

贵州普安矿区晚二叠世煤中贵金属元素的 赋存状态和地质成因

杨建业

西安科技大学,陕西西安 710054

摘要 运用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)和逐级化学提取技术(SCET)对贵州西部普安矿区晚二叠世煤中贵金属元素的含量、赋存状态和成因机理进行了研究。结果表明,贵州普安矿区2号主采煤层的矿物组成主要为低温热液流体成因的黄铁矿和陆源碎屑成因的粘土矿物;与中国煤炭相比,该煤中Rh(38 ng/g)、Pd(640 ng/g)、Ir(9 ng/g)、Pt(98 ng/g)、Au(16 ng/g)和Ag(1620 ng/g)明显富集,其中Pd、Ir、Au的含量分别是中国煤的4.3倍、9倍和5.3倍。逐级化学提取结果表明,2号煤层中所富集的贵金属元素主要赋存在硫化物结合态中,Rh、Pd、Ir、Pt、Au和Ag在硫化物态中的含量分别为720 ng/g、15000 ng/g、310 ng/g、2380 ng/g、360 ng/g、32300 ng/g,而以有机态和硅铝化合物结合态存在的贵金属元素含量低于或接近于这些元素在煤中的背景值,表明低温热液流体对煤中贵金属元素的富集起了决定作用。

关键词 煤, 贵金属元素, 赋存状态, 黄铁矿, 低温热液流体

Modes of Occurrence and Geological Origins of Noble Metal Elements in Late Permian Coals from the Pu'an Coalfield, Guizhou Province

YANG Jianye

Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054

Abstract The concentrations, modes of occurrence, and origins of noble metal elements in Late Permian coals from the Pu'an coalfield were studied by using inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS) and sequential chemical extraction technology (SECT). The results show that the minerals in No. 2 coal seam of the Pu'an coalfield are dominated by pyrite of low-temperature hydrothermal origin and clay minerals of detrital terrigenous origin. Compared with coals of China, Rh (38 ng/g), Pd (640 ng/g), Ir (9 ng/g), Pt (98 ng/g), Au (16 ng/g), and Ag (1620 ng/g) are significantly high in No. 2 coal seam. The concentrations of Pd, Ir, and Au in No. 2 coal seam are 4.3, 9, and 5.3 times higher than those in coals of China, respectively. The SECT results indicate that the noble metals concentrated in No. 2 coal seam mainly exist in the sulfide association state. The concentrations of Rh, Pd, Ir, Pt, Au, and Ag in the sulfide association are 720 ng/g, 15000 ng/g, 310 ng/g, 2380 ng/g, 360 ng/g, and 32300 ng/g, respectively. However, the concentrations of noble metals occurring in organic and silicate associations were lower than or close to their background values in coal. The low-temperature hydrothermal fluids must have played a dominant role in the enrichment of noble metals in the coal.

Key words coal, noble metal elements, mode of occurrence, pyrite, low-temperature hydrothermal fluid

由于铂族元素和金、银金属具有在高温条件下 能保持化学稳定性、优良的催化性能以及难溶等特

本文由国家重点基础研究发展计划(编号:2006CB202201)、陕西省教育厅自然科学基金项目(编号:DK01jk145)和陕西科技厅自然科学基金项目(编号:2004D02)联合资助。

责任编辑:刘志强;收稿日期:2006-11-15;;改回日期:2006-12-20;。

第一作者简介:杨建业,男,1960年生,博士,教授,从事煤地球化学方面的研究;通讯地址:710054,陕西省西安市雁塔中路58号;E-mail: yangjy@xust.edu.cn。

殊性质,已经成为现代工业急需的贵重物资。铂族元素在自然界中通常以自然金属、硫化物、金属互化物和砷化物的形式存在(刘英俊等,1988),它们的原生富集一般与镁铁、超镁铁岩有成因联系,有时也伴生在与基性、超基性岩有关的铬铁矿、钒钛磁铁矿床中。研究煤中有益元素(包括铂族元素、金、银、镓、铀、锆等)等的含量、富集和成因,不仅可以为煤层的形成提供地球化学依据,而且对研发新型的矿床资源具有重要的理论和现实意义,但由于它们在煤中的含量很低,煤中有益金属元素,特别是铂族元素的地球化学资料甚少,仅有一些零星报道(Finkelman et al., 1981; Chyi, 1982; Van der Flier-Keller et al., 1991; Dai et al., 2003; 李生盛等, 2002; 代世峰等, 2003b, 2004, 2005, 2006b; 李大华等, 2006)对它们的含量、来源和赋存形态了解的很不够。贵州西南地区晚二叠世煤中微量元素偏高,国内学者对微量有害元素进行了较为详尽的研究,并认为低温热液流体是控制微量元素富集的主要因素(Dai et al., 2004, 2005),但缺乏对煤中铂族元素、金和银的系统研究。本文对贵州普安矿区晚二叠世龙潭组5个主采煤层的贵金属元素的元素含量、赋存状态和富集成因机理进行了初步探讨。

1 样品的采集和实验方法

普安矿区位于贵州省西部(图1),其二叠纪地层包括下二叠统峨眉山组 and 上二叠统龙潭组与长兴组。峨眉山组主要由拉斑玄武岩、火山角砾岩和凝灰岩组成。龙潭组是主要的含煤岩系组,厚度约为320 m,沉积环境包括泻湖、潮坪、下三角洲平原和碳酸盐台地。长兴组厚度为84~154 m,沉积环境主要为浅海相和滨海三角洲。该区主采2号煤层属于无烟煤($R_o, \text{ran} = 2.64\%$),位于龙潭组的顶部,厚度为1.12 m。层序地层学研究表明,该煤层主要形成于高位体系域,受到海水影响较小。

按照国标 GB482-1985 的方法对矿区5个主采煤层(1、2、8、11和17煤层)进行了刻槽样品的采集,煤层中大于3cm的夹矸样品单独采集。在MPV-III下对这些样品进行了显微组分定量和镜质组反射率测定。用于地球化学分析的样品均破碎至200目,按照谢烈文等(2001)和Dai等(2004)所设计的方法,用高分辨率 ICP-MS 测定煤中的铂族元素、金和银的含量。

应用逐级化学提取技术,对煤中贵金属元素的

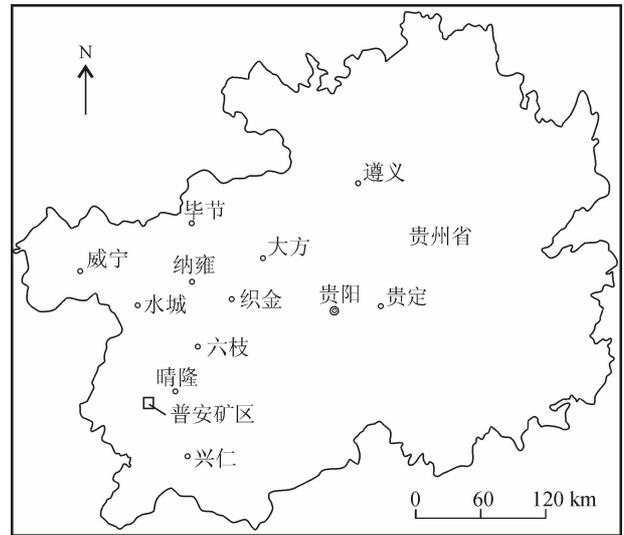


图1 普安矿区位置图

Fig. 1 Location of the Pu'an coalfield

赋存状态进行了研究。把煤中贵金属元素分成6种状态分别逐级提取(表1):水溶态(I)、离子交换态(II)、有机态(III)、碳酸盐态(IV)、硅铝化合物态(V)和硫化物态(VI)。

2 分析结果与讨论

2.1 煤化学和煤岩学特征

贵州普安矿区5个主采煤层(编号分别为1、2、8、11和17)的煤化学和煤岩学特征如表2所示。

普安矿区2号煤层的全硫含量为3.21%,属于高硫煤。该煤层的有机硫含量为0.64%。通过SEM-EDX对不同显微组分33个测点的测试结果表明,显微组分中有机硫含量为0.41%~0.96%,均值为0.71%,表明该煤中的硫主要为黄铁矿硫。该煤中的黄铁矿以脉状充填形式存在,该煤层中手选黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -4.8‰ ,与低等生物成因和同沉积成因黄铁矿硫同位素有显著差异,表明该煤层中脉状充填形式的黄铁矿为后生低温热液成因(张军营等,1999;代世峰等,2000,2006c)。该煤层的高硫含量主要是由后生成因的黄铁矿所致。

煤层1、11和17号亦属于高硫煤,全硫含量分别为2.14%、3.56%和2.87%,以黄铁矿硫为主,但这3个煤层中黄铁矿的赋存状态主要以莓球状、团块状、胞腔充填、浸染状和结核状为主,为同生或早期成岩作用阶段的产物(Chou, 1997; 代世峰等, 2003a, 2006a; 郑刘根等, 2006)。8号煤层的全硫含

表 1 煤中贵金属元素的赋存状态和逐级化学提取方法(据代世峰等,2002, 2004 修订)

Table 1 Modes of occurrence of noble metals in coal and the methods of SCET (modified after Dai et al., 2002, 2004)

序号	赋存状态	提取方法
I	水溶态	10 g 样品 + 60 ml 水, 25℃, 48 h
II	离子交换态	残渣 + 60 ml NH ₄ AC, 25℃, 48 h
III	有机态	II 后的残渣 + 1.47 g/cm ³ CHCl ₃ , 上浮者在 40℃ 下干燥, 加入 1: 1 HNO ₃ 和 HClO ₄ , 10 h
IV	碳酸盐态	II 后的残渣 + 1.47 g/cm ³ CHCl ₃ , 下沉者 + 20 ml 0.5% HCl, 1 h
V	硅铝化合物态	III 后的残渣 + 2.89 g/cm ³ CHBr ₃ , 上浮者 + 1: 1 HNO ₃ 和 HF, 10 h
VI	硫化物态	III 后的残渣 + 2.89 g/cm ³ CHBr ₃ , 下沉者 + 1: 1 HNO ₃ , 10 h

表 2 普安矿区主采煤层煤化学和煤岩学特征 / %

Table 2 Proximate analyses and petrographic compositions of coals from the Pu'an coalfield / %

煤层	煤化学特征						煤岩学特征						Ro, ran		
	A _d	V _{daf}	S _{t,d}	S _{p,d}	S _{s,d}	S _{o,d}	V	I	L	Py	Q	CM		Cal	T-M
No. 1	18.4	9.45	2.14	1.38	0.06	0.70	53.9	32.4	0	2.3	8.6	2.2	0.6	13.7	2.62
No. 2	21.6	9.34	3.21	2.52	0.05	0.64	51.2	33.7	0	3.4	2.3	9.4	bdl	15.1	2.64
No. 8	20.7	9.68	0.78	0.11	0.05	0.62	51.7	33.0	0	0.6	2.6	11.3	0.8	15.3	2.59
No. 11	22.4	9.70	0.56	2.81	0.12	0.63	4.3	29.8	0	3.2	9.8	2.5	0.4	15.9	2.61
No. 17	26.8	10.41	2.87	2.17	0.08	0.62	55.8	27.0	0	2.6	12.9	1.7	bdl	17.2	2.64

注: A-灰分; V-挥发分; S_t-全硫; S_p-硫化物硫; S_s-硫酸盐硫; S_o-有机硫; V-镜质组; I-惰质组; L-壳质组; Py-黄铁矿, Q-石英; CM-粘土矿物; Cal-方解石; T-M-矿物总量; Ro, ran-镜质组随机反射率; d-干燥基; daf-无灰干燥基; bdl-低于检测极限。

量为 0.78%, 光学显微镜和扫描电镜下均未发现黄铁矿, 表明该煤层中硫主要为有机硫。

X 射线衍射和光学显微镜测试结果亦表明, 1、11 和 17 煤层的矿物组成主要为黄铁矿、石英和少量的高岭石, 而 2 号煤层主要为黄铁矿和高岭石, 8 煤层的矿物主要为高岭石。2 号煤层中的高岭石主要以透镜状和细分散形式出现, 未观察到有充填在植物胞腔中的高岭石, 表明该煤层中的高岭石主要为陆源碎屑成因。

贵州普安矿区晚二叠世煤中的惰性组含量较高, 为 27% ~ 33.7%, 镜质组的含量为 51.2% ~ 55.8% (表 2)。

2.2 普安矿区贵金属元素含量特征

表 3 列出了普安矿区主采煤层中的铂族元素、金和银的含量及其与中国煤的对比。从中可以看出:

(1) 贵州普安主采煤层 1、8、11 和 17 号煤层中的贵金属元素的含量低于或接近中国煤。但 2 号煤层中的贵金属元素的含量尤其值得关注, 除 Ru 含量低于仪器的检测极限外, 其他贵金属元素的含量均远高于 Dai 等(2003)、唐修义和黄文辉(2004)报道的中国煤中元素的背景值, 其中 Pd、Ir、Au 的含量分别是中国煤的 4.3 倍、9 倍和 5.3 倍, 该煤中 Ag 的含量高达 1620 ng/g。

表 3 贵州普安主采煤层中铂族元素、金和银的含量及其与中国煤的对比 / ng · g⁻¹

Table 3 Contents of PGEs, Au and Ag in coals from the Pu'an Coalfield as compared with contents of coals of China / ng · g⁻¹

元素	No. 1	No. 2	No. 8	No. 11	No. 17	中国煤 ^① 地壳丰度 ^③	
Ru	4	bdl	3	4	bdl	5	1
Rh	12	38	16	10	8	14	1
Pd	90	640	162	110	100	150	10
Ir	bdl	9	2	bdl	1	1	1
Pt	25	98	50	26	18	30	50
Au	5	16	4	8	5	3 ^②	1.3 ^④
Ag	240	1620	620	470	330	500 ^②	56 ^④

注: ①-刘英俊等, 1988; ②-唐修义等, 2004; ③-黎彤, 1976; ④-Rudnick et al., 2004。

(2) 与地壳中贵金属元素丰度相比, Ru、Rh、Pd、Au 和 Ag 在煤中的含量明显高于地壳中的含量。2 号煤层中的 Pd 和 Ag 的含量分别高出地壳丰度的 64 倍和 29 倍。刘英俊等(1988)指出有机质富集 Pd 可能有以下 2 种因素造成: 第一, 有些植物灰中 Pd 的含量较高(285 μg/g) 及 Pt、Pd 能形成极稳定的金属卟啉, 说明有机质作用是造成 Pd 活动的可能原因; 第二, PdCl₄²⁻ 可能被有机质还原为 Pd⁰, 且被吸附或再沉淀于有机质土壤中(刘英俊等, 1988)。

Варшал 等(2000)用无灰腐殖酸对 Au 及铂族元素 Pt、Pd、Rh、Ru 和 Os 的吸附性进行了实验研究,结果表明泥炭中的腐殖酸可吸附 Au(320 mg/g)、Pd(100 mg/g)、Rh(11 mg/g)、Ru(16 mg/g)、Os(23 mg/g),而不能吸附 Pt。煤中 Pd 的高度富集,很可能反映了成煤初期泥炭沼泽阶段泥炭中腐殖酸对不同铂族元素的不同程度的吸附,以致煤中 Pt 的背景值与地壳的克拉克值相比,略低些(Варшал Г М et al., 2000)。

(3)所有煤中铂族元素都以 Pd 和 Pt 含量高为特征,并且 Pd > Pt, Pd >> Ru、Rh、Ir。Ag 的含量远高于 Au 的含量。铂族元素在地球不同的圈层、部分天体物质和含铂族元素的不同地质体中有一定的分布规律,一般有 Ru-Pt、Ru-Os、Pt-Pd 等 3 种配分模式(涂光炽, 1998), 贵州普安矿区煤中铂族元素的分布具有明显的 Pt-Pd 分配模式,并且 Pt < Pd。

2.3 普安矿区贵金属元素的赋存状态

对研究区 2 号煤层进行了逐级化学提取实验,结果如表 4 所示。从中可以看出,2 号煤层中贵金属元素的赋存状态有如下特点:

(1)以水溶态、离子交换态和碳酸盐结合态的贵金属元素含量甚微,基本上都低于检测极限(1 ng/g),仅 Pd 以离子交换态的含量为 10 ng/g。

(2)贵金属元素以有机态结合的含量均低于中国煤中贵金属元素的背景值,以有机态结合的 Rh 和 Ir 低于检测极限。

(3)以硅铝化合物结合的贵金属元素的含量低于以有机态结合的元素。

(4)除了 Ru 在硫化物结合态中的含量低于检测极限外,其他贵金属元素在该结合态中显著富集(表 4)。

煤中铂族元素赋存状态目前研究资料较少。Chyi(1982)认为 Pt 在搬运中可与有机酸组合,在煤中也可以胶体状无机化合物存在,但也暗示明显亲近有机质。Bouřka 等(2000)认为,当煤中有 Rb、In 云母、长石和粘土矿物(伊利石)时,铂族元素可呈自然合金。本次研究结果表明,在贵金属元素异常富集的普安 2 号煤层中,贵金属元素主要赋存在黄铁矿中,而常见煤中的贵金属元素不仅与陆源碎屑供给有关,而且和有机质关系密切。

代世峰等(2003b)和 Dai 等(2003)研究表明,低温热液作用、岩浆热液活动、同沉积火山灰作用、

表 4 贵州普安矿区主采煤层中贵金属元素的逐级化学提取实验结果 /ng · g⁻¹

Table 4 SCEE results of noble elements in coals from the Pu'an coalfield /ng · g⁻¹

状态	Ru	Rh	Pd	Ir	Pt	Au	Ag
水溶态	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
离子交换态	bdl	bdl	10	bdl	bdl	bdl	bdl
碳酸盐态	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl
有机态	bdl	10	95	bdl	12	2	340
硅铝化合物态	bdl	7	28	bdl	8	bdl	250
硫化物态	bdl	720	15000	310	2380	360	32300

陆源碎屑输入和海水供给几种地质作用中,前 3 种可造成煤中铂族元素的异常。贵州普安矿区 2 号煤层中除了低温热液形成的黄铁矿外,未见其他后生地质作用的证据。从贵金属元素的赋存状态可以看出,贵州普安矿区 2 号煤层的硫化物对贵金属元素的富集其了决定作用,有机质和陆源碎屑对金属元素的富集有一定的贡献,但不是富集因素,主要是决定了该煤层为受到低温热液影响时贵金属元素的背景值,这种认识和 Dai 等(2003)的结论相一致。但 Dai 等(2003)认为是硅质低温热液造成煤中贵金属元素的富集,本次研究表明,硫化物低温热液也是造成贵金属元素富集的重要因素。已有的研究成果表明,在热液体系中,Pt 相对于 Pd 更为活跃(Rowell et al., 1986),但在受热液影响的煤中铂族元素比较复杂,Pt 的含量没有明显高于 Pd,相反,多数受低温热液影响的煤层中 Pd > Pt。

3 结论

(1)贵州普安矿区 2 号主采煤层的矿物组成主要为低温热液流体成因的黄铁矿和陆源碎屑成因的粘土矿物。

(2)与中国煤相比,普安矿区 1、8、11 和 17 号煤中贵金属元素含量低于煤的背景值,而 2 号煤中的 Rh(38 ng/g)、Pd(640 ng/g)、Ir(9 ng/g)、Pt(98 ng/g)、Au(16 ng/g)和 Ag(1620 ng/g)显著富集。

(3)2 号煤层中贵金属元素主要赋存在硫化物结合态中,而以有机态和硅铝化合物结合态存在的贵金属元素含量低于或接近于这些元素的背景值,表明低温热液流体对煤中贵金属元素的富集起了决定作用。

致谢 感谢 Jeffer R. Green 在铂族元素测试过程中给予的大力支持,感谢任德胎教授和代世峰博

士给予的指导。

参考文献

- 代世峰,任德贻,周强,等. 2000. 高硫煤中菌落成因黄铁矿的 TOF-SIMS 研究. 煤炭学报, 25 (2), 190 ~ 195.
- 代世峰,任德贻,李生盛. 2002. 煤及顶板中稀土元素赋存状态及逐级化学提取. 中国矿业大学学报, 31 (5):349 ~ 353.
- 代世峰,任德贻,李生盛. 2003a. 华北若干晚古生代煤中稀土元素赋存特征. 地球学报, 24 (3): 273 ~ 278.
- 代世峰,任德贻,张军营,等. 2003b. 华北与黔西地区晚古生代煤层中铂族元素赋存状态及来源. 地质论评, 49(4):439 ~ 443.
- 代世峰,任德贻,孙玉壮,等. 2004. 鄂尔多斯盆地晚古生代煤中铀和钍的含量与逐级化学提取. 煤炭学报, 29(增刊):56 ~ 60.
- 代世峰,任德贻,赵蕾,等. 2005a. 贵州织金煤矿区晚二叠世煤地球化学性质变异的硅质低温热液流体效应. 矿物岩石地球化学通报, 24(1):39 ~ 49.
- 代世峰,任德贻,李丹,等. 2006a. 贵州大方煤田主采煤层的矿物学异常及其对元素地球化学的影响. 地质学报, 80(4):590 ~ 597.
- 代世峰,任德贻,李生盛. 2006b. 内蒙古准格尔超大型铀矿床的发现. 科学通报, 51(2):177 ~ 185.
- 代世峰,任德贻,李生盛,等. 2006c. 鄂尔多斯盆地东北缘准格尔煤田煤中超常富集勃姆石的发现. 地质学报, 80(2):294 ~ 300.
- 李大华,唐跃刚,陈坤,等. 2006. 贵州晴隆矿区 K6 煤层的元素地球化学特征. 地球学报, 27(2):135 ~ 140.
- 黎彤. 1976. 化学元素的地球丰度. 地球化学, (3):167 ~ 173.
- 李生盛,张军营,任德贻,等. 2002. 黔西南煤中铂族元素的发现及其地质意义. 中国矿业大学学报, 31(3): 258 ~ 261.
- 刘英俊,曹励明. 1988. 元素地球化学导论. 北京:地质出版社, 161 ~ 175.
- 唐修义,黄文辉. 2004. 中国煤中微量元素. 北京:商务印书馆, 50 ~ 53, 69 ~ 74, 280 ~ 284.
- 涂光炽. 1998. 低温地球化学. 北京:科学出版社, 123 ~ 189.
- 谢烈文,侯泉林,阎欣,等. 2001. 电离耦合等离子体质谱分析通古斯大爆炸地区沉积物中超痕量铂族元素. 岩矿测试, 20(2):88 ~ 90.
- 张军营. 1999. 煤中潜在毒害微量元素富集规律及其污染性抑制研究. 博士学位论文. 北京:中国矿业大学(北京校区), 10 ~ 85.
- 郑刘根,刘桂建,CHOU Chenlin,等. 2006. 中国煤中砷的含量分布、赋存状态、富集及环境意义. 地球学报, 27(4):355 ~ 366.

References

- Bouřka V, Pešek J, Sykorova I P. 2000. Probable modes of occurrence of chemical elements in coal. Acta Montana, Ser. B. Fuel, Carbon, Mineral Process, Praha, 10 (117): 53 ~ 90.
- Варшал Г М, Велюханова Т К, Чхетия Д Н, и др. 2000. Сорбция на гуминовых ксилтах как основа механизма первичного накопления золота и элементов группы платины в черных Лцтология и полезные ископаемые, 6: 605 ~ 612.
- Chou C L. 1997. Geological factors affecting the abundance, distribu-

- tion, and speciation of sulfur in coals. In: Yang, Q. (Ed.), Geology of Fossil Fuels-Coal. Proceedings of the 30th International Geological Congress, 18, Part B. The Netherlands: VSP, Utrecht, 47 ~ 57.
- Chyi L L. 1982. The distribution of gold and platinum in bituminous Coal. Economic Geology, 77: 1592 ~ 1597.
- Dai Shifeng, Ren Deyi, Zhou Qiang, et al. 2000. Study of TOF-SIMS on the pyritized rod-like bacteria in the high-sulfur coal. Journal of China Coal Society, 25 (2): 190 ~ 195.
- Dai Shifeng, Ren Deyi, Li Shengsheng. 2002. Occurrence and sequential chemical extraction of rare earth element in coals and seam roofs. Journal of China University of Mining & Technology, 31 (5): 349 ~ 353.
- Dai Shifeng, Ren Deyi, Li Shengsheng. 2003a. Modes of occurrence of rare earth elements in some late Paleozoic coals of North China. Acta Geoscientia Sinica, 24 (3): 273 ~ 278.
- Dai Shifeng, Ren Deyi, Zhang Junying, et al. 2003b. Occurrence and origin of platinum group elements in coals in West Guizhou Province and North China. Geological Review, 49(4): 439 ~ 443.
- Dai S F, Ren D Y, Zhang J Y, et al. 2003c. Concentrations and origins of platinum group elements in Late Paleozoic coals of China. International Journal of Coal Geology, 55: 59 ~ 70.
- Dai Shifeng, Ren Deyi, Sun Yuzhuang, et al. 2004a. Concentration and the sequential chemical extraction procedures of U and Th in the Paleozoic coals from the Ordos Basin. Journal of China Coal Society, 29(Suppl): 56 ~ 60.
- Dai S F, Li D H, Ren D Y, et al. 2004b. Geochemistry of the late Permian No. 30 coal seam, Zhijin Coalfield of Southwest China: influence of a siliceous low-temperature hydrothermal fluid. Applied Geochemistry, 19: 1315 ~ 1330.
- Dai S F, Ren D Y, Tang Y G, et al. 2005a. Concentration and distribution of elements in Late Permian coals from western Guizhou Province, China. International Journal of Coal Geology, 61: 119 ~ 137.
- Dai Shifeng, Ren Deyi, Zhao Lei, et al. 2005b. Geochemical anomaly of the Late Permian coal in the Zhijin Coalfield from Guizhou: Influence from siliceous low-temperature hydrothermal fluid. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 24(1): 39 ~ 49.
- Dai Shifeng, Ren Deyi, Li Dan, et al. 2006a. Mineralogical anomalies and their influences on elemental geochemistry of the main workable coal beds from the Dafang Coalfield, Guizhou, China. Acta Geologica Sinica, 80(4): 590 ~ 597.
- Dai Shifeng, Ren Deyi, Li Shengsheng. 2006b. Discovery of the super-large gallium ore deposit in Junger, Inner Mongolia, North China. Chinese Science Bulletin, 51(2): 177 ~ 185.
- Dai Shifeng, Ren Deyi, Li Shengsheng. 2006c. A discovery of extremely-enriched boehmite from coal in the Junger Coalfield, the North-eastern Ordos Basin. Acta Geologica Sinica, 80(2):294 ~ 300.
- Finkelman R B, Aruscavage P J. 1981. Concentration of some platinum-group metals in Coal. International Journal of Coal Geology, 1: 95 ~ 99.

- Li Dahua, Tang Yuegang, Chen Kun, et al. 2006. Elemental geochemistry of the K6 Coal from the Qinglong Coalfield, Guizhou. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(2):135 ~ 140.
- Li Shengsheng, Zhang Junying, Ren Deyi, et al. 2002. Discovery and geological significance of platinum group elements in coals from Southwestern Guizhou. *Journal of China University of Mining and Technology*, 31(3): 258 ~ 261.
- Li Tong. 1976. Abundance of chemical elements. *Geochemistry*, (3): 167 ~ 173.
- Liu Yingjun, Cao Liming. 1988. Guidelines of the element geochemistry. Beijing: Publishing House of Geology, 161 ~ 175.
- Rowell W F, Edgar A D. 1986. Platinum-group element mineralization in a hydrothermal Cu-Ni sulfide occurrence, Rathbun Lake, Northeastern Ontario. *Economic Geology*, 81(5): 1272 ~ 1277.
- Rudnick R L, Gao S. 2004. Composition of the continental crust. Amsterdam: Elsevier, 1 ~ 64.
- Tang Xiuyi, Huang Wenhui. 2004. Trace Elements in Coals of China. Beijing: Commercial Press, 50 ~ 53, 69 ~ 74, 280 ~ 284.
- Tu Guangchi. 1998. Low-temperature geochemistry. Beijing: Publishing House of Sciences, 123 ~ 189.
- Van der Flier-Keller E. 1991. Platinum-group elements in Tulameen coal [deposit], British Columbia, Canada. *Economic Geology*, 86: 387 - 395. (3):258 ~ 261.
- Xie L W, Hou Q L, Yan X, et al. 2001. Determination of ultra-trace PGEs in the sediments near the Tunguska Explosion site by ICP-MS. *Rock and Mineral Analysis*, 20 (2): 88 ~ 90.
- Zhang Junying. 1999. Enrichment mechanism and pollution restraining of potentially hazardous trace elements in coal. Ph. D Thesis. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing Campus), 10 ~ 85.
- Zheng Liugen, Liu Guijian, Chou Chen-Lin, et al. 2006. Arsenic in Chinese Coals: its abundance, distribution, modes of Occurrence, enrichment processes, and environmental significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 27(4):355 ~ 366.



《内蒙古正蓝旗羊蹄子山钛矿床——一个新的大型富钛矿床的发现和预测评价研究》主要进展

发现世界上新类型钛矿和极具潜力的富钛矿产地。现已证实某原沉积变质铁矿点,为极具远景的富钛矿床,是国内外未曾发现过的一种新的钛矿床类型。初步建立了成矿模式,总结出找矿标志,指出了区域寻找同类矿床的远景,为区域找矿开拓了新领域,为国家提供了一类新型钛矿床基地。该成果的取得是地质科研与生产结合的成功实例,是科技人员主动面向国家建设的真实记录。该项目是内蒙古自治区国土资源厅矿产预查和科研项目,由中国地质科学院矿产资源研究所赵一鸣研究员课题组负责。