

中国腐泥煤中微量元素的研究进展

桂琳, 刘桂建*, 刘源

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026

* 通讯作者. E-mail: lgj@ustc.edu.cn

摘要: 煤是我国的主要能源, 煤炭大量使用会造成一系列环境问题, 特别是煤中伴生的有害微量元素迁移、析出, 进而影响人类生存生活环境. 关于煤中微量元素的研究已经形成了相对完整的体系, 然而, 由于腐泥煤的次要经济地位, 其微量元素地球化学研究远不如腐植煤. 腐泥煤分布广泛、厚度大, 具有一定的工业价值, 腐泥煤中微量元素含量特征已有部分报道, 而对腐泥煤中微量元素的赋存状态、富集机理、地质成因等地球化学机理方面有待系统研究. 在综合分析国内外腐泥煤研究基础上, 详细阐述了腐泥煤中微量元素地球化学研究的热点问题、重点内容和发展方向. 腐泥煤的地球化学研究是对煤地质学和煤地球化学理论的补充和完善, 具有重要科学意义, 对我国特殊煤种成煤理论体系和资源开发利用亦具重要现实意义.

关键词: 腐泥煤; 微量元素; 地球化学

中图分类号: P595 **文献标识码:** A

1 引言

煤是中国的主要能源, 煤炭大量使用会造成一定的环境问题. 煤中有害微量元素是环境的主要污染物之一: 首先, 在风、雨水淋滤等作用下, 煤中部分微量元素随气体、飘尘或粉尘进入大气, 部分直接渗入到土壤或含水层中; 其次, 煤燃烧过程中释放出的气体及粉尘、飘尘会携带有害物质或元素进入大气, 引起大气污染^[1]. 长期生活于此类环境会产生一些相关疾病, 危害人体健康. 此外, 煤中有害微量元素渗入地下水或土壤可通过污染饮用水和农作物间接危及人体健康^[2].

近半世纪来, 随着煤中微量元素地球化学方面研究广泛且深入, 出现了一系列重要研究成果, 煤地球化学研究体系也日趋完善. 自 20 世纪 30 年代开始, 国内外学者在煤中先后发现 80 多种微量元素; 40 年代转向对微量元素的赋存状态及其成因方面进行研究, 且逐步进入到应用阶段, 形成较完整的研究体系^[1]. 按成煤物质来源, 可将煤划分为腐植煤、腐植腐泥煤和腐泥煤^[4]. 然而, 从煤的类型来看, 煤种划分多, 而对某些特殊煤种煤中微量元素地球化学研究相对很少, 从而导致煤地球化学研究体系部分缺失; 由于腐泥煤相对腐植煤数量较少, 分布较小, 相关研究也相对欠缺.

从环境学方面来看, 微量元素作为煤的伴生物质,

其赋存和富集不仅具煤地质学理论意义, 而且更重要的是具有资源化、洁净利用和环境保护等多方面现实意义. 腐泥煤作为特殊煤种, 其微量元素的地球化学研究是对煤地质学和煤地球化学理论体系的补充和完善.

2 腐泥煤的定义

煤的成因分类将煤划分为腐植煤、腐植腐泥煤和腐泥煤三类; 腐泥煤占特殊地位, 代表泥炭沼泽某一时期具有不同于形成腐植煤的古地理面貌及生物输入^[3].

腐泥煤是由低等植物和浮游生物残骸, 在湖泊、潟湖、海湾等环境中, 经腐泥化和煤化作用形成的煤^[4]. 一般而言, 腐泥煤光泽较暗淡, 结构均一, 块状构造, 常具贝壳状断口, 韧性较大. 腐泥煤多呈透镜状或薄层状产出于腐植煤层中, 偶尔形成单独可采煤层. 腐植煤是高等植物在泥炭沼泽中经泥炭化和煤化作用形成的煤; 根据煤化程度, 可分为泥炭、褐煤、烟煤和无烟煤四类. 腐植腐泥煤, 是由低等植物和高等植物经成煤作用形成的, 介于在腐植煤和腐泥煤之间以腐泥为主.

常见腐泥煤有藻煤和胶泥煤. 藻煤是腐泥煤的典型代表, 是保存有藻类、菌类等低等植物结构的腐泥煤, 光泽暗淡呈褐色, 致密状或略显层理. 胶泥煤是成

Citation: 桂琳, 刘桂建, 刘源. 中国腐泥煤中微量元素的研究进展. 中国科学技术大学学报, 2020, 50(12): 1453-1459.

GUI Lin, LIU Guijian, LIU Yuan. Progress in the research of trace elements in sapropelic coal of China. J. Univ. Sci. Tech. China, 2020, 50(12): 1453-1459.

煤低等植物全部分解的腐泥煤,几乎全由无结构的腐泥基质组成,其外貌与藻煤类似。

虽然腐泥煤的数量少,但在中国分布广泛,在五大聚煤区东北、华北、西北、滇藏以及华南聚煤区均有发现,主要分布在湖北、河南、湖南、广西、贵州、江西等寒武纪到志留纪地层中,其中,以秦岭南部最为广泛。另外在山西浑源和山东河东的腐泥煤较著名^[3],例如山西浑源石炭纪太原组的层状藻煤,同样还有内蒙伊克昭盟早第三纪的结构藻煤以及山西大同侏罗纪藻煤等,在新疆、贵州、广西、云南等地也有藻煤赋存,山西浑源还发现有成煤植物强烈分解的胶泥煤^[6]。

3 国内外研究现状

国外煤中微量元素的研究始于 20 世纪,较国内早。20 世纪 30 年代开始,国外学者在煤中先后发现 80 多种微量元素;40 年代转向对微量元素的赋存状态及其成因方面进行研究,且逐步进入到应用阶段,形成较完整的研究体系^[1]。同时,他们开始了腐泥煤的研究,例如 Havelcová 等^[7]选择了捷克五个古近纪煤层四个类型的煤样,其中包括腐泥煤,采用煤岩学和有机地球化学方法对其进行了研究。Bechtel 等^[8]对上渐新统 Trbovlje 煤层的有机地球化学方面进行过研究。Crosdale^[9]对新西兰早中新世 Maryville 煤系岩石类型的层序分析发现,该煤系显示出变暗趋势,亮煤比例下降,最终形成腐泥层。国外相关研究主要集中在煤质特征、煤岩学和有机地球化学等方面,而对腐泥煤中微量元素的地球化学研究极少。

1956 年,我国才开始煤中伴生元素的调查和研究,少数学者对煤中微量元素的分布规律进行了探讨,且仅限个别样品中 V、Ni 和 Mo 等,开始关注煤中微量元素的成因及在地质学和环境学方面的应用^[1]。肖贤明等^[10-11]对我国腐泥煤的岩石学特征及腐泥煤的煤化作用进行了详细研究,查明了腐泥煤中的藻类体、沥青质体、孢子体、动物壳屑体、渗出沥青体、镜质组等的荧光特征,总结了腐泥煤与腐植煤的区别,并建议采用国际腐植煤显微煤岩类型划分方案,确定了我国腐泥煤的岩石学分类方案。赵海波等^[12-16]对腐泥煤的变质系列采用煤色谱、光谱以及 X 射线、核磁、顺磁共振实验描述了煤岩煤质特征。

之后,开始对特定区域腐泥煤的化学成分、微量元素组成及煤岩煤质特征与腐植煤开展对比研究。如李太任等^[3]采用中子活化法分析了山西浑源太原组藻煤中 31 种微量元素,发现藻煤中稀土元素 La、Nd、Ce、Sm、Eu 和 Tb 及稀有元素 Ta 和 Sc 的含量相对较高,

且与粘土矿物较多有关;Sr 含量较低, $C_{Sr}/C_{Ba}<0.5$,表明藻煤堆积于淡化水体中。高长林和叶德燎^[17]对陕西安康下志留统大秦坪组和中寒武统毛坝关组腐泥煤和浙江西部寒武系荷塘组石煤的元素地球化学研究表明,腐泥煤和石煤中主量元素 Al、Fe、Ca、Mg、K 和 Na 富集,微量元素 P、Sr、Cu、Zn、Co 和 Cr 富集,REE 含量也较高,且具显著 Eu 负异常。刘桂建等^[18-19]对山东淄博山西组腐泥煤与共生的腐植煤的微量元素含量进行对比表明,腐泥煤中 Ba、Cs、Ni、Cr、Rb、Co、K、Na 和 Sr 以及稀土元素 La、Nd、Sm、Sc、Ce、Eu 和 Tb 含量明显高于腐植煤。姜尧发等^[20]和周国庆等^[21]对江苏徐州太原组腐泥煤(藻煤)中微量元素进行分析,相比同组腐植煤,腐泥煤中 Cr、Ni、Cu、Sr、Sn、Ba 和 Hg 含量更高,腐泥煤中稀土元素球粒陨石标准化曲线类似,呈轻稀土富集、重稀土相对亏损的特征。Dai 等^[22]总结了我国早古生代高变质腐泥煤——石煤的产出与分布、岩石学、矿物学和地球化学特征,并讨论了石煤中伴生有害微量元素对环境 and 人体健康的影响及有益元素的应用价值。

总之,近年来,随着国内外对腐泥煤研究的逐渐深入和全面,关于腐泥煤中微量元素的分析研究逐步开展,但研究成果较少,仅限于对个别腐泥煤中微量元素含量特征的分析,而对其赋存状态、富集成因等地球化学方面研究有待深入。

4 腐泥煤的煤岩煤质特征

肖贤明等^[10-11]对我国典型煤田的腐泥煤进行研究,考虑地质时代、地理分布和古地理环境等因素,选取了 15 层腐泥煤及其共生腐植煤、油页岩和碳质泥岩为研究对象,基本反映出我国腐泥煤的特征:腐泥煤具有致密均一状结构,强度和韧性大,光泽较暗淡,常呈贝壳状断口;腐泥煤中也可观察到各种类型的镜质组、惰质组和壳质组,但以藻类体、孢子体及沥青质体为主,占有有机质的 90% 以上,腐泥煤与腐植煤的显微组分有十分明显的区别。

周国庆等^[21]在徐州大屯矿区徐庄张双楼一带发现太原组 17 号煤层上部发育有 0.3-0.6 m 厚的腐泥煤(藻煤),该腐泥煤的变质程度较低,灰分产率较低,全硫含量中等,挥发分产率和氢含量较高,是同组腐植煤的 1.5 倍;显微组分以藻类体和沥青质体为主,镜质组和惰质组总量低于 5%,线理状均质镜质体反射率低于同组腐植煤。

刘桂建等^[18-19]在山东淄博煤田东北部发现一腐泥煤变质系列,基于勘探阶段钻孔取样,对同一钻孔中

腐泥煤和腐植煤分别采取一个全层煤样进行对比研究,其煤质分析结果表明:腐泥煤水分低于腐植煤,一般仅为腐植煤的 1/2;挥发分高于腐植煤;全硫含量

(S_{cl}) 小于 1%, 低于腐植煤, 与李太任等^[23] 对山西浑源太原组 7 号煤层的研究结果一致, 即全硫含量变化趋势为腐植煤> 焯煤> 藻煤。

表 1 不同地区腐泥煤与腐植煤煤质分析对比.

Tab. 1 Analysis and comparison of coal quality of sapropelic and humic coal in different areas.

地区	煤种	工业分析(%)				元素分析(%)				类别
		水分	灰分	挥发分	全硫	碳	氢	氧	氮	
徐州大屯 ^[21]	腐泥煤	nd	5.42	69.95	1.65	78.39	8.44	nd	nd	nd
	腐植煤	nd	16.84	46.24	6.29	82.89	5.58	nd	nd	nd
山东淄博 ^[18]	腐泥煤	2.62	28.31	29.10	0.90	nd	nd	nd	nd	nd
	腐植煤	3.91	20.63	23.06	1.26	nd	nd	nd	nd	nd
山西浑源 ^[23]	藻煤	1.66	34.18	68.81	1.85	79.16	10.92	6.04	0.97	nd
	焯煤	2.46	8.20	71.72	2.41	79.66	8.40	7.94	1.20	nd
	腐植煤	7.59	5.09	47.29	2.58	77.86	5.74	12.42	1.13	nd
陕西安康 ^[24]	腐泥煤	1.21	35.24	6.58	nd	90.70	nd	nd	nd	无烟煤
陕西黄陵 ^[25]	焯煤	1.61	17.41	38.12	1.44	84.43	5.38	7.15	1.65	长焰煤

[注] nd, 无数据.

山西蒲县东河腐泥煤比山西浑源腐泥煤更为典型. 东河腐泥煤颜色为黑色, 条痕为褐棕色, 较暗沥青光泽, 细腻均一, 致密块状构造, 韧性大, 具贝壳状和弧形带状断口, 比重小, 手感轻等特点^[2]. 山西蒲县腐泥煤的显微组分如表 2 所示, 其显微组分有藻类体、角质体、孢子体、镜质体微细条带、丝质组碎片以及腐泥基质和腐植基质; 矿物有粘土、黄铁矿、菱铁矿等, 偶见磷灰石.

表 2 山西蒲县东河腐泥煤的显微组分^[2].

Tab. 2 Quantitative analysis results of apparent components in Donghe sapropelic coal^[2].

名称	组分含量(%)						总计
	藻类体	基质	镜质体	丝质组	角质体 孢子体	矿物	
藻煤	62	36	1	nd	1	偶见	100
焯藻煤	19	58	15	1.5	5.5	1	100

[注] nd, 无数据.

5 腐泥煤中微量元素

微量元素作为煤的伴生物质一直以来都与环境问题、动植物及人类健康密切相关, 也是煤研究中的重点和热点问题. 国外研究煤中微量元素起步早, 研究也比较深入. 我国于 1956 年才开始煤中伴生元素的调查和研究, 到目前为止形成了相对完整的煤中微量元素研究体系. 近几年, 一些特殊煤种引起了学者们的注意,

除了对这些特殊煤种煤岩煤质特征研究之外, 也开始对特殊煤种中的微量元素进行相关研究, 其中就包括腐泥煤.

高长林等^[15] 对我国南方早古生代石煤、腐泥煤和沥青煤中微量元素进行分析测试, 结果如图 1 所示, 三种煤中微量元素含量存在明显差异, 陕西南部腐泥煤和浙江西部石煤中富集 P、Sr、Cu、Zn 和 Cr 等, 腐泥煤尤甚, 而安徽南部沥青煤中这些元素的含量较低, 从这方面表明三种煤具有不同的成因.

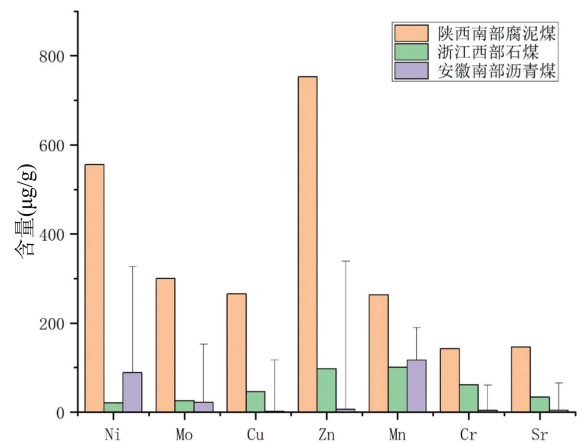


图 1 我国南方古生界腐泥煤、石煤和沥青煤中微量元素含量对比^[15].

Fig. 1 Comparison of trace elements in Paleozoic sapropelic coal, stone coal and bituminous coal in South China^[15].

江苏徐州大屯矿区 17 煤层腐泥煤和龙固煤矿 21 煤层腐植煤中微量元素的特征亦不相同^[21]. 相对腐植煤, 腐泥煤中 Li、Be、Sc、Ti、Mn、Co、Zn、Ga、Ge、Se、Y、Zr、Nb、Mo、Cs、Hf、W、Tl、Th 和 U 的含量偏低, 而 Cr、Ni、Cu、Sr、Sn、Ba 和 Hg 的含量较高(图 2). 此外, 太原组腐泥煤的 C_{Sr}/C_{Ba} 为 1.43, 而 21 煤层腐植煤的为 0.48, 可推断腐泥煤的沉积环境, 太原组腐泥煤可能是在该煤层聚积晚期, 泥炭沼泽被海水淹没, 由开阔海域中生长的藻类堆积而成的.

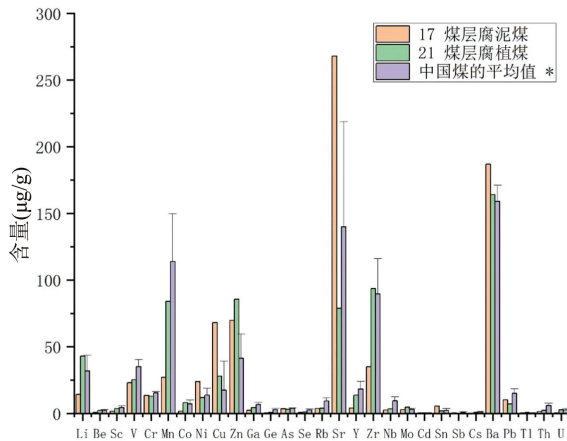


图 2 江苏徐州大屯矿区腐泥煤和腐植煤微量元素含量对比^[21].

Fig. 2 Comparison of trace elements in sapropelic coal and humic coal in Datun mining area, Xuzhou, Jiangsu Province^[21].

藻煤属于腐泥煤的一种, 少见, 山西浑源是我国发现最早的藻煤产地^[23]. 烛煤属腐植腐泥煤. 山西浑源 7 号煤层发育有藻煤、烛煤和腐植煤, 该煤层三种煤的中子活化分析结果表明藻煤、烛煤和腐植煤中微量元素的分布特点不同(图 3), 由于藻煤中粘土矿物较多, 煤中稀土元素 La、Nd、Ce、Sm、Eu 和 Tb 及稀有元素 Ta 和 Sc 等含量相对较高; 而腐植煤中 Cr、Mo、U 和 Ga 等元素含量最高, 与腐植煤中腐植酸和凝胶化物质吸附作用有关^[25]; 烛煤中 Sr 含量高, 藻煤和腐植煤中 Sr 含量较低; 烛煤与藻煤和腐植煤相比, 形成于相对氧化的环境, 因此说明 Sr 在强还原环境中是不易富集的.

山西省籍县东河腐泥煤比浑源的腐泥煤更为典型, 而东河腐泥煤中常见分散元素 Ga 和 V 等含量不高, $C_{Sr}/C_{Ba} < 0.5$, 属非海相沉积^[3].

烛煤属于腐植腐泥煤类, 在很多煤田中都有赋存, 多数情况以薄分层夹于腐植煤当中. 陕西黄陵矿区侏罗纪煤系 4 号煤层中烛煤属于腐植腐泥煤, 更具腐植煤的特征, 其微量元素含量低于地壳沉积圈平均含量的 1/6^[25]; 剖面上 V、Mo、B、Ge、Cu、Ni、Ga、Tl、In、Ag

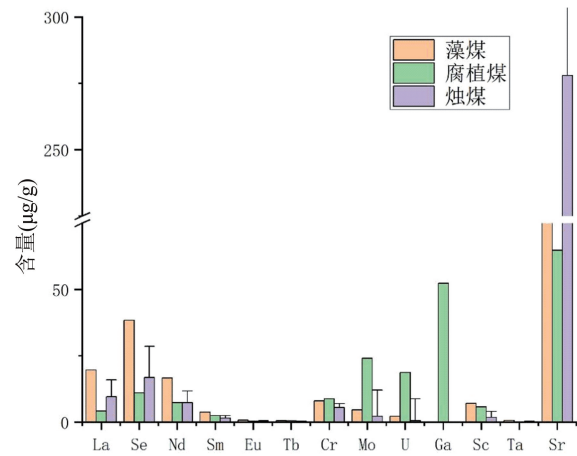


图 3 山西浑源 7 号煤层藻煤、腐植煤和烛煤微量元素含量对比^[23].

Fig. 3 Comparison of trace element contents of algal coal, humic coal and candle coal in No. 7 coal seam of Hunyuan, Shanxi Province^[23].

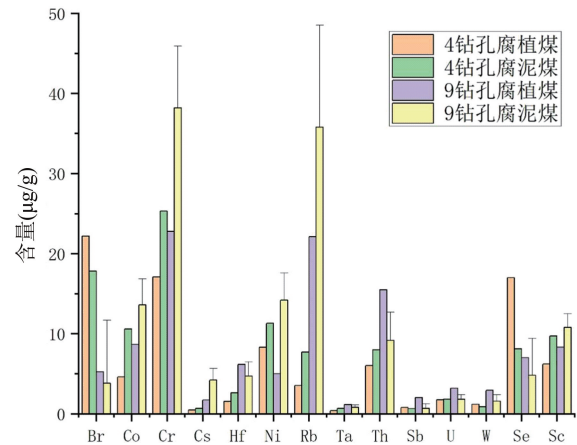


图 4 山东淄博共生腐泥煤和腐植煤微量元素含量^[18].

Fig. 4 Contents of trace elements in paragenetic sapropelic coal and humic coal in Zibo, Shandong Province^[18].

和 Ti 等波动较大, 可能与成煤期物源变化有关.

山东淄博煤田发现有与腐植煤共生的腐泥煤, 腐泥煤中微量元素 Br、Sb、W 和 Se 含量低于共生腐植煤, 而 Ni、Rb、Co、Cr、Cs、K、Na、Ba 和 Sr 含量明显高于腐植煤(图 5); 此外, 腐泥煤中稀土元素含量也明显高于腐植煤^[18]. 高长林等^[17]对南方早古生界腐泥煤、石煤和沥青煤中稀土元素对比研究发现, 由于沉积环境差异, 腐泥煤中稀土元素含量最高.

一般而言, 腐泥煤与腐植煤中微量元素含量存在明显差异, 多由成煤环境的差异所致. 腐泥煤对部分元素富集, 尤其是稀土元素. 不同地区腐泥煤中微量元素含量与中国煤和世界煤相比(表 3), 陕西安康和浙江桐坑石煤中微量元素明显偏高, 特别是陕西南部腐泥煤; 其他地区腐泥煤中元素含量都在中国煤和世界煤

范围内;陕西安康腐泥煤和浙江桐坑石煤 V 明显富集, 徐州大屯和山东淄博腐泥煤中 Sr 富集。陕西安康腐泥煤还富集 V、Ni、Mo、Cu、Zn、Mn 和 Cr;

表 3 五个不同地区腐泥煤中微量元素的含量($\mu\text{g/g}$)。

Tab. 3 Concentrations of trace elements in sapropelic coal from five different regions ($\mu\text{g/g}$).

地区	V	Ni	Mo	Cu	Zn	Mn	Co	Cr	Sr	Th
陕西安康	2146.75	555.75	300.30	265.68	752.85	263.79	6.98	142.28	146.30	4.21
浙江桐坑	1432.00	20.73	25.77	46.36	97.65	100.90	2.82	61.52	33.75	3.00
徐州大屯	23.00	23.80	2.78	68.20	69.90	27.10	1.61	13.50	268.00	1.25
山东淄博	nd	12.75	nd	nd	36.09	nd	12.10	31.75	212.00	8.58
山西浑源	nd	nd	4.62	nd	nd	nd	3.94	8.03	104.40	17.40
中国煤 ^a	35.10	13.70	3.08	17.50	41.40	nd	7.08	15.40	140.00	5.84
世界煤 ^b	25.00	13.00	2.20	16.00	23.00	nd	5.10	16.00	110.00	3.30

[注] nd, 无数据。^a 数据来自文献[34]。^b 数据来自文献[33]。

6 结论与展望

当前对煤中微量元素的研究体系比较健全,但大多是针对腐植煤的研究。腐泥煤相对腐植煤分布数量较少,研究少,而且国内外对于腐泥煤微量元素的研究只在微量元素含量特征方面的分析,并未涉及深入。

从现有的关于腐泥煤的研究可以得出,腐泥煤作为煤炭类型之一的特殊煤种,具有特殊的成因和沉积环境,以及特殊的物理化学性质和煤岩组分。由于成煤环境以及沉积环境的不同,腐泥煤在微量元素含量方面与腐植煤也有明显的差异,会出现一些元素的富集,特别是稀土元素。对不同地区腐泥煤微量元素含量进行对比,发现地区之间腐泥煤元素含量也差异明显,各自存在元素的匮乏与富集现象,特别是在陕西安康腐泥煤中存在多个元素富集,远超于中国煤和世界煤的水平,值得深入研究。

因此,对腐泥煤中微量元素的研究不仅可以丰富我国煤田地质基础理论,形成我国研究特殊煤种的理论体系,而且对开发利用特殊煤种也具有重要的应用意义。综合上述及国内外研究情况,今后主要在以下方面开展工作:

(I) 腐泥煤中微量元素的分布、富集规律研究。研究腐泥煤中微量元素的分布特征和富集规律,分析腐泥煤中富集微量元素的分布特点,对微量元素富集进行区划。

(II) 腐泥煤中微量元素的精细化学结构的特征研究。通过各种测试方法,研究腐泥煤中微量元素的赋存特征,揭示微量元素的精细化学结构在腐泥煤与腐植煤中的差异性。

(III) 腐泥煤微量元素的赋存和富集的影响因素研

究。研究影响腐泥煤微量元素赋存和富集的地质因素,分析对比腐植煤与腐泥煤中有机结构差异性对微量元素富集的影响。

(IV) 腐泥煤微量元素的地球化学成因模式。探讨腐泥煤中微量元素富集的地质成因,归纳微量元素富集的地质成因模式,通过同位素示踪原理研究,建立腐泥煤微量元素的成因及富集的一般模式。

致谢

本文工作得到国家自然科学基金(41972166)资助。

利益冲突

作者声明本文没有利益冲突。

作者信息



桂琳, 博士研究生, 现就读于中国科学技术大学, 导师是刘桂建教授。主要研究方向为煤中微量元素地球化学。



刘桂建(通讯作者), 博士生导师, 任职于中国科学技术大学。1988年毕业于安徽理工大学获学士学位, 1996年毕业于安徽理工大学获硕士学位, 1999年毕业于中国矿业大学获博士学位, 2004年访问香港大学, 2006年访问美国宾州州立大学。

2002年至今在中国科学技术大学地球和空间科学学院

从事教学与科研工作. 研究方向为环境地球化学、能源与环境、微量元素与健康、环境工程与管理、矿山环境与安全等. 在 *Earth-Science Reviews*, *Environmental Science & Technology*, *Bioresource Technology*, *Journal of Hazardous Materials*, *International Journal of Coal Geology*, *Environmental Pollution*, *Science of the Total Environment*, *Energy*, *Fuel* 等期刊上发表论文 300 多篇, 其中以第一作者或通讯作者发表 SCI 论文 200 余篇, 出版专著多部. 主持国家自然科学基金 7 项、科技部科技支撑项目子课题、973 子课题、科学院知识创新工程子课题、国家水专项子课题、行业专项项目、省科技攻关项目、教育部博士点基金等国家与省部级项目多项.

参考文献

- [1] 刘桂建, 彭子成, 王桂梁, 等. 煤中微量元素研究进展. *地球科学进展*, 2002, 17(1): 53-62.
Liu Guijian, Peng Zicheng, Wang Liangui, et al. Study on trace elements in coal. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(1): 53-62.
- [2] 刘桂建, 杨萍月, 张威, 等. 简述煤中微量元素的环境学研究进展. *煤矿环境保护*, 1999, 13(5): 17-19.
- [3] 李太任. 山西省蒲县东河腐泥煤研究. *煤炭学报*, 1983, 8(2): 36-40.
Li Tairen. Study of Donghe sapropelic coal in Pu county, Shanxi province. *Journal of China Coal Society*, 1983, 8(2): 36-40.
- [4] GB-T 15663.1-2008. 煤矿科技术语. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [5] 王绍清, 唐跃刚, 李正越, 等. 特殊原生成因煤的特性和分布研究. *洁净煤技术*, 2016, 22(1): 20-25.
Wang Shaoqing, Tang Yuegang, Li Zhengyue, et al. Distribution and special characteristics of special coal types originated from syngenetic formation. *Clean Coal Technology*, 2016, 22(1): 20-25.
- [6] 曾勇. 中国西部地区特殊煤种及其综合开发与利用. *煤炭学报*, 2001, 26(4): 337-340.
Zeng Yong. Special coal types in Western China and their exploitation and utilization. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(4): 337-340.
- [7] Havelcová M, Sýkorová I, Trejtnarová H, et al. Identification of organic matter in lignite samples from basins in the Czech Republic: geochemical and petrographic properties in relation to lithotype. *Fuel*, 2012, 99: 129-142.
- [8] Bechtel A, Markic M, Sachsenhofer R F, et al. Palaeoenvironment of the upper Oligocene Trbovlje coal seam (Slovenia). *International Journal of Coal Geology*, 2004, 57(1): 23-48.
- [9] Crosdale P J. Lithotype sequences in the Early Miocene Maryville Coal Measures, New Zealand. *International Journal of Coal Geology*, 1995, 28(1): 37-50.
- [10] 肖贤明, 程顶胜. 腐泥煤的煤化学作用研究. *煤田地质与勘探*, 1992, 20(2): 21-29.
Xiao Xianming, Cheng Dingsheng. Studies on the coalification of sapropelic coals. *Coal Geology & Exploration*, 1992, 20(2): 21-29.
- [11] 肖贤明, 陈中凯, 金奎励. 中国腐泥煤的岩石学特征. *煤田地质与勘探*, 1990, 18(1): 7-13.
- [12] 赵海舟, 陈辉. 腐泥煤变质系列的红外光谱和 X 衍射特征. *中国煤田地质*, 1997, 19(2): 20-23.
Zhao Haizhou, Chen Hui. Infrared spectrum and X-ray diffraction characteristics of sapropelic coal series. *Coal Geology of China*, 1997, 19(2): 20-23.
- [13] 赵海舟. 腐泥煤变质系列的煤岩煤质特征. *中国煤田地质*, 1995, 7(1): 72-76.
- [14] 赵海舟. 腐泥煤变质系列热解色谱和氯仿沥青“A”的特点. *中国煤田地质*, 1998, 10(2): 23-26.
Zhao Haizhou. Characteristics of pyrolysis chromatogram of sapropelic coal metamorphic series and chloroform bituminous “A”. *Coal Geology of China*, 1998, 10(2): 23-26.
- [15] 赵海舟. 腐泥煤变质系列的核磁共振谱和顺磁共振谱特征. *煤田地质与勘探*, 1998, 26(2): 15-18.
Zhao Haizhou. The characteristics of nuclear magnetic resonance and paramagnetic resonance spectra in metamorphic series of sapropelic coal. *Coal Geology & Exploration*, 1998, 26(2): 15-18.
- [16] 赵海舟. 腐泥煤和腐植煤生物标志物色谱对比. *中国煤田地质*, 2002, 14(2): 16-19.
Zhao Haizhou. Chromatographic correlation of bioindicator in sapropelite and humic coal. *Coal Geology of China*, 2002, 14(2): 16-19.
- [17] 高长林, 叶德燎. 中国南方早古生界 3 类煤的稀土元素特征. *石油实验地质*, 1999, 21(3): 270-272.
Gao Changlin, Ye Deliao. Re geochemical characteristics of three types of coals in the early palaeozoic in Southern China. *Experimental Petroleum Geology*, 1999, 21(3): 270-272.
- [18] 刘桂建, 杨萍月, 彭子成, 等. 淄博煤田共生腐泥煤与腐植煤化学组成对比. *地质地球化学*, 2003, 31(1): 23-27.
Liu Guijian, Yang Pingyue, Peng Zicheng, et al. Comparative study of chemical composition of paragenetic sapropelic coal and humic coal from Zibo coalfield. *Geology-Geochemistry*, 2003, 31(1): 23-27.
- [19] Liu G, Yang P, Peng Z, et al. Comparative study of the quality of some coals from the Zibo coal field. *Energy*, 2003, 28(10): 969-978.
- [20] 姜尧发, 王西勃, 赵蕾. 大屯矿区太原组煤中稀土元素的赋存特征. *煤炭科学技术*, 2006, 34(1): 73-75.
Jiang Yaofa, Wang Xibo, Zhao Lei. Distribution characteristics of rare-earth element in coal of Taiyuan Group in Datun Mining Area. *Coal Science and Technology*, 2006, 34(1): 73-75.
- [21] 周国庆, 姜尧发, 刘梦溪. 徐州大屯腐泥煤的煤岩煤质和微量元素特征. *中国煤炭地质*, 2011, 23(7): 7-9.
Zhou Guoqing, Jiang Yaofa, Liu Mengxi. Sapropelic coal petrologic, quality and trace element characteristics in Datun Mining Area, Xuzhou. *Coal Geology of China*, 2011, 23(7): 7-9.

- [22] Dai S, Zheng X, Wang X, et al. Stone coal in China: A review. *International Geology Review*, 2017, 60: 5-6, 736-753.
- [23] 李太任, 张军营, 刘秀卿. 山西浑源藻煤、烛煤、腐植煤共生煤层成因分析. *煤炭学报*, 1993, 18(3): 85-95.
Li Tairen, Zhang Junying, Liu Xiuqing. Genesis of No. 7 coal seam, Hunyuan in Shanxi province. *Journal of China Coal Society*, 1993, 18(3): 85-95.
- [24] 吴敏杰. 安康地区高煤阶腐泥煤吸附特征研究. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
Wu Minjie. Study on adsorption characteristics of high-rank sapropelic coal in Ankang area. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- [25] 张秀仪, 童元贞, 肖达先, 等. 黄陵烛煤的成因探讨. *中国煤田地质*, 1996, 8(S1): 10-16.
Zhang Xiuyi, Tong Yuanzhen, Xiao Daxian, et al. Study on origw of cannel coal in Huangling mining district. *Coal Geology of China*, 1996, 8(S1): 10-16.
- [26] 李增学, 魏传久, 余继峰, 等. *煤地质学*. 北京: 地质出版社, 2009.
- [27] O'Keefe J M K, Bechtel A, Christanis K, et al. On the fundamental difference between coal rank and coal type. *International Journal of Coal Geology*, 2013, 118: 58-87.
- [28] Stach E. *Stach's Textbook of Coal Petrology*. 3rd ed. Berlin: Gebruder Borntraeger, 1982: 173-177.
- [29] 唐修义, 黄文辉. *中国煤中微量元素*. 北京: 商务印书馆, 2004.
- [30] 任德贻, 赵峰华, 代世峰, 等. *煤的微量元素地球化学*. 北京: 商务印书馆, 2006.
- [31] 唐书恒, 秦勇, 姜尧发. *中国洁净煤地质研究*. 北京: 地质出版社, 2006.
- [32] Dai S, Ren D, Chou C L, et al. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 94: 3-21.
- [33] Ketris M P, Yudovich Y E. Estimations of Clarkes for carbonaceous biolithes: World average for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 78: 135-148.
- [34] Dai S, Ren D, Chou C L, et al. Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 94: 3-21.
- [35] 代世峰, 任德贻, 李生盛. 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*, 2002, 31(5): 349-353.
Ren Shifeng, Ren Deyi, Li Shengsheng. Occurrence and sequential chemical extraction of rare earth element in coals and seam roofs. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2002, 31(5): 349-353.
- [36] 代世峰, 任德贻, 李生盛. 华北若干晚古生代煤中稀土元素赋存特征. *地球学报*, 2003.
Dai Shifeng, Ren Deyi, Li Shengsheng. Modes of occurrence of rare earth elements in some Late Paleozoic coals of North China. *Acta Geoscientia Sinica*, 2003, 24(3): 273-278.
- [37] 代世峰, 任德贻, 邵龙义, 等. 黔西晚二叠世煤地球化学性质变异及特殊组构的火山灰成因. *地球化学*, 2003, 32(3): 239-247.
Dai Shifeng, Ren Deyi, Shao Longyi, et al. Variation of coal geochemistry and special textures of Late Permian coals in the western Guizhou Province and their volcanic origin. *Geochimica*, 2003, 32(3): 239-247.

Progress in the research of trace elements in sapropelic coal of China

GUI Lin, LIU Guijian*, LIU Yuan

School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: Coal is the main energy source in China whose extensive use will cause a series of environmental problems, especially the migration and precipitation of its harmful trace elements. Although there is already a relatively complete research system of trace elements in coal, its trace element geochemistry research is far less developed than that of humic coal, due to the secondary economic status of sapropel. The extensive and thick distribution of sapropelic coal gives it a certain industrial value, and the content characteristics of trace elements in sapropelic coal have been partially reported. However, the modes of occurrence, enrichment mechanism and geological origin of trace elements in sapropelic coal need to be systematically studied. Therefore, based on the comprehensive analysis of domestic and foreign research on sapropel, this paper elaborates the hot issues, key contents and development direction of trace element geochemistry of sapropel. The geochemical research on sapropel is a supplement and improvement of coal geology and coal geochemistry theory, which has important scientific significance, It is also of great practical significance as its beneficial to the theoretical system of coal formation and resource development of special coal in China.

Keywords: sapropelic coal; trace elements; geochemistry