

云南德泽下寒武统黑色岩系中 Ni-Mo-V-PGE 多金属矿化

夏庆霖^{1,2,3}, 赵鹏大^{2,3}, 陈永清¹, 成秋明^{2,3}, 周云满^{1,4}

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

4. 云南省地矿资源股份有限公司, 云南昆明 650011

摘要: 云南省德泽地区筇竹寺组黑色岩系位于扬子陆块南缘下寒武统黑色页岩分布带的西端, 不同于该带中段湘黔地区的牛蹄塘组, 它发育有两个多金属富集层位, 其中, 石岩头段黑色碳质粉砂岩底部富集 V、U、Ag 和 Pd, 玉案山段黑色页岩底部富集 Mo、Ni、Pt 和 Pd。筇竹寺组黑色岩系整体上富集 V-Ni-Mo-U-Ag-Pt-Pd, 而牛蹄塘组黑色岩系则富 Ni-Zn-Co-Pt-Pd-Ag-Pb, 但它们都经历了相似的缺氧环境, 且具有相同的 PGE 和 Ni、Mo 富集机制, 是一种重要的非传统矿产资源类型。

关键词: 黑色岩系; 下寒武统; 多金属矿化; 云南德泽。

中图分类号: P624

文章编号: 1000-2383(2008)01-0067-07

收稿日期: 2007-04-28

Ni-Mo-V-PGE Mineralization in the Lower Cambrian Black Shale Series from the Deze Area, Yunnan Province, Southwest China

XIA Qing-lin^{1,2,3}, ZHAO Peng-da^{2,3}, CHEN Yong-qing¹, CHENG Qiu-ming^{2,3}, ZHOU Yun-man^{1,4}

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Geology Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Yunnan Geology and Mineral Resources Ltd., Kunming 650011, China

Abstract: The Qiongzhusi Formation black shale series of the Deze area are located in the western part of the Lower Cambrian black shale zone widely distributed along the southern margin of the Yangtze block, SW China. Different from the Niutitang Formation of black shale in Hunan and Guizhou provinces, the Qiongzhusi Formation contains two distinct metal-rich layers, with V, U, Ag and Pd enriched in the bottom of black carbonaceous siltstones of the lower Shiyantou Section, and Mo, Ni, Pt and Pd in the bottom of black shales of the Yuanshan Section. In general, the Qiongzhusi Formation is characterized by the enrichment of V-Ni-Mo-U-Ag-Pt-Pd assemblages, whereas the Niutitang Formation is featured with the enrichment of Ni-Zn-Co-Pt-Pd-Ag-Pb association. However, both areas share similar depositional and diagenetic environment (oxegen-reduction) and have similar mechanism for Ni-Mo-PGE mineralization. Ni-Mo-V-PGE mineralization in black shale series is an unconventional type of mineral resources, and it is of great importance to the deposit study and mineral exploitation.

Key words: black shale series; Lower Cambrian; polymetallic mineralization; the Deze area of Yunnan Province.

黑色岩系中含铂族元素多金属富集现象受到中外学者的广泛关注, 尤其是俄罗斯干谷和波兰蔡西斯坦等具有工业意义的黑色页岩型铂族矿床的发现, 使得此类非传统矿产资源的研究成为热点。

基金项目: 地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金(No. MGMR2002-13); 地质调查项目(No. 200310200082)。

作者简介: 夏庆霖(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事矿产资源勘查与评价的教学与科研工作。E-mail: qlxia@cug.edu.cn

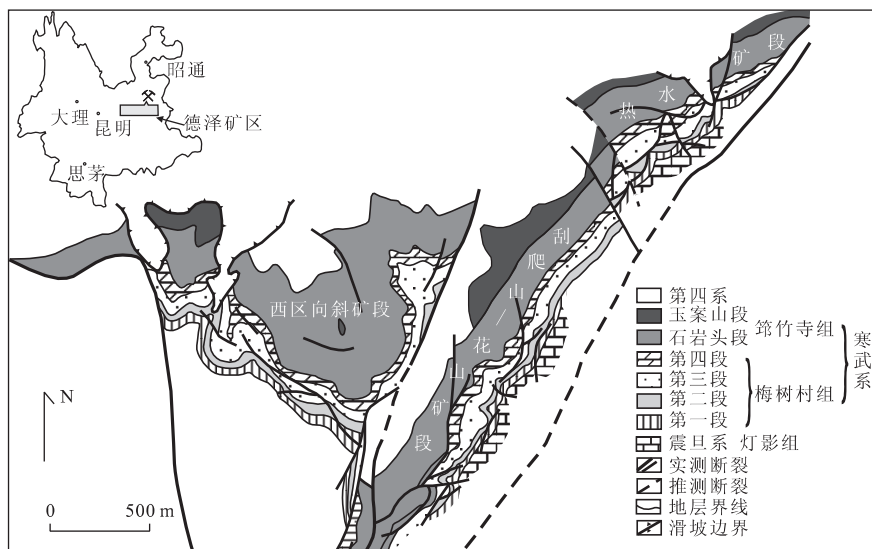


图 1 德泽矿区地质简图(据原云南省地质局第六地质队资料修改,1973^①)

Fig. 1 Sketch map of geology in the Deze area

Pašava(1991)指出:“PGE 在非常规环境中的产出,促进了非常规勘查概念的发展。”陈永清等(2003)和夏庆霖等(2003)在云南省东部地区 Pt、Pd 地球化学勘查中发现与下寒武统黑色岩系出露有关的化探异常。我国扬子陆块南缘广泛发育下寒武统黑色岩系,其中赋存有磷矿、REE、Ni、Mo、V、U、PGE、Au、Ag 等矿化,其地理分布包括滇东、川黔桂邻接区、湘鄂、皖浙赣等地区。研究表明,早寒武世全球发生了一次较大规模的缺氧事件(范德廉等,1987;李胜荣和高振敏,2000),而与之关系密切的 Ni-Mo-V-PGE 多金属矿化值得在矿产勘查中进一步重视。

1 地质背景

德泽 Ni-Mo-V-PGE 矿位于沾益县西北,大地构造位置属扬子陆块西南缘,由西区向斜矿段、刮爬山—花山矿段和热水矿段组成(图 1)。20 世纪 70 年代,原云南省地质局第六地质队曾经就下寒武统笋竹寺组黑色页岩建造中的镍、钼、钒资源做过勘探工作,共提交 Ni 储量约 4 800 t、Mo 储量约 2 700 t、V₂O₅ 储量约 83 600 t,但当时未能认识到其含铂性问题,至今约 5 000 tV₂O₅ 已经被开采。

德泽矿区出露地层由老到新为上震旦统灯影组白云岩,下寒武统梅树村组第一岩性段浅色硅质岩夹含磷透镜体、第二岩性段薄层白云岩夹磷结核、第

三岩性段磷块岩和第四岩性段白云岩,笋竹寺组石岩头段黑色碳质粉和深灰色粉砂岩、玉案山段黑色页岩、杂色页岩夹砂岩,以及第四系。西区为宽缓向斜,而东区则为单斜岩层。区内断裂构造发育,边界出露有规模较大的同生断层,控制了地层沉积,此外,后期发育的小断裂较多,主要为 NW 向、其次为 NE 向。梅树村组中的沉积型磷矿还伴生有稀土矿,现多为民采。

2 样品与分析方法

对德泽黑色岩系地层中采集了黑色碳质页岩、黑色碳质泥质粉砂岩等样品 26 件,碎至 200 目,并在武汉地质实验室采用浓集化学光谱(C-OES)、X 射线荧光光谱(XRF)、电感耦合等离子发射光谱(ICP-AES)等进行了全岩样品分析,测试内容包括 Pt、Pd、Au(C-OES),Ag、B(OES),As、Sb(AF),Cu、Zn、Co、Ni、V(ICP-AES),Pb、Cr、SiO₂、CaO、MgO、Al₂O₃(XRF),W、Mo(极谱),U(激光荧光光度法),Corg(容量法)等 22 种微量元素和化学成分。其中 C-OES 的 Pt 和 Pd 分析单样重为 10 g,经理论盐酸、过氧化氢溶样,以及活性炭富集后,采用 WP-I 型 1 m 平面光栅摄谱仪,交流电弧(电流强度 12~15A),使用小孔电极,曝光时间在 15~20 s 完成摄谱。Pt 和 Pd 的检出限均为 0.3 ng/g。

①云南省地质局第六地质队,1973. 云南省沾益县德泽镍钼钒矿床勘探报告(内部资料)。

表 1 德泽地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系微量元素平均含量

Table 1 Trace element average contents of the Qiongzhusi Formation black shale series in the Deze area																	
参数	Pt	Pd	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Mo	As	Sb	B	U	Cr	Ni	Co	V
$\bar{X}$	3.65	4.70	3.89	1.25	65.15	33.30	110.79	1.52	162.05	132.85	5.68	86.85	104.35	104.13	81.28	12.34	929.6
S	4.44	3.84	4.28	2.02	64.12	21.20	124.32	0.27	317.95	210.82	9.69	35.94	164.53	72.78	82.94	11.67	1077.1
K	9.13	11.75	1.56	17.88	2.61	2.25	1.70	1.52	147.32	78.15	18.92	7.90	61.38	0.83	1.45	0.51	9.49
陆壳丰度 ^①	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:①据 Wedepohl(1995);Pt、Pd、Au 单位为 $\eta\text{g/g}$,其余元素为 $\mu\text{g/g}$; $\bar{X}$ 为均值,S 为标准差,K 为浓集系数.

表 2 成矿元素及部分常量元素在下寒武统不同类型岩石中的平均含量

Table 2 Some main and metallogenic element average contents of various rocks at Lower Cambrian								
岩石类型(样品数)	Pt+Pd	Au	Ag	Cu	Ni	Mo	V	U
黑色碳质页岩(12)	10.21	4.54	2.05	72.27	58.66	241.4	759.5	163.1
黑色碳质泥质粉砂岩(14)	4.86	2.31	0.97	49.81	84.17	48.23	829.7	27.34
岩石类型(样品数)	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	C _{有机}	m	CaO/MgO	(Al+Si)/(Ca+Mg)
黑色碳质页岩(6)	62.12	1.2	2.29	14.77	3.41	15.38	0.53	28.45
黑色碳质泥质粉砂岩(8)	48.54	3.1	0.89	13.09	3.25	7.74	20.65	53.14

注:Pt+Pd、Au 单位为 $\eta\text{g/g}$;Ag、Cu、Ni、Mo、V、U 单位为 $\mu\text{g/g}$;SiO₂、CaO、MgO、Al₂O₃、C_{有机} 单位为 $\text{wt}\%$.

3 结果

德泽地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系微量元素平均含量如表 1 所示,其中,Pt、Pd、Ag、Mo、As、Sb、B、U、V 显著富集($K\geq 5$),Au、Cu、Pb、Zn、W、Ni 富集($K\geq 1.2$),Co 亏损($K\leq 0.8$). Pd/Pt 为 1.28,大于陆壳的钯铂比值($\text{Pd/Pt}=1.0$). 其微量元素浓集序列($K\geq 1.2$)为:Mo→As→U→Sb→Ag→Pd→V→Pt→B→Cu→Pb→Zn→Au→W→Ni. 筇竹寺组黑层 Pt+Pd 的平均含量为 8.35 $\eta\text{g/g}$,是陆壳丰度的 10.4 倍;Ag 的含量为 1.25 $\mu\text{g/g}$,约是陆壳丰度的 18 倍;而 Mo、As、U、V 分别约为陆壳丰度的 147 倍、98 倍、61 倍和 9 倍.

筇竹寺组黑色岩系不同类型岩石的微量元素的富集程度不同(表 2),其中,Pt+Pd 相对富集(黑色碳质页岩达到 10.21 $\eta\text{g/g}$,黑色碳质泥质粉砂岩为 4.86 $\eta\text{g/g}$);Ag 有不同程度的富集,以黑色碳质页岩较高(2.05 $\mu\text{g/g}$);Ni 则在黑色碳质泥质粉砂岩中相对富集(84.17 $\mu\text{g/g}$);V 在黑色碳质泥质粉砂岩和黑色碳质页岩显著富集(分别为 829.7 $\mu\text{g/g}$ 和 759.5 $\mu\text{g/g}$);Mo、U 亦均有富集(黑色碳质页岩 Mo 为 241.4 $\mu\text{g/g}$ 、U 为 163.1 $\mu\text{g/g}$,黑色碳质泥质粉砂岩 Mo 为 48.23 $\mu\text{g/g}$ 、U 为 27.34 $\mu\text{g/g}$);Au 则在黑色碳质页岩略为富集;此外,黑色页岩的有机碳含量略高于黑色粉砂岩.

4 结论与讨论

4.1 下寒武统黑色岩系沉积环境及多金属富集机制

德泽地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系相对富集 Pt、Pd、Mo、U、As 和 V 等元素,且多金属元素富集成矿的有利部位都位于每一黑色岩系层位的底部,其中,钒银铀矿层位于石岩头段下部中厚、厚层状黑色碳质粉砂岩夹碳质泥岩(又称“下黑层”)的底部,厚度约几至几十厘米. 钒银铀矿层的平均厚度 2.07 m,长约 6.5 km,平均含量:V₂O₅ 为 1.0%,U 为 0.01%,Ag 为 5~13 $\mu\text{g/g}$,Pt+Pd 为 0.015 $\mu\text{g/g}$,常见石墨化及黄铁矿化. 镍钼矿层位于玉案山段下部黑色薄层碳质铁锰质水云母页岩(即“上黑层”)的底部,厚度约几至几十 cm. 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. 矿体平均厚度 1.21 m,长 4.5 km. 矿石平均含量:Mo 为 0.1%,Ni 为 0.14%,U 为 0.03%,Pt+Pd 为 0.03 $\mu\text{g/g}$ 等. 镍钼矿层与下伏石岩头段粉砂岩接触面有一层厚约十几厘米的富铁沉积,现已褐铁化. 镜下研究表明:黑色碳质页岩主要由长英质矿物碎屑、石墨及有机碳等组成,金属矿物常见黄铁矿,黄铁矿可分为两类——一类为原生沉积成因的“草莓状”黄铁矿和稀疏分布的它形细粒状黄铁矿,另一类则为沿微裂隙充填的后生成因黄铁矿——多数已经被氧化形成针铁矿(图 2). 整个下黑层的 V、Ni、Pd、U、

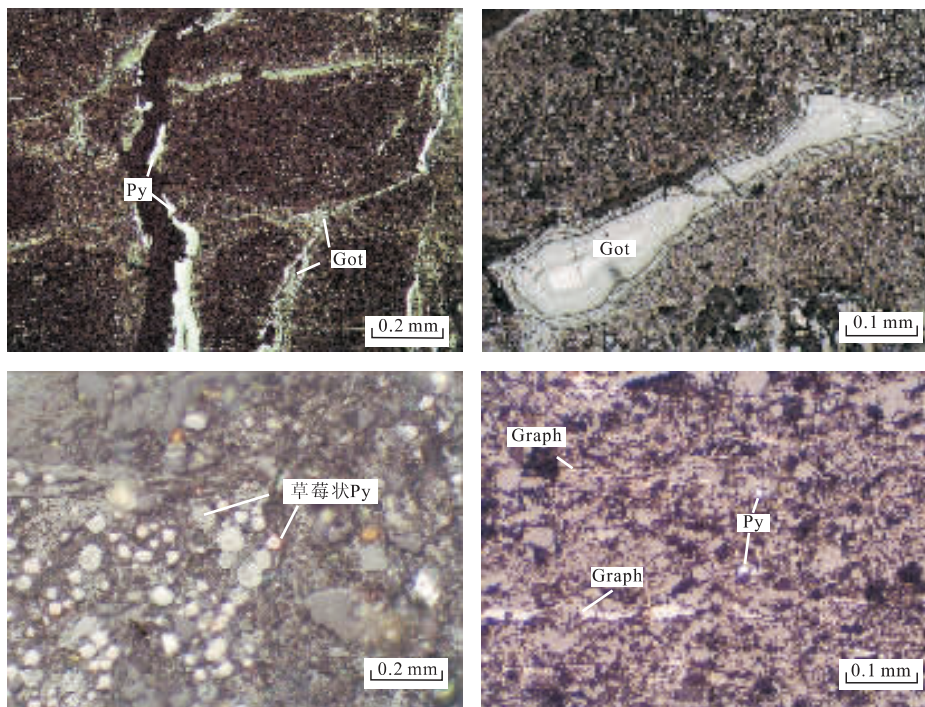


图 2 德泽筇竹寺组黑色页岩光片显微照片

Fig. 2 Photographs of polished samples from the Qiongzhusi Formation black shale in the Deze area

Py. 黄铁矿; Got. 针铁矿; Graph. 石墨

Ag 和有机碳的含量较高,而上黑层的 Mo、Ni、Pt、Pd、U、Ag 和有机碳含量均较高(图 3)。

Pašava *et al.* (2003)运用地幔丰度对金属元素进行标准化来研究和区分世界不同地区的含铂黑色岩系,籍此说明不同地区、不同时代黑色岩系金属分布模式的差异。下寒武统筇竹寺组黑色岩系的微量元素标准化分布模式如图 4 所示。U、Ag 组成两个明显的波峰(U 最高值达到 33 445, Ag 最高值达到 1 000), Cr、Ni、Co 则为一个宽缓的波谷,(Cr、Ni、Co 多小于 0.2, Cr 和 Ni 最低值均为 0.012), Pt、Pd、Au、Cu 多数分布在 0.1~10 之间, V 在 1~100 之间。

德泽地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系的镁铝含量比值($m = 100 \times \text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$)为 1.6~24.1, 其中,下黑层平均 7.74,属于滨海相沉积环境,上黑层平均 15.38,属于(浅)海相沉积环境(表 2)。从梅树村期到筇竹寺期,研究区的海水有变浅的趋势。

综上所述,下寒武统梅树村组和筇竹寺组具有硅质岩、硅质条带等热水沉积特征,且发育有磷块岩层、钒矿层及镍钼多元素富集层,其中,钒在下寒武统黑色岩系中广泛分布,在区域性成磷作用之前就开始了钒的沉积成矿作用,即代表海平面上升的初期和海平面快速上升的开始,但是钒的聚集成矿期

则在磷矿和镍钼矿层形成之后(刘宝珺等,1993)。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,在缺氧环境下形成了下寒武统黑色碳质页岩及粉砂岩泥岩建造,其分布范围较广,在相邻省份的地层研究中也得到了记实(范德廉等,1987;张爱云等,1987;李胜荣和高振敏,1995;杨家骥,1995)而下寒武统中金属的富集则可能与同生沉积作用和后生改造作用有关。

4.2 筇竹寺组黑色岩系与牛蹄塘组黑色岩系对比

1987 年第 254 项国际地质对比计划“含金属黑色页岩”的启动,促进了中国南方黑色页岩建造的研究进程(Coveney and Nan, 1991; Pašava *et al.*, 2003; Ponavic *et al.*, 2004)。广泛分布于湖南、贵州等地的下寒武统牛蹄塘组含铂黑色岩系其研究程度相对较高(范德廉等,1987, 2000, 2004; 张爱云等, 1987; 李胜荣和高振敏, 1995, 2000),通过开展筇竹寺组与牛蹄塘组黑色岩系的对比研究,有利于提高对滇东地区下寒武统黑色页岩的认识。宏观上,筇竹寺组与牛蹄塘组皆位于扬子地块南缘陆表海沉积环境,同样经历了早寒武世全球缺氧事件。Mao *et al.* (2002)在贵州遵义黄家湾下寒武统黑色岩系 Ni-

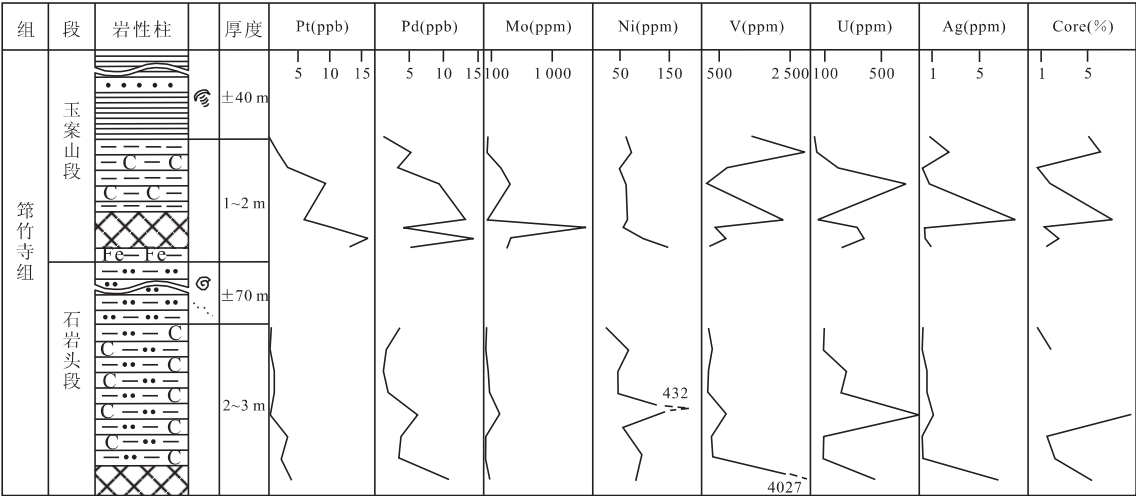


图 3 德泽下寒武统筇竹寺组黑色页岩微量元素分布模式

Fig. 3 Distribution pattern of trace elements for the Qiongzhusi Formation black shale in the Deze area

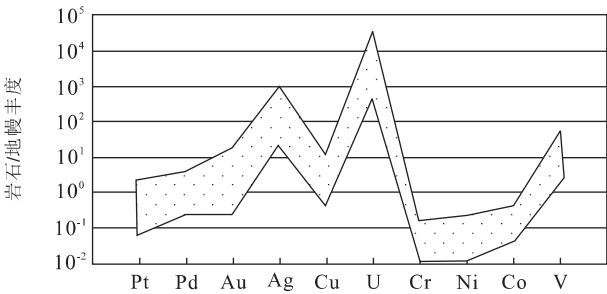


图 4 筇竹寺组黑色岩系微量元素地幔标准化模式
Fig. 4 Mantle-normalized pattern for the Qiongzhusi Formation black shale series

Mo-PGE-Au 矿床研究中得到的 (541 ± 16) Ma (Os-Re) 矿化年龄, 与李胜荣等 (2002) 在黔北中南村和湘西柑子坪等地下寒武统黑色岩系得到的 (542 ± 11) Ma (Os-Re) 铂元素矿化年龄十分相近, 指示 PGE 初始富集与沉积作用几乎是在相近的时间同时进行的, 且玄武质地壳可能是牛蹄塘组黑色岩系多金属富集层中 PGE、Ni、Mo 等微量元素的最主要来源。

牛蹄塘组黑色岩系的岩性演化序列自下而上为: 下硅质岩→磷块岩→金属富集层→上硅质岩→薄层状黑色页岩→厚层状黑色页岩, 且牛蹄塘组与下伏震旦系灯影组白云岩直接接触。近年来研究表明, 牛蹄塘组黑色岩系具有热水—正常海水混合沉积特征, 其中, 下硅质岩属纯热水沉积岩 (李胜荣和高振敏, 1995)。牛蹄塘组生物黑色页岩、黑色碳质泥岩中发现丰富的海绵动物、大型节肢动物及藻类化

石, 属于牛蹄塘生物群, 其时代稍早于澄江动物群。
筇竹寺组黑色岩系岩性演化序列自下而上为: V、Mo 矿化灰黑色含碳质粉砂岩→深灰色中厚层状白云质粉砂岩、粉砂质泥岩→含 Ni、U 黑色碳质页岩→灰绿色、黄绿色页岩夹细粒长石砂岩薄层。筇竹寺组下部与之整合接触的梅树村组的岩性演化序列自下而上则为: 硅质岩→灰色薄层状白云岩夹含磷条带→磷块岩→白云岩、白云质灰岩夹泥岩薄层和磷硅质结核。梅树村组下伏地层为震旦系灯影组。梅树村组和筇竹寺组为浅海沉积, 同时具有热水沉积的特征。筇竹寺组生物化石包括三叶虫、介形类、海绵动物及藻类等, 属于澄江动物群。

通过地层层位、岩性、古生物等方面的对比研究, 筇竹寺组加上梅树村组在层位上大致与牛蹄塘组相当 (图 5), 均含有硅质岩、磷块岩、黑色页岩及多金属富集层, 但存在一些差异: (1) 如筇竹寺组的多金属富集层是两层, 并分别位于石岩头段和玉案山段黑色岩系 (即上、下黑层) 的底部, 而牛蹄塘组的多金属富集层仅为一层, 位于磷块岩与上硅质岩之间; (2) 牛蹄塘组黑色泥岩中见镇巴虫等大型三叶虫, 而筇竹寺组则为红井哨虫等大尾型三叶虫, 产于牛蹄塘组 Ni-Mo 多金属富集层之上的风化高碳黑色泥岩里的大量海绵动物中许多属种也出现在筇竹寺组, 但牛蹄塘组以六射海绵为主; (3) 牛蹄塘组黑色岩系以富 Ni-Zn 为特征, Ni、Zn、Co、Pt、Pd、Ag、Pb、Sb、Au 及有机碳平均含量高于筇竹寺组, 相比之下, 筇竹寺组以富 V-U 为特征, V、U、Cr、Mo、As、Cu 平均含量高于牛蹄塘组。

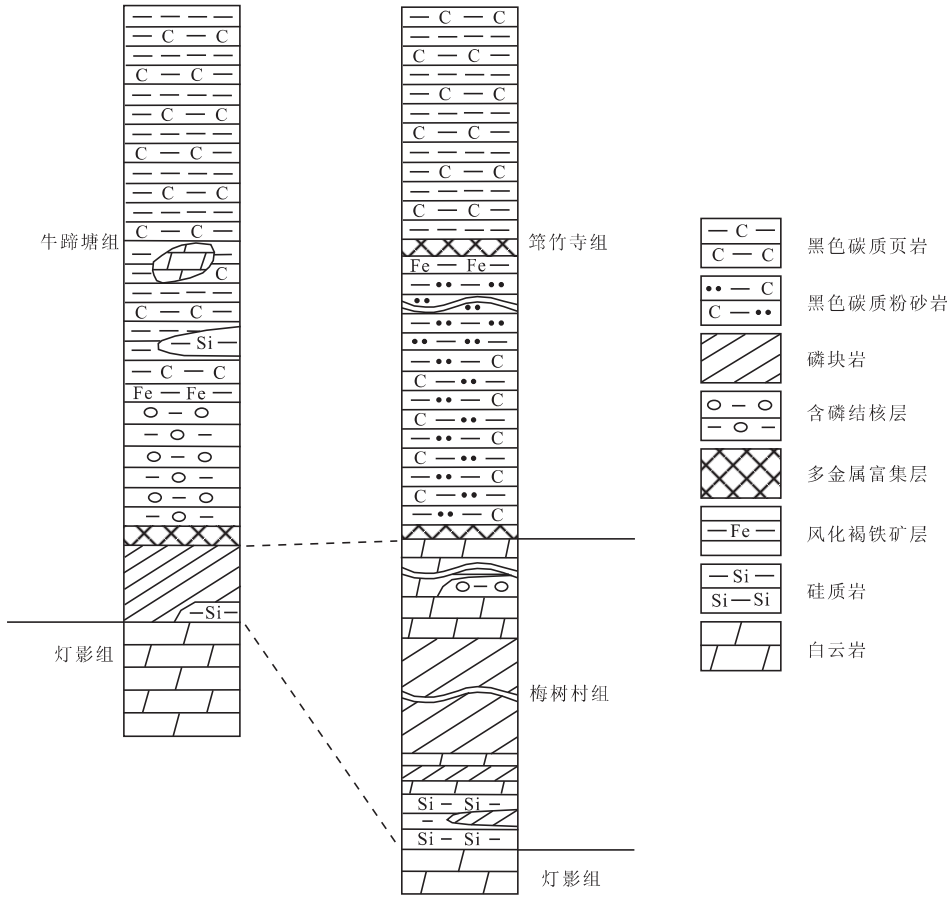


图 5 筇竹寺组与牛蹄塘组岩性对比示意图(牛蹄塘组黑色岩系柱状图据李胜荣和高振敏,1995)
Fig. 5 Lithological correlation between the Qiongzhusi Formation and Niutitang Formation

总言之,筇竹寺组与牛蹄塘组具有一定的可比性,它们都经历了相似的缺氧环境,且具有相同的PGE和Ni、Mo富集机制,是一种重要的非传统矿产资源类型。Wilde *et al.* (2003)在题为“Pt和Pd非常规矿床:对勘查影响的评述”的文章中,总结了包括我国华南地区在内的全球主要非常规铂族矿床的分布和矿床特征,提出非常规(非传统)矿床对现代矿产勘查工作的促进和影响。加强对扬子陆块南缘下寒武统黑色岩系中Ni-Mo-V-PGE等多金属矿化的研究无疑具有重要的理论和实践意义。

References

Chen, Y. Q., Xia, Q. L., Liu, H. G., 2003. Geochemical characteristics of the platinum-Pd-Cu-bearing formations in the eastern Yunnan Province and analyses on their ore-forming possibility. *Geology in China*, 30(3): 225—234 (in Chinese with English abstract).
Coveney, J. R. M., Nan, S., 1991. Ni-Mo-PGE-Au-rich ores in Chinese black shales and speculations on possible analogues

in the United States. *Mineral Deposita*, 26: 83—88.
Fan, D. L., Ye, J., Yang, R. Y., et al., 1987. The geological events and ore mineralization nearby the Precambrian-Cambrian boundary in Yangtze platform. *Acta Sedimentologica Sinica*, 5(3): 81—95 (in Chinese with English abstract).
Fan, D. L., Zhang, T., Ye, J., et al., 2000. Supperlarge deposits related to black shale. In: Tu, G. Z., ed., *Supperlarge deposits in China*(I). Science Press, Beijing, 204—218 (in Chinese).
Fan, D. L., Zhang, T., Ye, J., et al., 2004. Black rock series and its' mineral deposits in China. Science Press, Beijing, 76—135 (in Chinese).
Li, S. R., Gao, Z. M., 1995. REE characteristics of black rock series of the Lower Cambrian Niutitang Formation in Hunan-Guizhou Province, China, with a discussion on the REE patterns in marine hydrothermal sediments. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(2): 225—229 (in Chinese with English abstract).
Li, S. R., Gao, Z. M., 2000. Trace on the original sources of

- precious metal elements of black rock series of Lower Cambrian in Hunan-Guizhou Provinces, China. *Science in China (Ser. D)*, 30(2):169—174 (in Chinese).
- Li, S. R., Xiao, Q. Y., Shen, J. F., et al., 2002. The original sources of platinum group elements and mineralization age of Re-Os isotope restricted of Lower Cambrian in Hunan-Guizhou Province, China. *Science in China (Ser. D)*, 32(7):568—575 (in Chinese).
- Liu, B. J., Xu, X. S., Pan, X. N., et al., 1993. The evolution and mineralization of sedimentary crust of south paleo-continent, China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Mao, J. W., Lehmann, B., Du, A. D., et al., 2002. Re-Os dating of polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Lower Cambrian black shales of South China and its geologic significance. *Economic Geology*, 97:1051—1061.
- Pašava, J., 1991. Comparison between the distribution of PGE in black shales from the Bohemian Massif (CSFR) and other black shale occurrences. *Mineral Deposita*, 26:99—103.
- Pašava, J., Sarah, J., Vymazalová, A., 2003. The use of mantle normalization and metal ratios in the identification of the sources of platinum-group elements in various metal-rich black shales. *Mineralium Deposita*, 38:775—783.
- Ponavic, M., Pašava, J., Anna, V., et al., 2004. Impact of Lower Cambrian black shales and exploited Mo-Ni black shale-hosted deposits on the trace element composition of soils and crop plants in the Zunyi region, Guizhou Province, South China. 32nd IGC.
- Wedepohl, K. H., 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7):1217—1232.
- Wilde, A., Edwards, A., Yakubchuk, A., 2003. Unconventional deposits of Pt and Pd: A review with implications for exploration. *SEG Newsletter*, 52:1, 9—18.
- Xia, Q. L., Zhao, P. D., Chen, Y. Q., 2003. Platinum and palladium geochemical exploration and anomaly evaluation, eastern Yunnan Province, China. *Geological Bulletin of China*, 22(9):704—707 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. L., Xu, S. Q., Xiao, S. Y., et al., 1995. Sequence division of Cambrian System of the boundary area among Sichuan, Guizhou and Hunan Provinces. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(5):485—495 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, A. Y., Wu, D. M., Guo, L. N., et al., 1987. Geochemistry and minerogenic significance of marine black shale. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, G. D., Mao, J. W., Xiong, Q. Y., 2001. The present situation and prospects of platinum metals resources in China. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(2):107—110 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈永清, 夏庆霖, 刘红光, 2003. 滇东 Pt-Pd-Cu 含矿建造地球化学特征及其含矿性分析. *中国地质*, 30(3):225—234.
- 范德廉, 叶杰, 杨瑞英, 等, 1987. 扬子地台前寒武—寒武纪界线附近的地质事件与成矿作用. *沉积学报*, 5(3):81—95.
- 范德廉, 张涛, 叶杰, 等, 2000. 与黑色岩系有关的超大型矿床. 见: 中国超大型矿床(I). 涂光炽著. 北京: 科学出版社, 204—218.
- 范德廉, 张涛, 叶杰, 等, 2004. 中国的黑色岩系及其有关矿床. 北京: 科学出版社, 76—135.
- 李胜荣, 高振敏, 1995. 湘黔地区牛蹄塘组黑色岩系稀土特征——兼论海相热水沉积岩稀土模式. *矿物学报*, 15(2):225—229.
- 李胜荣, 高振敏, 2000. 湘黔寒武系底部黑色岩系贵金属元素来源示踪. *中国科学(D辑)*, 30(2):169—174.
- 李胜荣, 肖启云, 申俊峰, 等, 2002. 湘黔下寒武统铂族元素来源与矿化年龄的 Re-Os 同位素制约. *中国科学(D辑)*, 32(7):568—575.
- 刘宝珺, 许效松, 潘杏南, 等, 1993. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿. 北京: 科学出版社.
- 夏庆霖, 赵鹏大, 陈永清, 2003. 滇东铂、钯地球化学勘查及异常评价. *地质通报*, 22(9):704—707.
- 杨家骥, 徐世球, 肖诗宇, 等, 1995. 川黔湘交界寒武纪层序划分. *地球科学——中国地质大学学报*, 20(5):485—495.
- 张爱云, 伍大茂, 郭丽娜, 等, 1987. 海相黑色页岩建造地球化学与成矿意义. 北京: 科学出版社.
- 张光弟, 毛景文, 熊群尧, 2001. 中国铂族金属资源现状与前景. *地球学报*, 22(2):107—110.