

滇东 Pt-Pd-Cu 含矿建造地球化学特征 及其含矿性分析

陈永清¹ 夏庆霖² 刘红光³

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100083; 2. 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074;
3. 中国地质图书馆, 北京 100083)

摘要:滇东 Pt-Pd-Cu 含矿建造包括黑色页岩建造和玄武岩建造, 黑色页岩建造由不同层位的黑色岩系组成。作者重点对元古宙昆阳群、下寒武统黑色岩系和二叠纪峨眉山玄武岩的地球化学特征进行了系统研究。研究表明, 昆阳群黑色岩系以 As、B($K \geq 5$) 显著富集, Sb、Pd、Mo、Ag、U、Pt、V、Zn、W、Cu($K \geq 1.2$) 富集为特征; 滇东下寒武统黑色岩系以 Mo、Ag、U、As、V、B、Pd、Sb($K \geq 5$) 显著富集, Pt、Pb、Zn、W、Cu、Ni($K \geq 1.2$) 富集为特征; 峨眉山玄武岩则以 Pt、Pd($K \geq 5$) 显著富集, Au、Ag、Cu、Zn、Sb、B、U、V($K \geq 1.2$) 富集为特征。总之, 分布于研究区不同层位的黑色岩系和二叠纪峨眉山玄武岩建造构成了该区贵金属(Pt、Pd、Ag、Au 等) 和有色金属(Cu、Mo、V 等) 元素成矿的初始矿源层, 上述区域成矿要素最佳匹配地段是可能产出非传统贵金属(Pt、Pd、Ag、Au 等) 和有色金属(Cu、Mo、V 等) 矿床的潜在地段。

关键词:黑色页岩建造; 峨眉山玄武岩; 非传统 Pt-Pd-Cu 矿床, 滇东

中图分类号: P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2003)03-0225-10

滇东地区系指东经 102° 以东的云南省东部地区, 是中国重要的有色金属基地, 其中东川铜矿和个旧锡矿皆是世界闻名的大型矿床(图 1)。该区亦是利用泛滥平原沉积物介质分析圈定的中国 3 个 Pt、Pd 地球化学省之一——滇黔 Pt、Pd 地球化学省的重要组成部分^[1]。

根据朱炳泉等^[2] 研究该区主要成矿带划分为东川一个旧成矿带和红河成矿带, 前者属于扬子地块, 分布有东川、拉拉厂、易门等铜矿床和个旧锡矿床等, 其中东川式和易门式铜矿床属于与黑色岩系有关的铜矿床^[3]; 后者属于印支块体, 分布有大红山、岔河和龙勃河铜矿床等。

研究区 Pt-Pd-Cu 含矿建造包括黑色页岩建造和玄武岩建造。黑色页岩建造中的贵金属矿床是近年来不断发现的一种新矿床类型, 亦是目前非传统矿产资源研究的一个重要内容。根据形态特征将该

类矿床分为两类: 一类是矿化厚度几十米至几百米, 长度可达几千米的矿带, 如俄罗斯干谷 Au-Pt 矿床; 二是矿体厚度小(1~2 cm), 长度大, 金属含量高, 如波兰 Kupferschiefer 含贵金属的 Cu-Ag 矿床; 二者皆产在与大陆裂谷环境有关的黑色页岩建造中^[4]。黑色页岩建造主要发育于扬子地台, 并分布于从元古宙至中生代的多个层位, 其中最重要的有色金属、贵金属含矿层位为中元古界(昆阳群), 其次是上震旦—下寒武统(陡山沱组、渔户村组、筲竹寺组)、泥盆系(宰格组)、石炭系(万寿山组)和二叠系(梁山组、宣威组)等。近年来, 在中生代黑色页岩建造及其煤系亦有 Pt、Pd 异常含量的报道。由于条件的限制, 笔者重点选择了中元古界昆阳群、下寒武统黑色岩系和二叠纪峨眉山玄武岩作为研究对象。峨眉山玄武岩具有 Cu、Pt 和 Pd 的高丰度, 其中发育上述元素的细脉状矿化。

收稿日期: 2002-09-23; 改回日期: 2003-04-06

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2001BA609A02)和国土资源部“九五”科技前沿计划项目(997021)资助。

作者简介: 陈永清, 男, 1960 年生, 博士, 教授, 主要从事矿产资源评价研究; E-mail: Cyongqing@mail.cgs.gov.cn。

为研究滇东地区 Pt-Pd-Cu 含矿建造微量元素含量分布特征,在东川姑海、落雪人站石和大风口、待补糯租、得泽、曲靖土基冲、寻甸河湾村、蒲草堂等地典型剖面上,采集了黑色岩系及玄武岩岩石样品 71 件,并由湖北省地勘局岩矿测试中心定量分析了 Pt(C-OES)、Pd(C-OES)、Au(C-OES)、Ag(OES)、B(OES)、As(AF)、Sb(AF)、Cu(ICP-AES)、Zn

(ICP-AES)、Co(ICP-AES)、Ni(ICP-AES)、V(ICP-AES)、Pb(XRE)、Cr(XRE)、W(OP)、Mo(OP)、U(LFS)等 17 种元素。

1 昆阳群黑色岩系地球化学特征及含矿性分析

1.1 构造沉积环境

昆阳群(1 800~1 600 Ma)发育于元古宙昆阳裂谷,总体呈南北向展布,为一套冒地槽型(大陆裂谷型)类复理石-碳酸盐建造,属陆棚浅海—滨海、潮坪沉积,厚逾万米。昆阳裂谷是形成于太古宙—古元古代基底之上受拉张深断裂控制的南北向古陆间边缘海盆(靠近康滇古陆一侧),由一系列狭长断陷盆地或裂陷槽组成,其中发育多中心火山喷发,从而在裂谷内形成巨厚的火山沉积岩系。这种巨厚的火山沉积岩系含有多层富 Cu、Fe 等成矿元素层位,为以后形成这类矿床提供了物质基础。其成矿构造环境属被动大陆边缘并处于拉张为主的构造环境。晋宁期构造运动(850~900 Ma)导致昆阳群褶皱隆起,并发生低温区域动力变质作用,从而形成扬子地台的上层褶皱基底^①。

中下昆阳群,自下而上为因民组(中段稀矿层段为含 Cu、Fe 层位)、落雪组(昆阳群最重要的含 Cu 层位)、鹅头厂组和黑山组(赋存“桃园式”铜矿床)、绿汁江组和青龙山组、大营盘组。持续的物质供应和多次缺氧环境对成矿具直接控制作用,中下昆阳群与 Cu 矿化有关地层厚度达 1 500~2 000 m,许多 Cu 矿层直接赋存于黑色页岩中。

1.2 地球化学特征

中下昆阳群变质程度较低,一般为低绿片岩相。其中,因民组厚 30~818 m,为紫色、灰绿色板岩、砾岩夹砂质白云岩透镜体;落雪组厚 50~540 m,为硅质白云岩和藻白云岩;鹅头厂组和黑山组厚 993~1 796 m,为黑色碳质板岩夹泥质灰岩、中基性熔岩及火山碎屑岩;绿汁江组和青龙山组厚 1 321~2 030 m,为白云岩、叠层石白云岩;大营盘组厚 1 643~3 158 m,主要为一套黑色碳质板岩,底部见铁质板岩与角砾岩。

位于东川落雪大风口的黑山组黑色岩系剖面

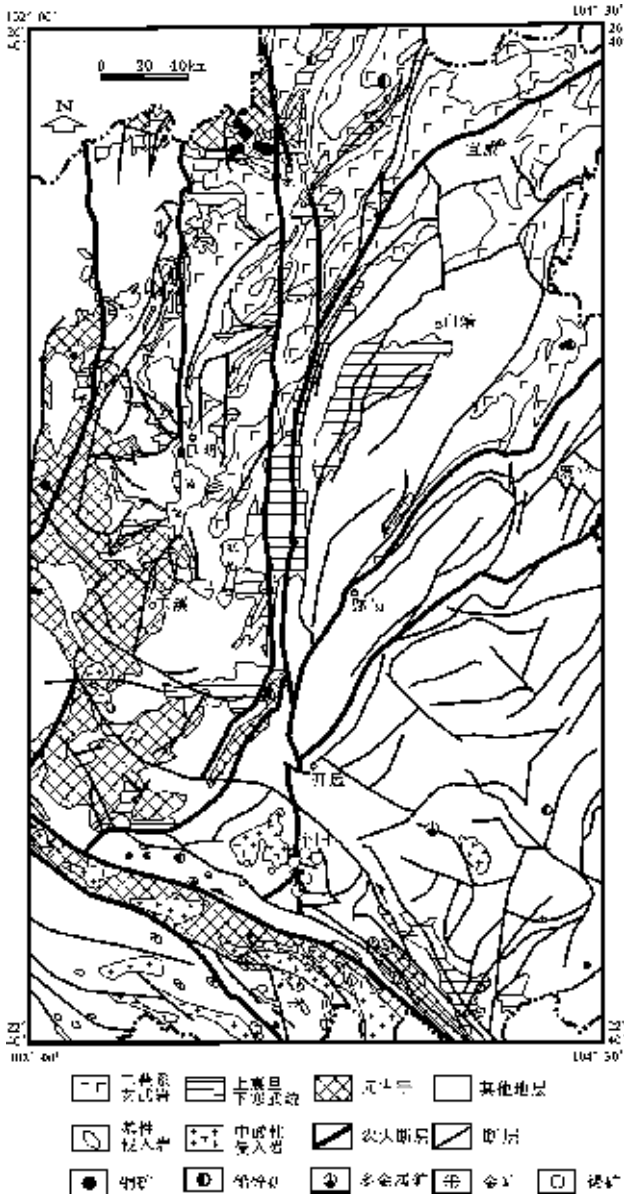


图 1 滇东地质矿产简图

Fig. 1 Simplified map showing the geology and distribution of some metal deposits in eastern Yunnan Province

① 张翼飞,云南省区域矿产总结,1993,5~20.

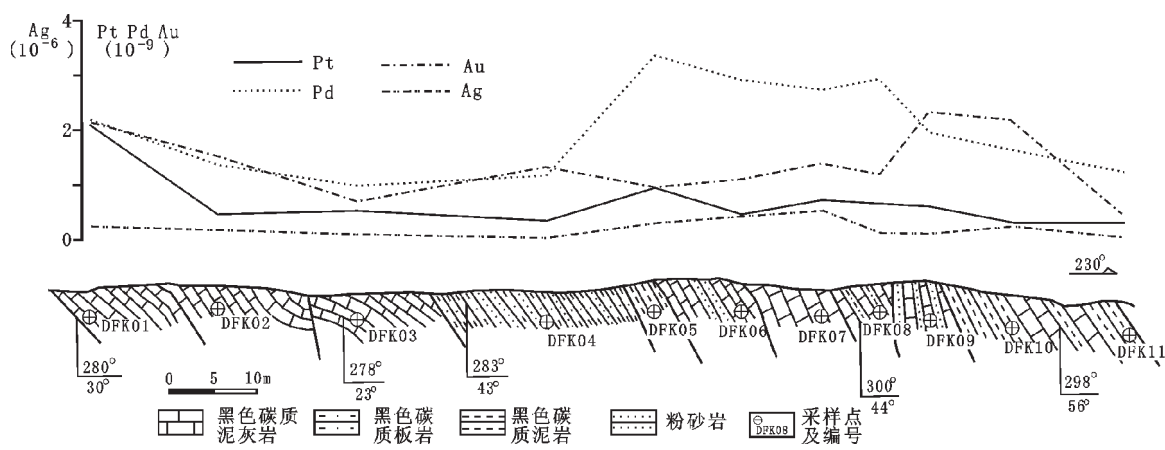


图 2 落雪大风口中元古界昆阳群黑山组黑色岩系地质地球化学剖面图

Fig. 2 Geological and geochemical section of the black rock series of the Heishan Formation of the Mesoproterozoic Kunyang Group near Dafengkou, Luoxue Town, eastern Yunnan Province

(图 2) 主要由黑色含碳质泥灰岩、黑色碳质板岩、含细脉状黄铁矿黑色碳质泥灰岩、黑色碳质板岩、灰色含碳质泥灰岩和黑色碳质泥岩等组成。在含细脉状黄铁矿的黑色碳质泥灰岩中清晰可见与层理产状近乎一致的黄铁矿脉，镜下可以明显地区分出 2 类黄

铁矿：晶粒细小的他形原生黄铁矿和晶粒粗大的具有定向排列的后生脉状黄铁矿。

图 2 表明：在该黑色岩系中 Pt、Ag 含量变化曲线较平缓，而 Pd、Au 的含量变化曲线变化较大，有局部富集的趋势。研究区中元古界昆阳群黑色页岩

表 1 滇东地区中元古界昆阳群黑色岩系微量元素平均含量

Table 1 Average contents of trace elements in the black rock series of the Mesoproterozoic Kunyang Group in eastern Yunnan Province

地层 (样品数)	参数	Pt	Pd	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Mo	As	Sb	B	U	Cr	Ni	Co	V
昆阳群 (39)	\bar{X}	0.59	1.94	1.25	0.16	31.37	16.62	86.18	1.30	4.22	12.51	1.30	73.03	3.34	30.76	31.78	12.02	133.64
	S	0.46	0.72	0.65	0.18	24.50	16.44	68.80	0.82	5.44	14.52	2.56	54.73	2.66	27.77	16.52	8.54	87.11
	K	1.48	4.85	0.50	2.29	1.25	1.12	1.33	1.30	3.84	7.36	4.30	6.64	1.96	0.24	0.57	0.50	1.36
因民组 (6)	\bar{X}	0.40	2.14	1.05	0.03	15.07	2.25	23.83	0.61	1.64	13.05	0.39	34.42	0.92	8.32	21.42	11.72	47.17
	S	0.08	0.57	0.21	0.01	5.29	0.61	4.67	0.08	0.76	5.97	0.13	9.98	0.24	2.19	2.35	2.76	5.60
	K	1.00	5.34	0.42	0.43	0.60	0.15	0.37	0.61	0.82	1.49	7.65	3.13	0.54	0.07	0.38	0.49	0.48
鹅头厂组 (7)	\bar{X}	0.46	1.78	1.23	0.09	46.9	33.03	162.71	2.76	1.48	22.61	3.54	121.5	2.10	66.74	33.20	24.31	123.29
	S	0.05	0.74	1.02	0.06	11.84	25.58	114.83	0.37	2.15	28.51	5.66	31.06	0.40	16.55	4.23	13.82	11.83
	K	1.15	4.45	0.49	1.29	1.88	2.23	2.50	2.76	1.35	13.30	11.80	11.04	1.24	0.53	0.59	1.01	1.26
黑山组 (14)	\bar{X}	0.86	2.13	1.56	0.28	30.54	18.31	79.21	1.22	4.77	6.74	0.80	100.7	5.18	36.25	32.49	7.98	171.64
	S	0.69	0.80	0.63	0.25	31.71	12.91	39.36	0.52	3.75	5.87	0.65	55.32	2.89	25.79	22.79	3.57	100.77
	K	2.14	5.32	0.62	4.0	1.22	4.0	1.22	1.22	4.34	3.96	2.61	9.15	3.05	0.29	0.58	0.33	1.75
大营盘组 (12)	\bar{X}	0.44	1.72	0.99	0.12	31.43	12.25	61.33	0.88	6.48	13.07	1.03	31.78	3.14	14.58	35.32	9.72	138.58
	S	0.15	0.68	0.44	0.07	22.27	8.46	29.37	0.35	8.28	10.98	0.79	31.94	2.46	17.41	15.57	2.53	90.06
	K	1.10	4.31	0.40	1.71	1.26	0.83	0.94	0.88	5.89	7.66	3.43	2.89	1.85	0.12	0.63	0.41	1.41
陆壳丰度 ^[21]		0.4	0.4	2.5	0.07	25	14.8	65	1.0	1.1	1.7	0.3	11	1.7	126	56	24	98

注:Pt、Pd、Au 单位为 10^{-9} ,其余元素为 10^{-6} ;其中 \bar{X} —均值;S—标准差;K—浓集系数。

表2 成矿元素在滇东昆阳群不同类型岩石中的平均含量

Table 2 Average contents of ore-forming elements in different types of black rock series of the Mesoproterozoic Kunyang Group in eastern Yunnan Province

岩石类型(样品数)	Pt+Pd	Au	Ag	Cu
黑色碳质板岩(26)	2.41	1.13	0.11	28.87
黑色碳质泥灰岩(9)	2.98	1.49	0.30	40.66
黑色碳质泥岩(2)	2.96	1.84	0.18	12.7
黑色碳质页岩(2)	1.68	1.16	0.08	40.85
含铜砂岩(3)	2.00	2.43	3.15	3381.3

注:Pt+Pd、Au 单位为 10^{-9} ; Ag、Cu 为 10^{-6}

建造微量元素相对其地壳丰度(表1)具下列特征:As、B 显著富集 ($K \geq 5$); Sb、Pd、Mo、Ag、U、Pt、V、Zn、W、Cu 富集 ($K \geq 1.2$); Au、Co、Cr、Ni 贫化 ($K \leq 0.8$); Pb(1.12)接近地壳丰度。Pt+Pd 的平均含量为 2.53×10^{-9} , Pt/Pd 为 0.30, Pd 相对富集。其中, 因民组黑色岩系的微量元素浓集序列 ($K \geq 1.2$) 为: As→Pd→B→Mo→Sb; 鹅头厂组黑色岩系的微量元素浓集序列 ($K \geq 1.2$) 为: As→Sb→B→Pd→W→Zn→Pb→Cu→Mo→Ag→V→U; 黑山组黑色岩系的微量元素浓集序列 ($K \geq 1.2$) 为: B→Pd→Mo→As→U→Pt→V→Cu→Pb→Zn→W; 大营盘组黑色岩系的微量元素浓集序列 ($K \geq 1.2$) 为: As→Mo→Pd→Sb→B→U→Ag→V→Cu。由表1可知: 滇东地区昆阳群黑色岩系以富含 Pt、Pd、Ag 等贵金属元素及 As、Sb、B 等元素为特征, 其中, Pt+Pd 平均含量以黑山组最高 (2.99×10^{-9}), 其次为因民组 (2.54×10^{-9}) 和鹅头厂组 (2.24×10^{-9}), 大营盘组最低 (2.16×10^{-9})。

1.3 含矿性分析

发育于元古宙的大陆裂谷作用, 是形成昆阳群黑色岩系和控制铜及铂族元素(PGE)初始富集的重要因素。昆阳群黑色岩系主要由灰黑色碳质板岩、黑色页岩、黑色含碳质泥灰岩和黑色碳质泥岩等岩石类型组成, 常见石墨化、浸染状和脉状黄铁矿化, 局部层位发育黄铁矿结核。该黑色岩系以富含有机质和 Pt、Pd、Ag 等贵金属元素及 As、Sb 等元素为特征, 其中 Pt+Pd 含量为陆壳丰度的 3.05 倍, 为中国泛滥平原沉积物^[4]的 2.84 倍; Ag 含量是陆壳丰度的 3.20 倍; As、Sb 含量分别为陆壳丰度的 7.36 倍和 4.30 倍。据 L.J. 赫尔伯特等^[5]对世界有关热液铂族矿床研究结果: 由于 Pd 比 Pt 的化学活动性强, 较易形成水溶络合物, Pd 的含量常高于 Pt 的含量, 成为热液型

铂族矿床的一个显著特征。由此可见, 昆阳群黑色岩系中 Pd/Pt=3.29, Pd 相对 Pt 的富集 (Pd 的含量为 Pt 的 3.29 倍) 可能反映了热水沉积的特征, 即黑色岩系中铂族元素的富集与海底热水沉积作用有关。滇东地区不同类型岩石的 Pt、Pd、Au、Ag 和 Cu 的平均含量和相对地壳丰度的富集系数如表 2 所示。以黑色碳质泥灰岩和黑色碳质泥岩的 Pt+Pd 平均含量最高 (分别为 2.98×10^{-9} 和 2.96×10^{-9}), 其次为黑色碳质板岩 (2.4×10^{-9}) 和含铜砂岩 (2.0×10^{-9}), 黑色碳质页岩最低 (1.68×10^{-9})。值得注意的是含铜砂岩除 Cu 的含量特高外, Pt、Pd、Ag 等元素的平均含量也相对较高 (Pt+Pd 是陆壳丰度的 2.5 倍, Ag 是陆壳丰度的 45 倍)。可见, 含 Cu 砂岩亦可能是 Pt、Pd、Ag 等元素成矿的初始矿源。综上所述, 可以推断在诸成矿因素最佳组合的地段有可能形成具有工业意义的新类型的 PGE 矿化和 Cu、Ag 矿化。

2 寒武系黑色岩系地球化学特征及含矿性分析

华南扬子地台广泛发育晚震旦世—早寒武世的黑色岩系, 其中不仅赋存大规模的磷、重晶石和石煤矿床, 而且还在多个层位富集 Ni—Mo—PGE 和 Au、Ag、REE、Se、Tl、Cd 等元素^[6]。本次通过对滇东下寒武统筇竹寺组和渔户村组(寒武系部分)典型剖面的研究, 查明 Pt、Pd、Au 等元素含量特征, 为区域评价提供依据。

2.1 构造沉积环境

吴朝东等^[7]依据扬子板块大地构造演化和建造层序分析, 结合实测剖面 and 编图研究, 分析了湘西地区晚震旦世—早寒武世的黑色岩系的形成环境。发育于震旦系的黑色岩系, 其下部为大陆裂谷冰水沉积, 中上部为海相裂谷深水相或台地碳酸盐岩沉积。晚震旦世以来, 扬子海域性质发生变化, 大洋缺氧, 扬子板块边缘海域发育黑色岩系, 扬子板块克拉通浅海水体变深, 被黑色岩系覆盖。分布于下寒武统的黑色岩系主要由早寒武世的拉张裂谷型沉积序列构成, 最大海侵期形成了广泛分布的黑色岩系、磷块岩和硅质页岩, 其中富集 Ni、Mo 等元素。这表明在震旦纪/寒武纪的转折期在扬子地台存在一次大规模的缺氧事件, 从而形成一套富含金属的黑色岩系, 为后期成矿提供了物质基础^[8]。

2.2 地球化学特征

滇东地区渔户村组(寒武系部分)由白云岩、磷块岩和灰紫、灰绿色粉砂质页岩等组成;筇竹寺组(ϵ_{1q})主要是深灰、灰绿色泥质页岩夹粉砂岩,上部夹薄层砂岩,底部为黑色粉砂岩或页岩。筇竹寺组上、下段黑色岩系富含 Ni、Mo、V、U、Pt、Pd 等元素,底部与碳酸盐岩接触带为热液活动和多金属元素富集的有力部位。出露于待补糯租的渔户村组黑色页岩建造地质地球化学剖面(图 3)主要由黑色泥灰岩、黑色页岩组成,其 Pt、Pd 和 Au 的含量变化曲线较平坦,而 Ag 的含量变化则相对较大。黑色泥灰岩的主要矿物和物质有方解石、泥质、硅质及有机碳,金属矿物为黄铁矿;黑色页岩的主要碎屑矿物有石英、长石和碳质矿物等,金属矿物为黄铁矿。在显微镜下可区分出 2 种不同成因类型的黄铁矿:同生黄铁矿,粒度较小,呈他形或他形集合体,俗称草莓状黄铁矿,且呈面状或点状随机分布;后生黄铁矿,粒度较大,结晶好,呈自形、半自形、脉状产出。

表 3 表明:滇东下寒武统黑色岩系显著富集 Mo、Ag、U、As、V、B、Pd、Sb($K \geq 5$);富集 Pt、Pb、Zn、W、Cu、Ni($K \geq 1.2$);亏损 Co、Au、Cr($K \leq 0.8$)。Pt/Pd 为 0.47,远小于陆壳的铂钯比值($Pt/Pd=1.0$)。其中,渔户村组黑色岩系的微量元素浓集序列($K \geq 1.2$):Ag→As→Sb→U→B→Pt→Mo→Zn→Pd;筇竹寺组黑色岩系的微量元素浓集序列($K \geq 1.2$):Mo→V→Ag→As→U→B→Pd→Pt→Sb→Zn→Cu→Pb。筇竹寺组黑色岩系 Pt+Pd 的平均含量相对更高

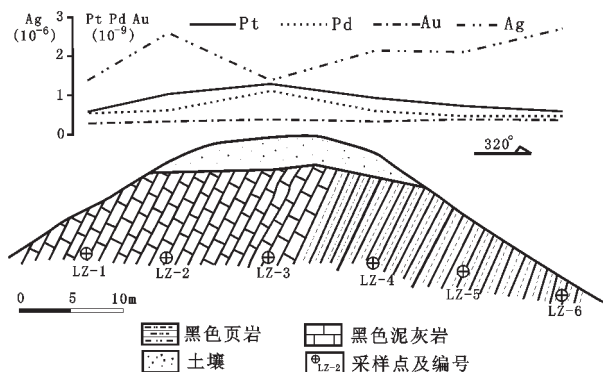


图 3 待补糯租下寒武统渔户村组黑色岩系地质地球化学剖面

Fig. 3 Geological and geochemical section of the black rock series of the Lower Cambrian Yuhucun Formation near Nuozu Village, Daibu Town, eastern Yunnan Province

一些,为 5.11×10^{-9} ,是陆壳丰度的 6.4 倍;渔户村组黑色岩系的 Pt+Pd 含量为 1.46×10^{-9} ,是陆壳丰度的 1.8 倍。而渔户村组 Ag 含量相对较高,为 2.05×10^{-6} ,约是陆壳丰度的 29 倍;筇竹寺组 Ag 含量为 145×10^{-6} ,约是陆壳丰度的 21 倍。总之,下寒武统黑色岩系浓集元素的种类(PGE、Mo、V、Ag、As、U、B、Sb 等)和强度皆大于元古宙黑色岩系。

2.3 含矿性分析

在中国富含 Ni、Mo、V、Cu、U、Ba、Pt、Pd、Au 和 Ag 的黑色含矿岩系广泛分布于扬子地台下寒武统底部至震旦系陡山沱组上部。地理分布包括滇东、川西、川黔桂邻接区、粤北、湘(中、西、北)、鄂西(三峡

表 3 滇东地区下寒武统黑色岩系微量元素平均含量

Table 3 Average contents of trace elements in the Lower Cambrian black rock series in eastern Yunnan

地层 (样品数)	参数	Pt	Pd	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Mo	As	Sb	B	U	Cr	Ni	Co	V
下寒武统 (18)	\bar{X}	1.25	2.65	1.01	1.65	33.08	45.21	106.44	1.40	35.85	26.69	1.58	83.56	28.77	78.34	67.01	8.87	754.78
	S	1.23	3.12	0.76	1.76	17.48	44.68	134.02	0.30	46.20	11.13	1.51	34.45	18.18	54.56	93.42	10.51	952.24
	K	3.13	6.63	0.40	23.57	1.32	3.01	1.64	1.40	17.93	15.7	5.26	7.60	16.92	0.62	1.20	0.37	7.70
渔户村组 (6)	\bar{X}	0.85	0.61	0.34	2.05	23.55	91.37	104.67	1.18	1.92	20.62	3.05	71.68	15.87	26.77	26.08	6.95	67.33
	S	0.29	0.25	0.05	0.56	5.67	53.91	38.11	0.43	0.67	5.63	1.46	52.55	14.34	25.15	4.85	2.86	35.39
	K	2.13	1.53	0.14	29.29	0.94	6.09	1.61	1.18	0.96	12.13	10.17	6.63	9.34	0.21	0.49	0.29	0.69
筇竹寺组 (12)	\bar{X}	1.45	3.66	1.35	1.45	37.85	22.13	107.33	1.51	52.82	29.73	0.84	89.50	35.22	104.13	87.48	9.83	1098.5
	S	1.48	3.42	0.72	2.13	19.58	4.63	164.61	0.10	48.54	12.12	0.88	21.52	16.77	46.23	110.03	12.81	1007.0
	K	3.62	9.15	0.54	20.71	1.51	1.48	1.65	1.51	26.41	17.49	2.80	8.14	9.86	0.83	1.56	0.39	11.21
陆壳丰度 ^[21]		0.4	0.4	2.5	0.07	25	14.8	65	1.0	1.1	1.7	0.3	11	1.7	126	56	24	98

注:Pt、Pd、Au 单位为 10^{-9} ;其余元素为 10^{-6} ;其中, \bar{X} —均值;S—标准差;K—浓集系数。

地区)、皖浙赣等地区^[9]。在华南海相三叠纪黑色岩系中发育金矿化^[10]。华南中元古代双桥山组、早寒武世水口组和泥盆纪余田桥组属于含 Au 黑色岩系。由于滇东等地区晚震旦世与早寒武世地层有时难以划分,故在区域地质上常将上震旦—下寒武统作为一个地层超单元来研究。上震旦—下寒武统的黑色岩系主要由黑色碳质页岩、黑色碳质硅质岩和黑色碳质硅质岩组成。上震旦—下寒武统的黑色岩系在不同地段出现不同的岩性系列组合及元素组合,分别赋存有石煤层、磷块岩层、钒矿层及镍钼多元富集层。据报道^[11],贵州遵义钼矿床是世界上唯一一个从黑色岩系中开采 Mo 的矿床。该矿山的年产 Mo 1 000 t,平均品位 4%,此外,还含有 Ni 4%、Zn 2%、Au 0.7×10^{-6} 、Ag 50×10^{-6} 、Pt 0.3×10^{-6} 、Pd 0.4×10^{-6} 和 Ir 30×10^{-9} ; 镍钼多元富集层除富集 Ni、Mo 外,还富含 Pt、Pd、Os、Ru、Au、Ag、P、Se、As、Tl、Cu、Pb、Zn、Re、Fe、U 及稀土元素等。古生代,滇东等地区再次发生大陆裂谷作用,形成著名的康滇大陆裂谷带。位于扬子地块西缘及大陆裂谷带东侧邻接过渡带上的滇东地区,在当时浅海—滨海环境中可能发育大量局限滞流盆地,产生了下寒武统黑色碳质页岩及粉砂质泥岩岩系。研究表明,PGE 富集作用与沉积作用几乎是在相近的时间同时进行的,即海底喷气热流体带入大量 Ni、Mo、PGE 等矿物质,主要呈胶体形式在密度流的作用下沿海底斜坡搬运至局限滞流盆地,并快速沉积固结下来,形成富含金属层的黑色岩系^[9]。滇东地区下寒武统黑色岩系,尤其以筇竹寺组黑色岩系最为典型,其 PGE 和 Ag 的含量都很高,并发育多金属矿化层。筇竹寺组的玉案山段底部和石岩头段底部皆发育有黑色岩系(俗称上、下黑层),分别赋存有镍钼矿层和钒银铀矿层。上黑层镍钼矿层的岩性以黑色薄层碳质泥岩、碳质粉砂质泥岩为主,夹碳质泥质灰岩,底部为 1~2 m 厚的含铁锰质水云母黑色页岩。其中,镍钼含矿岩石可以分为富金属硫化物粉砂岩型、碳质泥质灰岩型、鳞片状碳质页岩型和板状碳质页岩型 4 类。在得泽矿区,矿体平均厚度 1.21 m,长 4.5 km。矿石平均含 Mo 0.08%、Ni 0.14%、U 0.01%、Se 0.003%、Pt+Pd 0.10×10^{-6} 等,富矿层中含 Ni 3.61%、Mo 4.60%、Zn 3.38%。下黑层钒银铀矿层的岩性主要为中厚、厚层状碳质粉砂岩夹碳质泥岩等。常见石墨化及黄铁矿化。得泽矿区钒银铀矿层的平均厚度 2.07 m,

表 4 成矿元素在滇东下寒武统不同类型岩石中的平均含量
Table 4 Average contents of ore-forming elements
in different types of Lower Cambrian black rock series
in eastern Yunnan Province

岩石类型(样品数)	Pt+Pd	Au	Ag	Cu
黑色碳质泥灰岩(3)	1.72	0.32	1.79	20.23
黑色碳质页岩(6)	5.24	0.62	3.02	27.97
黑色碳质泥质粉砂岩(9)	3.72	1.51	0.69	40.78

注:Pt+Pd、Au 单位为 10^{-9} 、Ag、Cu 为 10^{-6} 。

长约 6.5 km,平均含量为 V_2O_5 1.0%、U 0.01%、Ag 5×10^{-6} ~ 13×10^{-6} 、Pt+Pd 0.08×10^{-6} 。研究发现,Ni、Mo、V、U 等元素富集成矿的有利部位几乎都在每一黑层的底部,及其与下伏泥质白云岩、灰岩等的接触带上。由此推断,黑色岩系与下伏碳酸盐岩系的接触带也同样是 PGE 成矿富集的有利部位。滇东地区上震旦—下寒武统不同类型岩石上述元素的富集程度不同(表 4),其中黑色碳质页岩的 Pt+Pd 平均含量最高(5.24×10^{-9}),次为黑色碳质泥质粉砂岩(3.72×10^{-9}),而黑色碳质泥灰岩最低(1.72×10^{-9});Ag 在上述岩性中亦有不同程度的显著富集;Cu 在黑色碳质泥质粉砂岩中略有富集,在其他两种岩性中接近其地壳丰度;Au 则相对亏损。Ni、Mo、V、U 在上震旦—下寒武统黑色岩系中显著富集是其区别元古宙黑色岩系的重要地球化学特征。

3 峨眉山玄武岩建造地球化学特征及含矿性分析

峨眉山玄武岩是由赵亚曾于 1929 年命名的,现泛指二叠纪发育于西南 3 省扬子古陆的大面积玄武岩,它东起贵阳、西至维西、北抵丹巴、南达红河,出露面积大于 37 000 km²,平均厚度 700 余米^[12]。滇东峨眉山玄武岩是川、黔、滇三省二叠纪玄武岩的重要组成部分,属间歇性、裂隙式、多中心喷发的大陆裂谷型玄武岩^[13]。滇东地区峨眉山玄武岩主要沿深大断裂呈带状展布,其喷发时间在晚二叠世早期,主要由拉斑玄武岩组成,底部和顶部有少量碱性玄武岩和酸性火山岩产出。拉斑玄武岩系由数个旋回层组成,每个旋回层自下而上依次为玄武质火山角砾岩、致密玄武岩、斑状玄武岩、杏仁状或气孔状玄武岩、玄武质凝灰岩。玄武岩具块状、斑状、气孔状构造,基质多具间隐结构。玄武岩自西向东呈减薄的趋势;厚度超过 1 000 m 的峨眉山玄武岩带,主要沿小江断

裂呈南北向分布,或沿寻甸—宣威断裂呈北东向分布(图 1),该带内,发现有火山角砾岩和火山弹,表明峨眉山玄武岩的形成除沿深大断裂大规模喷溢这一主要形式外,还与古火山喷发相关。

沿寻甸—宣威断裂和小江断裂北段零星分布的呈岩株、岩枝、岩床、岩墙等产出的富铁质及铁质基性超基性岩与峨眉山玄武岩在时空及物质成分上的相似性,可能说明二者具有内在的成因联系。

3.1 构造环境

研究表明^[14-16]:峨眉山玄武岩形成的大地构造背景为板内裂谷环境,华力西晚期,沿小江、普渡河等深大断裂带发生大规模的玄武岩浆喷发—喷溢作用。SN 向的小江断裂、NE 向的寻甸—宣威断裂和弥勒—师宗断裂在晚古生代表现为张性或张扭性活动特征,控制了滇东地区峨眉山玄武岩的分布、厚度变化和玄武质火山集块岩的分布。

3.2 地球化学特征

位于寻甸河湾村的峨眉山玄武岩地质地球化学剖面(图 4)发育有致密块状玄武岩和气孔构造玄武岩。镜下常见斑状和杏仁状构造,基质为间隐结构;斑晶主要为斜长石,其次为单斜辉石,基质由长条状斜长石、粒状单斜辉石及暗色玻璃、针状钛铁矿等组成。图 4 表明,玄武岩中 Ag、Pt、Pd 含量普遍高于 Au 的含量,Pt、Pd 含量变化起伏的幅度亦大于 Au、Ag 的变化幅度;而 Pt、Pd、Au 含量曲线的同步变化,反映它们之间在含量上具显著相关性。

与世界玄武岩元素平均含量(表 5)相比,滇东峨眉山玄武岩以显著富集 Pt、Pd($K \geq 5$),富集 Au、Ag、Cu、Zn、Sb、B、U、V($K \geq 1.2$);亏损 As、Cr、Ni 等元素($K \leq 0.8$)为特征。其中,Pt/Pd 为 0.89,略小于

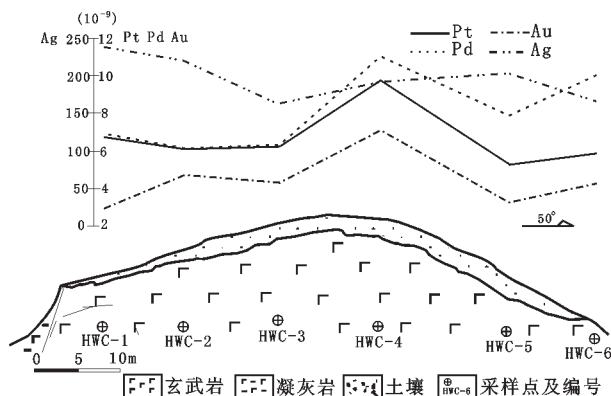


图 4 寻甸河湾村峨眉山玄武岩地质地球化学剖面图

Fig. 4 Geological and geochemical section of the Permian Emeishan basalt near Hewan Village, Xundian Town, eastern Yunnan Province

陆壳的铂钯比值。其微量元素浓集序列为: Pd→Pt→Sb→B→Au→Cu→W→Ag→Zn→U→V。

3.3 含矿性分析

峨眉山玄武岩以显著富集铂族元素及 Cu、Ag 等金属元素为特征。滇东地区峨眉山玄武岩的 Pt+Pd 平均含量为 11.67×10^{-9} , 是陆壳丰度的 14.6 倍; Cu 为 196.10×10^{-6} , 是世界玄武岩平均含量的 2.25 倍; Ag 为 0.17×10^{-6} , 是世界玄武岩平均含量的 1.55 倍。其中, 以致密块状玄武岩的 Pt+Pd 含量最高 (14.60×10^{-9}), 杏仁状(气孔状)玄武岩次之 (13.07×10^{-6}), 风化玄武岩最低 (8.54×10^{-6})。20 世纪 80 年代, 滇东地区已发现产于峨眉山玄武岩中的热液型自然铜矿化, 主要有石英脉型自然铜矿化和蚀变杏仁状玄武岩型自然铜矿化, 虽规模较小, 但品位较高^①。滇东铂钯区域地球化学编图表明^②: 高强度 Pt、Pd 地球

表 5 滇东地区峨眉山玄武岩建造微量元素平均含量

Table 5 Average contents of trace elements in the Emeishan basalt, eastern Yunnan

样数	参数	Pt	Pd	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Mo	As	Sb	B	U	Cr	Ni	Co	V
10	\bar{X}	5.48	6.19	3.48	0.17	196.1	7.05	137	1.09	1.6	0.84	0.53	13.01	1.28	46.62	45.27	45.59	314.8
	S	2.01	2.65	1.70	0.05	34.33	2.79	30.5	0.08	1.19	0.46	0.49	33.54	0.99	14.53	7.99	4.58	68.02
	K	13.7	15.5	2.32	1.55	2.25	1.18	1.3	1.56	1.07	0.42	2.65	2.6	1.28	0.27	0.35	0.95	1.26
玄武岩 ^①		0.4 ^②	0.4 ^②	1.5 ^②	0.11	87	6	105	0.7	1.5	2	0.2	5	1	170	130	48	250

注:①据 Turekian and Wedepohl (1961)^[21];②据 K.H. Wedepohl 地壳丰度值^[20]; Pt、Pd、Au 单位为 10^{-9} ; 其余元素为 10^{-6} ; \bar{X} —均值; S—标准差; K—浓集系数。

① 云南省地质局. 1:20 万区域地质调查报告——东川幅(矿产部分), 1980.

② 夏庆霖, 陈永清, 赵鹏大. 滇东 Pt-Pd 地球化学填图及其异常评价(待刊), 2003.

化学异常大多分布在峨眉山玄武岩出露区。梁有彬等^[7]通过攀西古裂谷带二叠纪峨眉山玄武岩分布区与俄罗斯诺里尔斯克铜镍铂(族)矿床的岩石-构造环境进行对比发现,川滇地区具备诺里尔斯克型铂矿床的成矿条件。俄罗斯诺里尔斯克铜镍铂矿床被认为是与陆内裂谷作用有关的溢流玄武岩中典型的矿床,矿石中铂族元素含量高,且 $Pd > Pt$, 硫的同化作用对成矿具有重要意义。涂光炽^[8]也认为,中国西南地区广泛出露的二叠纪峨眉山暗色岩,其覆盖面积大,主要是喷溢相玄武岩,但也存在侵入岩相,而且有伟晶岩状结构岩石的报道,可能出现铂族金属的超常富集。

4 滇东含矿(Pt、Pd、Cu)建造含矿性统计分析

4.1 Pt、Pd 分布特征及元素相关性

研究区 67 件含矿(Pt、Pd、Cu)建造(包括黑色页岩建造和玄武岩建造)样品进行元素含量富集程度统计分析表明:Pt+Pd 在滇东含矿建造中呈高丰度($X = 1.0 \times 10^{-9} \sim 20.68 \times 10^{-9}$; $\bar{X} = 4.26 \times 10^{-9}$),并显示正偏对数长尾分布的特征。

相关分析表明:滇东地区含矿(Pt、Pd、Cu)建造中 Pt、Pd 呈显著的正相关关系,其相关系数达到 0.83,尤其在 Pt 含量 $0.6 \times 10^{-9} \sim 1.5 \times 10^{-9}$, Pd 含量 $0.5 \times 10^{-9} \sim 3.0 \times 10^{-9}$ 之间铂钯相关性更为显著,随着 Pt、Pd 含量的增加,其相关性有所降低。此外, Pt+Pd 与 Cu、Au、Co 的相关性最高(相关系数 ≥ 0.6),其次为 Cr、V、Ag(相关系数 ≥ 0.21), Pt+Pd 与 B、Pb、Sb、As、W 呈负相关。

4.2 元素组合特征

利用分别采自滇东中元古界、下寒武统黑色页岩建造和二叠纪峨眉山玄武岩建造中的 67 件基岩地球化学样品 Pt、Pd、Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、W、Mo、B、U、Cr、Co、Ni、V 等 17 个元素含量进行了因子分析,其结果(表 6)表明,滇东含矿(Pt、Pd、Cu)建造存在 4 种主要元素组合(因子载荷 ≥ 0.5):① F_1 : Cu-Pt-Co-Au-Pd;② F_2 : Cr-V-Ag-U;③ F_3 : Ni-Mo-U-Zn;④ F_4 : Sb-W-B-Pb-As。

F_1 组合的因子得分高值样品主要分布在二叠纪峨眉山玄武岩中,其次分布在下寒武统筇竹寺组黑色碳质页岩、深灰—黑色碳质粉砂岩,以及中元古界昆阳群鹅头厂组含硫板岩中,可能反映了 Cu、Pt、

Co、Au、Pd 等元素在玄武岩以及黑色岩系中的初始富集。 F_2 组合因子得分高值样品集中分布在下寒武统筇竹寺组深灰—黑色碳质泥质粉砂岩和黑色碳质页岩以及二叠纪峨眉山玄武岩中,反映了 Cr、V、Ag、U 等元素对层位和岩性的选择性富集。 F_3 组合因子得分高值样品主要分布于下寒武统筇竹寺组黑色碳质页岩和深灰—黑色碳质泥质粉砂岩中,反映了黑色页岩建造中(尤其是下寒武统黑色岩系)Ni、Mo、U、Zn 富集层的存在,在这一层位的其他地区已发现 Ni、Mo、U 等元素的层状矿化。 F_4 组合的因子得分高值样品主要分布在中元古界昆阳群鹅头厂组的含硫板岩、灰—黑色板岩,大营盘组的黑色碳质板岩和黑山组的黑色碳质泥灰岩、黑色碳质板岩,以及下寒武统渔户村组的黑色页岩、黑色泥灰岩,筇竹寺组的黑色碳质粉砂岩中,反映 Sb、W、B、Pb、As 广泛富集在不同层位的黑色页岩建造中。

5 结 论

1) 发育于元古宙的大陆裂谷作用,是形成昆阳群黑色页岩建造和控制铜及铂族元素(PGE)初始富集的重要因素。含铜砂岩除 Cu 的含量特高外, Pt、Pd、Ag 等元素的平均含量也相对较高(Pt+Pd 是陆壳丰度的 2.5 倍, Ag 是陆壳丰度的 45 倍)。可见,含

表 6 滇东地区含矿 Pt-Pd-Cu)建造组正交旋转因子载荷
Table 6 Orthogonal rotation factor loadings of the element average contents of the Pt-Pd-Cu-bearing formation in eastern Yunnan Province

元 素	F_1	F_2	F_3	F_4
Pt	0.895492	0.272182	-0.11142	-0.16467
Pd	0.756853	0.492796	0.113699	-0.22369
Au	0.847595	-0.08963	0.121821	-0.0127
Ag	-0.08723	0.810974	0.04456	0.141001
Cu	0.91592	-0.03919	-0.02508	-0.02867
Pb	-0.25071	0.07874	0.034963	0.623812
Zn	0.398717	-0.14783	0.683637	0.49524
W	0.068005	0.247835	0.000398	0.710548
Mo	-0.06151	0.201572	0.945639	-0.00811
As	-0.20233	0.379126	0.40939	0.581819
Sb	0.022304	-0.03046	0.042067	0.865431
B	-0.26476	0.149606	0.136036	0.628964
U	-0.16877	0.612992	0.686442	0.053869
Cr	0.175857	0.855731	0.155947	0.220525
Ni	0.175745	0.076746	0.952601	0.042379
Co	0.885791	-0.22864	0.185123	0.181579
V	0.058063	0.82189	0.195198	-0.0756
方差贡献	4.159731	3.123033	3.068833	2.812463
累计方差贡献(%)	24.47	42.84	60.89	77.43

Cu砂岩亦可能是Pt、Pd、Ag等元素成矿的初始矿源。根据地质异常成矿理论^[9],可以推断在诸成矿因素最佳匹配的地段有可能形成具有工业意义的新类型的PGE矿化和Cu、Ag矿化。

2)滇东上震旦—下寒武统黑色岩系属封闭—半封闭的浅海还原环境(局限滞流盆地)下沉积的产物,物源较为复杂,既有多种母岩风化产生的陆源碎屑,也有热卤水及海底火山喷发—喷气带来的物质,是典型的“异源同生”产物^[8]。下寒武统黑色岩系浓集元素种类(PGE、Mo、V、Ag、As、U、B、Sb等)和强度皆大于元古宙黑色岩系;而Ni、Mo、V、U在上震旦—下寒武统黑色岩系中显著富集是其区别元古宙黑色岩系的一个重要的地球化学特征。故加强对该区沉积相和沉积环境地质异常的研究,就有可能在黑色页岩型铂族矿床勘查评价中取得突破性进展。

3)分布于研究区不同层位的黑色岩系和二叠纪峨眉山玄武岩建造构成了该区贵金属(Pt、Pd、Au)和有色金属(Cu)元素成矿的初始矿源层,上述区域成矿要素最佳匹配地段是可能产出新类型贵金属(Pt、Pd、Au)和有色金属(Cu)矿床的潜在地段。

参考文献(References):

- 成杭新,谢学锦,严光生,等.中国泛滥平原沉积物中铂、钯丰度值及其地球化学省的初步研究[J].地球化学,1998,27(2):101~107.
Cheng Hangxin, Xie Xuejin, Yan Guangsheng, et al. Platinum and palladium abundances in floodplain sediment and their geochemical provinces [J]. *Geochimica*, 1998, 27 (2): 101~107 (in Chinese with English abstract).
- 朱炳泉,常向阳,邱华宁,等.扬子地台西南缘滇中元古宇特征及赋存超大型矿床的可能性[A].见:涂光炽等编著.中国超大型矿床(1)[C].北京:科学出版社,2000.95~116.
Zhu Bingquan, Chang Xiangyang, Qiu Huaning, et al. Middle Proterozoic characteristics and ore forming possibility of super large deposits of middle Yunnan Province in western margin of Yangtze platform. In: Tu Guangzhi, et al (eds.). *Supperlarge Deposits in China (I)*. Beijing: Science Press, 2000. 95~116. (in Chinese with English abstract).
- 范德廉,张涛,叶杰,等.与黑色岩系有关的超大型矿床[A].见:涂光炽等编著.中国超大型矿床(1)[C].北京:科学出版社,2000.204~218.
Fan Delian, Zhangtao, Yejie, et al. Supperlarge deposits related to black shale. In: Tu Guangzhi, et al (eds.). *Supperlarge Deposits in China (I)*. Beijing: Science Press, 2000. 204~218 (in Chinese with English abstract).
- 陈永清,夏庆霖,刘红光.黑色页岩建造中的贵金属矿产评价研究[J].地球物理学进展,2003,18(2):261~268.
Chen Yongqing, Xia Qinglin, Liu Hongguang. Study on assessment of precious metals resources associated with black shales. *Progress in Geophysics*, 2003, 18(2): 325~332 (in Chinese with English abstract).
- 赫尔伯特 L J.铂族元素的地质环境[M].沈承珩,刘道荣译.北京:地质出版社,1991.101~107.
Hulbert L J. *Geological Environments of the Platinum Group Elements* (translated by Shen Chengyan and Liu Daorong) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991. 101~107 (in Chinese).
- 吴朝东,陈其英,杨承运.湘西黑色岩系沉积演化与含矿序列[J].沉积学报,1999,17(2):168~175.
Wu Chaodong, Chen Qiyong, Yang Chengyun. The black shale series and ore-bearing sequences of upper Sinian-lower Cambrian, southwest of China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17 (2): 168~175 (in Chinese with English abstract).
- 吴朝东,杨承运,陈其英.湘西黑色岩系地球化学特征和成因意义[J].岩石矿物学杂志,1999,18(1):26~39.
Wu Chaodong, Yang Chengyun, Chen Qiyong. The origin and geochemical characteristics of upper Sinian-lower Cambrian black shale in western Hunan [J]. *Acta Petrologica Minerologica*, 1999, 18 (1): 26~39 (in Chinese with English abstract).
- 范德廉,叶杰,杨瑞英,等.扬子地台前寒武—寒武纪界线附近的地质事件与成矿作用[J].沉积学报,1987,5(3):81~95.
Fan Delian, Yi Jie, Yang Ruiying, et al. The geological events and ore mineralization nearby the Precambrian-Cambrian boundary in Yangtze platform [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1987, 5 (3): 81~95 (in Chinese with English abstract).
- 李胜荣,高振敏.湘黔寒武系底部黑色岩系贵金属元素来源示踪[J].中国科学(D辑),2000,30(2):169~174.
Li Shengrong, Gao zhenmin. Trace on the original sources of precious metal elements of black shale at bottom of Cambrian in Hunan and Guizhou Provinces [J]. *Sciences in China(D)*, 2000, 30 (2): 169~174 (in Chinese).
- 李友川,张爱云.黔西南下三叠统金矿床有机地球化学特征及其成矿意义[J].地球化学,1997,26(4):36~43.
Li Youchuan, Zhang Aiyun. Organic geochemical features of gold deposit from lower Triassic in southwest Guizhou Province and their mineralization significance [J]. *Geochimica*, 1997, 26 (4): 36~43 (in Chinese with English abstract).
- Jr Coveney R M, Nansheng C. Ni-Mo-PGE-Au-rich ores in Chinese black shales and speculations on possible analogues in the United States [J]. *Mineral Deposita* 1991, 26: 83~88.
- 李昌年.四川攀西裂谷带峨眉山玄武岩的岩石学及其成因研究[J].地球科学——武汉地质学院学报,1986,11(6):577~584.
Li Changnian. Research on the petrology and its genesis of EMEI basalt of Panxi rift zone, Sichuan Province [J]. *Earth Science-Journal of Wuhan College of Geology*, 1986, (1): 577~584 (in Chinese with English abstract).
- 林建英.中国西南三省二叠纪玄武岩系的时空分布及其地质特征[J].科学通报,1985,30(12):929~932.
Lin Jianying. Time-space distribution and geological features of Permian basalt in Yunnan, Guizhou and Shichuan Provinces, China

- [14] 沈发奎. 攀西裂谷火山岩系某些成因特点的地球化学证据[J]. 地球化学, 1989, 2: 158~165.
Shen Fakui. Geochemical evidence for the petrogenesis of volcanic rocks in the Panzihua-Xichang ancient rift [J]. *Geochimica*, 1989, (2): 158~165 (in Chinese with English abstract).
- [15] 杨瑞瑛, 黄忠祥, 李继亮. 攀西裂谷火成岩组合的微量元素地球化学[J]. 中国科学[B]. 1985, 15(9): 844~854.
Yang Ruiying, Huang Zhongxiang, Li Jiliang. Geochemistry of microelements on magma rocks in Panxi rift in Shichuan Province [J]. *Sciences in China (series B)*. 1985, 15(9): 844~854 (in Chinese).
- [16] 刘朝基, 曾绪伟, 金久堂, 等. 康滇地区基性超基性岩[M]. 重庆: 重庆出版社, 1988. 227~231.
Liu Chaoji, Zeng Xunwei, Jin Jiutang, et al. Basic-ultrabasic Rocks in the Kangdian Region, Southwestern China [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1988. 227~231 (in Chinese with English abstract).
- [17] 梁有彬, 李艺. 中国铂族元素矿床类型和地质特征[J]. 矿产与地质, 1997, 11(3): 145~151.
Liang Youbin, Li Yi. Genetic types and geological characteristics of platinum group element deposits in China [J]. *Mineral Resources and Geology*, 1997, 11 (3): 145~151 (in Chinese with English abstract).
- [18] 涂光炽. 贵金属找矿中若干问题的讨论[A]. 见: 陈毓川主编. 当代矿产资源勘查评价的理论与方法 [C]. 北京: 地震出版社, 1999., 186~191.
Tu Guangzhi. Discussion on a series of problems of precious metal exploration [A]. In: Chen Yuchuan (ed.). *On Modern Theories and Methods on Exploration and Assessment* [C]. Beijing: Seismological Press, 1999. 186~191 (in Chinese with English abstract).
- [19] 赵鹏大, 陈永清, 刘吉平, 等. 地质异常成矿预测理论与实践[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. 138.
Zhao Pengda, Chen Yongqing, Liu Jiping, et al. *Theory and Practice of Geoanomaly in Mineral Exploration* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999. 138 (in Chinese with English abstract).
- [20] Wedepohl K H. The composition of the continental crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(7): 1217~1232.
- [21] 南京大学地质学系. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1979. 514.
Department of Geology, Nanjing University. *Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 1979. 514.

Geochemical characteristics of Pt-Pd-Cu ore-bearing formations in eastern Yunnan and analysis of their ore potentiality

CHEN Yong-qing¹, XIA Qing-lin², LIU Hong-guang³

(1. *Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China;*

2. *Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei China;*

3. *National Geological Library, Beijing 100083, China*)

Abstract: Pt-Pd-Cu ore-bearing formations in eastern Yunnan include the black shale ore-bearing formation and basalt ore-bearing formation. The authors mainly made a systematic study of the geochemical characteristics of the Proterozoic Kunyang Group, Lower Cambrian black rock series and Permian Emeishan basalt. Study shows the followings: (a) the black rock series of the Proterozoic Kunyang Group is characterized by significant enrichment of As and B ($K \geq 5$) and enrichment of Sb, Pd, Mo, Ag, U, Pt, V, Zn, W and Cu ($K \geq 1.2$); (b) the Lower Cambrian black rock series is characterized by significant enrichment of Mo, Ag, U, As, V, B, Pd and Sb ($K \geq 5$) and enrichment of Pt, Pb, Zn, W, Cu and Ni ($K \geq 1.2$); (c) the Permian Emeishan basalt is characterized by significant enrichment of Pt and Pd ($K \geq 5$) and enrichment of Au, Ag, Cu, Zn, Sb, B, U and V ($K \geq 1.2$). In conclusion, the black rock formation and Permian Emeishan basalt distributed at different horizons in the study area form the primary ore source bed of noble metal elements (Pt, Pd, Ag, Au etc.) and nonferrous metal elements (Cu, Mo, V etc.) in eastern Yunnan Province. The areas that are best coupled by the above-mentioned regional ore-forming factors may be regarded as the potential areas where nontraditional ore deposits of noble metals (Pt, Pd, Ag, Au etc.) and nonferrous metals (Cu, Mo, V etc.) possibly occur.

Key words: black shale formations; Permian Emeishan basalt; nontraditional Pt-Pd-Cu deposits; eastern Yunnan