较低，通过在线校正方程可直接消除其对 ¹⁰⁸Pd 的干扰，因此，选择 ¹⁹⁵Pt、¹⁰⁸Pd、¹⁹⁷Au 作为测定同位素。在各相态浸取贵金属的同时，大量的基体元素如 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Al³⁺、Fe³⁺、Zn²⁺、Co²⁺、Mn²⁺等同时被浸取，但均不干扰铂、钯和金的测定。

2.4.2 测定回收量率、检出限和精密度

1) 回收率

有关贵金属相态分析，只有金有成熟的物相分析方法，其它元素目前还仅仅处于探索阶段，暂无相应的标准样品以供验证。因此本研究通过加标回收来确定方法的准确度。按此前研究^[12]的方法，在

20 g LD1 样品中分别加入一定量的铂、钯和金标准溶液，按各相态的浸取方法进行加标回收实验。结果表明，铂的加标回收率为 99.4%~104%，钯为 99.2%~103%，金为 98.4%~113%。

2) 检出限和精密度

取铂、钯和金含量相对较低的 PD4 样品，按此前研究^[12]的方法，测定各相态的检出限(3σ)为：铂 0.02~0.13 ng/g、钯 0.10~0.20 ng/g、金 0.18~0.39 ng/g；相对标准偏差(RSD)为：铂 3.09%~16.6%、钯 5.97%~7.69%、金 6.80%~7.82%。均可满足相态分析的要求。

2.5 样品相态分析

2.5.1 样品相态分析结果

采用本方法的相态浸取流程，对四川会理大岩子铂钯矿中石英岩(LD1)、蚀变辉长岩(PD4)、破碎白云岩(BYY4)3 个典型样品进行铂、钯和金相态分析，并进行综合评价。结果列于表 10。

表 10 样品相态分析结果

Tab.10 Analysis results of phase in rock samples								/(ng/g)
元素	样品号	碳酸盐相	硫化物相	金属互化物相	残渣相	总和	全量	(总量/全量)/%
Pt	BYY4	242.0	1494.2	2042.8	521.1	4300	4440	96.8
	PD4	20.0	258.1	823.3	102.1	1203	1269	94.8
	LD1	336.7	2780.1	5739.5	2184.8	11041	11710	94.3
Pd	BYY4	61.8	369.7	904.9	99.4	1436	1330	108
	PD4	250.7	508.3	664.8	67.3	1491	1449	103
	LD1	165.4	1328.9	1626.5	369.0	3490	3494	99.9
Au	BYY4	8.5	238.7	798.0	302.6	1348	1360	99.1
	PD4	16.6	38.6	158.8	44.5	259	284	91.0
	LD1	7.1	287.8	1192.7	269.2	1757	1852	94.9

由表 10 结果可知。各元素各相态浸取之和与样品各元素的总量之比铂为 94.3%~96.8%、钯为 99.9%~108%、金为 91.0%~99.1%。该指标完全满足目前形态及相态分析采用的分量之和与总量之比在 70%~120%的技术要求。说明研究的方法具有较好

的准确性和重现性。

2.5.2 各样品中相态分布

根据样品相态分析的结果，可以得到白云岩和石英岩型铂族矿床中铂、钯和金在各相态中的分布情况，结果列于表 11。

表 11 样品相态分布

Tab.11 Phase distribution in rock samples									/%
元素相态	破碎白云岩(BYY4)			蚀变辉长岩(PD4)			石英岩(LD1)		
	Pt	Pd	Au	Pt	Pd	Au	Pt	Pd	Au
碳酸盐赋存相	5.63	4.31	0.63	1.66	16.81	6.43	3.05	4.74	0.40
硫化物赋存相	34.75	25.75	17.71	21.44	34.09	14.95	25.18	38.08	16.38
金属互化物相	47.51	63.02	59.21	68.41	44.59	61.42	51.98	46.61	67.89
残渣相	12.12	6.92	22.45	8.48	4.51	17.21	19.79	10.57	15.32

从表 11 相态分析的结果可知：

1) 铂、钯和金在硫化物赋存相中的分布远高于碳酸盐赋存相，说明该类铂族矿物中与硫亲合的铂、钯和金远大于亲石的铂、钯和金，而且铂、钯的亲硫性略大于金。

2) 铂、钯主要分布在金属互化物相和硫化物赋存相中，而金主要分布在金属互化物相、硫化物赋存相和残渣相，说明铂、钯除了具有亲硫性，其主要以金属互化物形式存在，独立矿物的比例很少，残渣相中存在的部分可能是由于被硅酸盐包裹而带入，该结论与资料报道一致。该类矿物中金的含量相对较低，其除了主要以金属互化物形式存在，还有 15%左右的金与硫亲合，另外，在自然界中金能够以单质的形式存在，因此，在残渣相中金的分布比例远高于铂、钯。

3) 结合岩矿鉴定的结果，铂、钯和金的含量与金属矿物的含量有明显的相关性。

3 结语

本文采用顺序浸取法分别浸取碳酸盐赋存相、硫化物赋存相和金属互化物相，用 ICP-MS 法测定各相态中铂、钯和金。建立了白云岩、石英岩等非磁性矿物的相态分析方法。得到以下结论：

1) 筛选出各相态使用的浸取剂，对浸取剂浓度、浸取时间和温度进行系统考察，建立了各相态的最佳浸取条件。碳酸盐赋存相：1.0 mol/L 乙酸铵溶液，35℃，4 h；硫化物赋存相：60 mL 2.0 mol/L

氯乙酸，40 mL H₂O₂，95℃，4 h；金属互化物相：50%王水(HCl:HNO₃=3:1)，95℃，2 h。

2) 铂、钯和金的 ICP-MS 测定。以 Lu 为内标元素消除物理干扰；用各相态对应的试剂空白来稀释待测元素的标准溶液制作标准曲线，消除基体效应的影响。结果表明铂、钯和金的加标回收率、检出限和相对标准偏差均可满足相态分析的要求，各元素各相态浸取量之和与样品各元素的总量之比分别为：铂 94.3%~96.8%、钯 99.9%~108%、金 91.0%~99.1%。

3) 各相态中铂、钯和金的分布。对四川大岩子白云岩和石英岩型铂钯矿石的测定结果表明，矿物中铂、钯和金主要分布在硫化物赋存相、金属互化物相中。

本法可定量查明铂、钯和金元素状态的分布，了解元素的亲合性、分散状态、被其他矿物包裹情况，对研究铂族金属元素成矿成因、成矿规律和寻找隐伏矿提供理论依据，并在异常评价、选矿研究、中低品位铂族金属回收及综合利用等工作中发挥实际作用。

参考文献：

[1] 耿林, 翟裕生, 彭润民. 中国铂族元素矿床特征及资源潜力分析[J]. 地质与勘探, 2007, 43(1): 1-7.

GENG L, ZHAI Y S, PENG R M. Characteristics and resource potential of platinum group elements deposit in China[J]. Geology and prospecting, 2007, 43(1): 1-7.

[2] 刘凤山, 王登红. 中国铂族金属矿床找矿方向初探[J].

- 中国区域地质, 2000, 19(4): 434-439.
- LIU F S, WANG D H. Direction in prospecting for platinum-group metal deposits in China[J]. Regional geology of China, 2000, 19(4): 434-439.
- [3] 杨大宏, 刘俊思, 曾祥贵. 四川会理大岩子铂矿成矿地质特征及找矿标志[J]. 四川地质学报, 2005, 25(4): 208-214.
- YANG D H, LIU J S, ZENG X G. Geological features and prospecting criteria for the dayanzi PGE deposit, Huili, Sichuan[J]. Acta geologica Sichuan, 2005, 25(4): 208-214.
- [4] 王登红, 屈文俊, 李纯杰, 等. 四川会理大岩子铂钯矿的地质地球化学特征及找矿前景浅析[J]. 地质论评, 2006, 52(2): 219-223.
- WANG D H, QU W J, LI C J, et al. Geological and geochemical features of the Dayanzi Pt-Pd deposit, Huili, Sichuan and its implication for prospecting[J]. Geological review, 2006, 52(2): 219-223.
- [5] CAWTHORN R G. The platinum group element deposits of the Bushveld Complex in South Africa[J]. Platinum metals review, 2010, 54(4): 205-215.
- [6] 谭娟娟, 朱永峰. 布什维尔德铂族元素矿床: 铂族矿物赋存状态及其成因[J]. 地学前缘, 2009, 16(2), 227-238.
- TAN J J, ZHU Y F. PGE deposits in Bushveld Complex: The occurrence and origin of the platinum group minerals[J]. Earth science frontiers, 2009, 16(2): 227-238.
- [7] 成杭新, 赵传冬, 庄广民, 等. 四川大岩子铂-钯矿床(点)热液成矿的地球化学证据[J]. 地球学报, 2005, 26(4): 337-342.
- CHENG H X, ZHAO C D, ZHUANG G M, et al. Geochemical evidence for hydrothermal mineralization of the Dayanzi Pt-Pd deposit in Huili county, Sichuan province[J]. Acta geoscientica sinica, 2005, 26(4): 337-342.
- [8] 成杭新, 赵传冬, 庄广民, 等. 四川大岩子铂钯矿床的原生地球化学异常特征及盲矿预测[J]. 地质与勘探, 2007, 43(4): 56-60.
- CHENG H X, ZHAO C D, ZHUANG G M, et al. Primary geochemical anomaly and blind ore prospecting in the Dayanzi Pt-Pd deposit, Sichuan province[J]. Geology and prospecting, 2007, 43(4): 56-60.
- [9] 龚美菱. 相态分析与地质找矿[M]. 2 版. 北京: 地质出版社, 2007: 16-21.
- GONG M L. Phase and state analysis for geological prospecting[M]. 2nd ed. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 16-21.
- [10] 吕娅丽, 毛雪瑛, 李晓林, 等. 分子活化分析法研究地质样品中铂族元素的化学种态[J]. 化学与放射化学, 2002, 24(1): 11-15.
- LÜ Y L, MAO X Y, LI X L, et al. Study on the chemical species of platinum group elements in geological samples by molecular activation analysis[J]. Journal of nuclear and radiochemistry, 2002, 24(1): 11-15.
- [11] 来雅文, 甘树才, 戚长谋, 等. 峨嵋玄武岩铂钯赋存状态分析[J]. 岩矿测试, 2003, 22(2): 121-128.
- LAI Y W, GAN S C, QI C M, et al. Analysis of platinum and palladium occurrence states in emei basalt[J]. Rock and mineral analysis, 2003, 22(2): 121-128.
- [12] 唐志中, 王琳, 来新泽, 等. 甘肃铜镍硫化物矿床金铂钯相态分析[J]. 贵金属, 2013, 34(1): 59-66.
- TANG Z Z, WANG L, LAI X Z, et al. Phase analysis for Gansu Cu-Ni sulfide deposits of gold, platinum and palladium[J]. Precious metals, 2013, 34(1): 59-66.
- [13] 唐志中, 王君玉, 孙红林, 等. 锡试金分离富集-ICP-MS 法同时测定地质样品中的金铂钯[J]. 贵金属, 2013, 34(2): 51-55.
- TANG Z Z, WANG J Y, SUN H L, et al. Determination of Au, Pt and Pd in geological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry with tin fire assay[J]. Precious metals, 2013, 34(2): 51-55.
- [14] 王琳, 来新泽, 唐志中, 等. 改进BCR法测定公路两旁表层土壤中铂钯铑的化学形态[J]. 岩矿测试, 2013, 31(6): 954-960.
- WANG L, LAI X Z, TANG Z Z, et al. Determination of chemical species of platinum, palladium and rhodium in roadside surface soil with a modified BCR method[J]. Rock and mineral analysis, 2013, 31(6): 954-960.
- [15] 袁倬斌, 吕元琦, 张裕平, 等. 电感耦合等离子体质谱在铂族元素分析中的应用[J]. 冶金分析, 2003, 23(2): 24-30.
- YUAN Z B, LÜ Y Q, ZHANG Y P, et al. The application of inductively coupled plasma mass spectrometry in analysis of platinum group elements[J]. Metallurgical analysis, 2003, 23(2): 24-30.