

淮北煤田煤中汞的赋存状态

郑刘根^{1,2}, 刘桂建¹, 齐翠翠¹, 张莹¹, 陈怡伟¹

1. 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽合肥 230026

2. Croucher Institute for Environmental Science, and Department of Biology, Hong Kong Baptist University, Kowloon Tong, Hong Kong SAR, China

摘要: 系统采集淮北煤田 10、7、5、4 和 3 煤层的 29 个煤样品, 采用逐级化学提取方法研究了煤中汞的赋存状态, 根据提取步骤和汞的特性, 将煤中的汞分为水溶态、离子交换态、有机态、碳酸盐结合态、硅酸盐结合态和硫化物结合态, 利用 Flow Injection Mercury System (FIMS) 分析了样品中总汞和不同形态中汞的含量。测试结果表明, 与华北石炭—二叠纪煤、中国煤以及美国煤含量相比较, 淮北煤田煤中汞的含量明显富集。逐级化学提取实验结果和煤中汞与硫、灰分的相关分析结果表明, 岩浆的侵入对煤中汞的赋存状态有较大的影响, 不受岩浆侵入影响的 10、4 和 3 煤层煤中的汞主要以有机态和硫化物结合态存在, 受岩浆侵入影响的 5 和 7 煤层中的汞主要以硅酸盐结合态存在。

关键词: 汞; 赋存状态; 逐级化学提取; 淮北煤田。

中图分类号: P618.130.2

文章编号: 1000-2383(2007)02-0279-06

收稿日期: 2006-03-28

Study on Modes of Occurrence of Mercury in Coals from the Huaibei Coalfield

ZHENG Liu gen^{1,2}, LIU Gui jian¹, QI Cui cui¹, ZHANG Ying¹, CHEN Yi wei¹

1. CAS Key Laboratory of Crust Mantle Material and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2. Croucher Institute for Environmental Science, and Department of Biology, Hong Kong Baptist University, Kowloon Tong, Hong Kong SAR, China

Abstract Sequential extraction tests using Flow Injection Mercury System (FIMS) were done on 29 coal samples collected from the number 3, 4, 5, 7, and 10 coal seams in the Huaibei coalfield. The average total Hg concentrations for the coal seams 3, 4, 5, 7, and 10 were 0.13, 0.18, 0.54, 0.34 and 0.19 mg/kg respectively. The average value of Hg for all of the coal samples was 0.26 mg/kg, which is higher than that of most Chinese and U.S. coals. Six modes of Hg occurrence were recognized, including water leachable, ion exchangeable, organic bound, carbonate bound, silicate bound, and sulfide bound Hg ones. With rare exception, little Hg was found in water soluble, ion exchangeable or carbonate bound forms. Sulfide bound Hg and organic bound Hg dominated seams 3, 4, and 10, whereas silicate bound Hg dominated seams 5 and 7. The relatively high Hg values observed in seams 5 and 7, especially in parting samples, are attributed to Hg enrichment by magmatic intrusions.

Key words: mercury; modes of occurrence; sequential extraction; Huaibei coalfield.

0 引言

汞是一种低熔点、低沸点、对人体有害的元素, 由于其毒性影响和在食物链中的生物放大性, 汞的

研究成为近几年研究的热点(USEPA, 2000; Milena *et al.*, 2003). 燃煤是大气中汞的重要来源, 尽管汞在煤中的浓度很低, 根据 Yudovich and Ketris (2005) 的最新统计, 世界煤中汞的克拉克值为

基金项目: 安徽省优秀青年基金项目(No. 04045064); 国家重点基础研究发展计划资助(No. 2006CB202202); 中国科学技术大学研究生创新基金项目(No. KD2005032).

作者简介: 郑刘根(1972-), 男, 博士研究生, 主要从事环境地球化学、环境科学方向研究. 通讯作者: 刘桂建, E-mail: lgj@ustc.edu.cn

表 1 淮北煤田煤中硫和灰分含量

Table 1 Sulfur and ash contents in coals from the Huaibei coalfield

	HB3-1	HB3-2	HB3-3	HB3-4	HB4-1	HB4-2	HB4-3	HB4-4	HB4-5	HB4-6
S(%)	10.08	11.34	14.33	14.63	8.75	11.68	27.74	18.33	20.29	20.18
灰分(%)	0.22	0.34	0.81	0.55	0.49	0.85	0.23	0.50	0.57	0.54
	HB4-7	HB4-8	HB4-9	HB5-1	HB5-2	HB5-3	HB5-4	HB5-5	HB5-6	HB7-1
S(%)	24.98	12.87	14.78	15.01	15.78	18.35	16.16	16.18	17.14	13.53
灰分(%)	0.49	0.46	0.43	0.88	0.50	0.83	0.67	0.49	0.46	0.44
	HB7-2	HB10-1	HB10-2	HB10-3	HB10-4	HB10-5	HB10-6	HB10-7	HB10-8	
S(%)	13.88	13.6	1.51	22.52	13.82	13.21	10.93	13.65	23.14	
灰分(%)	0.74	0.64	0.46	0.50	0.92	0.32	0.87	1.24	0.74	

(0.10±0.01)μg/g,但由于全球煤炭的消耗量巨大,因此众多的研究者认为,近几十年来全球大气中汞浓度的增加,主要是煤的消费大量增长造成的.汞已经成为煤中潜在毒害微量元素中关注最多的元素之一(Nriagu and Paeyna, 1988; Slemr and Langer, 1992; Toole O Neil *et al.*, 1999; Jozef *et al.*, 2003).

煤中汞的赋存状态决定汞在表生环境和加工利用过程中可能的运移和转化,是评价煤中汞的环境效应的基础.由于煤中汞的浓度极低,同时汞又是极易挥发的元素,因此对煤中汞的赋存状态的研究一直是一个难点.尽管众多的研究显示(Finkelman, 1994; Ghosh *et al.*, 1994; Querol *et al.*, 1995; Ding *et al.*, 2001; Diehl *et al.*, 2004),煤中的汞主要以固溶态赋存于煤中的黄铁矿中,但大量事实说明汞与有机质存在着很大的关联(Bool and Helble, 1995; Zhang *et al.*, 1999, 2004; Skyllberg *et al.*, 2004),Yudovich and Ketris(2005)认为煤中汞主要以粘土结合态、有机结合态和硫化物结合态等其他形式赋存.我国是产煤和用煤大国,由于煤种多、成煤时代长以及成煤环境差异大,煤中汞的赋存状态非常复杂,广泛深入的研究我国不同地区、不同时代以及不同煤种煤中汞的赋存状态,对正确控制和评价我国煤利用过程中汞的释放和环境效应具有重要意义.

1 研究区概况

淮北煤田位于安徽省北部,是中国华东地区重要的煤炭工业基地.矿区内煤炭储量丰富,煤层赋存条件好,以气煤、肥煤为主,并含有其他变质程度的煤.该区石炭、二叠系含煤岩系总厚大于1 300 m,石炭系本溪组和太原组含薄煤层,均不可采;二叠系山西组和下石盒子组为主要含煤层位;上石盒子组含

煤1~4层,局部可采;石千峰组为一套陆相杂色碎屑岩系,不含煤.

2 样品及实验

2.1 样品采集

从淮北煤田主采煤层中自下而上逐层刻槽系统采集29个煤样品,每个样品采样重量约为1 kg,样品采集后按要求进行保存,以避免水分散失和可能的污染.其中,样品HB10 1至HB10 9采自二叠纪山西组10煤,HB7 1到HB7 2、HB5 1到HB5 6和HB4 1到HB4 9分别采自二叠纪下石盒子组7煤、5煤和4煤,其中7煤和5煤层部分地受早期岩浆侵入,HB3 1到HB3 4采自二叠纪上石盒子组3煤.

2.2 实验及测试

样品中汞的逐级提取实验和测试分析在香港浸会大学生物系完成,硫的含量和灰分含量的分析在安徽理工大学煤化学实验室进行(表1).样品经干燥处理和磨碎后过200目筛,为测试样品中汞含量,称取0.1 g样品,加入15 mL HNO₃∶HCl∶HF=3∶1∶1,微波消解(600 W, 30 min; 1 200 W, 25 min; 1 200 W, 30 min),冷却后,加2次去离子水稀释到50 mL.

一些文献报道过不同的逐级提取方法对煤中汞的赋存状态的研究(Bool and Helble, 1995; Feng and Hong, 1999; Zhang *et al.*, 1999, 2004; 刘晶等, 2000; Palmer *et al.*, 2000).本次实验主要综合了Feng and Hong(1999)和Zhang *et al.*(2004)实验方法,同时参考了丁振华等(2003)对煤中砷的连续提取方法.为更好地分析煤中汞的赋存状态,结合笔者对煤中微量元素的前处理经验,对其中部分步骤进行了修改,实验提取步骤如表2.根据不同的提取步骤,将煤中汞的赋存状态分为水溶态、离子交换态、有机

表 2 煤中汞的赋存状态及其逐级化学提取方法

Table 2 Modes of occurrence of mercury and sequential extraction tests

步骤	提取方法	赋存形态
1	5 g 样品中加入 30 mL 两次去离子水, 25 ℃提取 24 h, 离心分离(3 500 rpm, 20 min), 溶液定容至 50 mL	水溶态
2	残渣中加入 30 mL NH ₄ C ₂ H ₃ O ₂ (1N), 余下方法同步骤 1	离子交换态
3	第 2 步的残渣中加入 20 mL CHCl ₃ (1. 47 g/cm ³) 比重液, 充分振荡, 离心分离(3 500 rpm, 20 min), 上浮部分 40 ℃干燥, 加入 HNO ₃ : HCl : HF(3 : 1 : 1), 微波消解, 余下同步骤 1	有机结合态
4	第 2 步下沉部分加入 20 mL HCl(0. 5%), 余下同步骤 1	碳酸盐结合态
5	第 4 步的残渣中加入 20 mL CHBr ₃ (2. 89 g/cm ³) 比重液, 余下同步骤 3	硅酸盐结合态
6	第 5 步下沉部分加入 HNO ₃ : HCl : HF(3 : 1 : 1), 微波消解, 余下同步骤 1	硫化物结合态

表 3 淮北煤田煤中汞的逐级化学提取实验结果(ng/g)

Table 3 Experimental results (ng/g) of sequential extractions on samples from the Huaibei coalfield

样品	水溶态	离子交换态	有机结合态	碳酸盐结合态	硅酸盐结合态	硫化物结合态	提取总量	总汞	提取率(%)
HB3-1	< dl	1. 69	26. 7	< dl	12. 4	34. 3	75. 1	72. 4	103. 7
HB3-2	< dl	< dl	30. 1	1. 76	6. 49	27. 2	65. 5	77. 6	84. 4
HB3-3	1. 47	7. 21	68. 6	9. 49	23. 2	107. 4	217. 4	210. 8	103. 1
HB3-4	3. 29	4. 12	64. 3	4. 43	17. 9	42. 8	136. 8	144. 5	94. 7
HB4-1	< dl	2. 66	18. 7	14. 4	9. 31	32. 9	78. 0	98. 5	79. 2
HB4-2	5. 44	11. 0	94. 6	11. 3	18. 7	111. 5	252. 5	245. 8	102. 7
HB4-3	10. 2	6. 47	46. 6	13. 3	11. 7	52. 1	140. 4	153. 2	91. 6
HB4-4	< dl	< dl	21. 6	7. 34	5. 47	38. 9	73. 3	58. 9	124. 5
HB4-5	7. 45	12. 1	78. 4	< dl	16. 3	43. 2	157. 5	139. 4	112. 9
HB4-6	5. 35	2. 19	87. 4	29. 7	21. 5	122. 6	268. 7	274. 9	97. 8
HB4-7	22. 1	8. 10	41. 6	12. 3	27. 2	86. 9	198. 2	257. 3	77. 0
HZ4-8	< dl	16. 2	46. 7	44. 3	13. 1	40. 2	160. 5	155. 7	103. 1
HZ4-9	8. 22	19. 6	74. 2	27. 2	22. 9	92. 7	236. 6	272. 7	86. 8
HB5-1	7. 26	4. 39	52. 4	< dl	128. 6	79. 4	272. 1	335. 3	81. 1
HB5-2	34. 9	32. 4	183. 0	49. 2	386. 9	144. 1	830. 5	793. 8	104. 6
HB5-3	13. 5	19. 7	98. 7	4. 33	244. 3	92. 2	472. 7	431. 8	109. 5
HB5-4	9. 45	22. 9	88. 4	7. 27	203. 9	67. 6	399. 5	411. 4	97. 1
HB5-5	< dl	37. 4	67. 2	13. 2	303. 8	279. 6	701. 2	643. 5	109. 0
HB5-6	67. 3	79. 2	77. 9	39. 4	247. 1	145. 4	656. 3	645. 7	101. 6
HB7-1	16. 6	15. 7	48. 9	14. 2	121. 4	59. 1	275. 9	312. 7	88. 2
HB7-2	19. 1	14. 2	54. 7	17. 6	144. 3	88. 7	338. 6	370. 8	91. 3
HB10-1	4. 17	6. 55	29. 3	3. 47	6. 53	87. 4	137. 4	162. 1	84. 8
HB10-2	1. 88	4. 34	46. 3	< dl	4. 42	63. 3	120. 2	114. 2	105. 3
HB10-3	< dl	9. 43	45. 2	4. 22	5. 86	49. 4	114. 1	148. 9	76. 6
HB10-4	4. 33	7. 29	47. 9	11. 8	17. 9	147. 5	236. 7	275. 6	85. 9
HB10-5	< dl	3. 44	74. 2	6. 21	1. 43	42. 1	127. 4	121. 4	104. 9
HB10-6	2. 22	4. 01	66. 2	2. 13	4. 43	101. 1	177. 9	193. 2	92. 1
HB10-7	7. 99	4. 33	76. 2	4. 74	4. 47	166. 4	264. 1	290. 7	90. 9
HB10-8	3. 64	7. 21	64. 3	4. 54	6. 32	99. 3	185. 3	211. 0	87. 8

注:< dl 表示低于检测限.

态、碳酸盐结合态、硅酸盐结合态和硫化物结合态. ng /g, 测试结果见表 3.

汞的测试分析采用 Flow Injection Mercury System(FIMS, Perkin Elmer As90), 该仪器的检测限为 0. 05 ng /g. 实验和测试过程中平行带入国际标准煤样物质 1632b(SRM 1632b), 该物质中汞的含量为70ng /g, 实验检测的汞的含量为(68. 1 ±8. 0)

3 结果及分析

3.1 淮北煤田煤中汞的含量

淮北煤田煤中汞的范围、平均值如表 4 所示. 为

表 4 淮北煤田与华北 C P、中国和美国煤中汞的含量对比(ng/g)

Table 4 Concentrations of total mercury from the Huaibei coalfield as compared with G P coals of northern China, Chinese coals and average U. S. coals

淮北煤田(ng/g)				华北石炭-二叠纪 ^a ($\mu\text{g/g}$)		中国 ^a ($\mu\text{g/g}$)		美国 ^b ($\mu\text{g/g}$)		Clarke 值($\mu\text{g/g}$)	EF
范围	AM	GM	样品量	范围	AM	范围	AM	AM	AM		
总汞	58.9~793.8	262.9	214.1	29	0.01~0.5	0.17	0.01~0.5	0.1	0.17	0.1	2.6

注: AM, 算术平均值; GM, 几何平均值; a. 唐修义和黄文辉(2000); b. Finkelman(1993); c. Yudovich and Ketris(2005).

更好地了解淮北煤田煤中汞的富集程度, 将煤中汞的含量与前人报道的中国华北石炭-二叠纪、中国煤中以及美国煤中的汞进行了对比. 结果表明, 汞在淮北煤中明显富集, 所分析的煤样品中汞的最高值为793.8 ng/g, 高于唐修义和黄文辉(2000) 报道的华北石炭-二叠纪和中国煤中汞的范围的上限0.5 $\mu\text{g/g}$, 淮北煤中汞的算术平均值分别是华北石炭-二叠纪和中国煤中汞的平均值的1.5和2.6倍, 是 Finkelman(1993) 统计的美国煤中汞的1.5倍, 与 Yudovich and Ketris(2005) 所报道的最新的世界上煤中汞的克拉克值相比, 富集系数 EF(淮北煤中汞的平均含量与世界煤中汞的克拉克值比值) 达到2.6.

3.2 煤中汞的赋存状态

3.2.1 相关性分析 元素的含量和灰分含量的相关性分析通常用来表征煤中该元素与有机和无机的亲和性(Kortenski and Sotirov, 2002; 刘桂建等, 2004; Dai *et al.*, 2005; Zheng *et al.*, 2006). 淮北煤田煤中汞的含量与灰分含量之间的关系如图 1. 从图 1 可知, 汞和灰分的相关性较差, 相关系数仅为0.15($p<0.05$), 低于标准的统计意义值 ± 0.20 , 说明淮北煤田煤中的汞可能存在有机结合态和无机结合态并存的状态.

煤中的汞与黄铁矿存在密切的联系被众多的研究者所报道, 这个结论的一个主要依据是煤中汞的含量与硫的含量之间存在较好的相关性, 特别是在

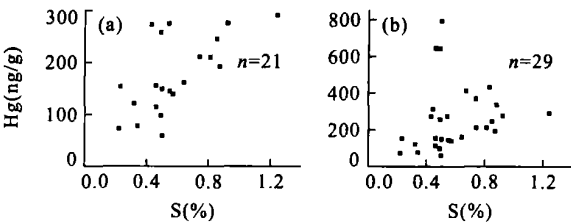


图 2 煤中汞和硫的相关性

Fig. 2 Relationship between mercury and sulfur in all coal samples from the Huaibei coalfield

a. 未受岩浆侵入影响的煤层 b. 受岩浆侵入影响的煤层

高度富集汞的煤中, 这种现象更普遍(Feng and Hong, 1999; Ding *et al.*, 2001; Diehl *et al.*, 2004). 淮北煤田属于低硫煤, 硫在所采样品中的平均含量为0.59%, 笔者所在课题组前期的研究表明(Liu *et al.*, 2004; 高连芬等, 2005), 当煤中硫的含量低于0.5%时, 有机硫可能占有更多的比例, Skylberg *et al.* (2004) 研究认为, 有机硫可能是导致煤中有机结合态汞存在的一个因素. 图 2b 给出了淮北煤田煤中硫和汞的相关性, 相关系数仅为0.17($n=29, p<0.05$), 但如果对不受岩浆侵入影响的10煤、4煤和3煤层中的硫和汞做相关分析(图 2a), 发现汞和硫存在较好的相关性, 其相关系数高达0.64($n=21, p<0.05$), 说明岩浆的侵入对煤中汞的赋存方式存在较大的影响, 不受岩浆侵入影响的10、4和3煤层中的汞可能主要存在有机硫和无机硫结合的形态, 而受岩浆侵入影响的5煤和7煤中的汞的赋存状态可能存在其他的结合方式.

3.2.2 逐级化学提取实验结果分析 表 3 为逐级化学提取的实验结果, 根据提取步骤, 将煤中汞的赋存状态分为水溶态、离子交换态、有机结合态、碳酸盐结合态、硫化物结合态和硅酸盐结合态6种. 从表 3 结果可知, 利用2次去离子水、 $\text{NH}_4\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2$ (1N) 和 HCl (0.5%) 溶液从煤中提取的汞的含量极低, 说明淮北煤田煤中的汞以水溶态、离子交换态和碳酸盐结合态存在的较少.

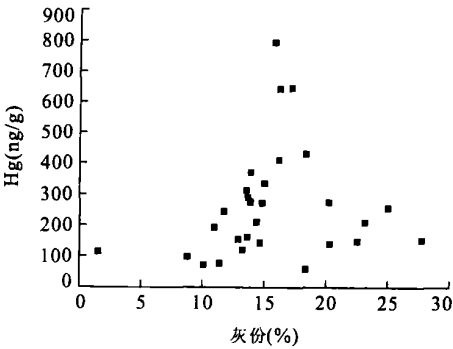


图 1 煤中的汞和灰分含量之间的相关性

Fig. 1 Relationship between mercury and ash yield

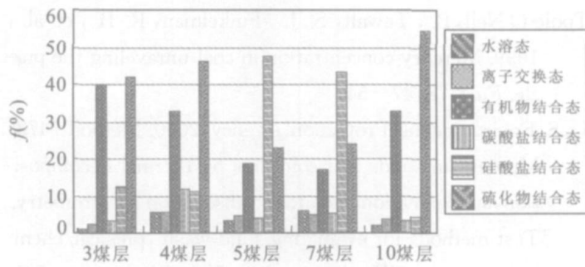


图 3 不同煤层煤中汞的赋存状态所占百分比
Fig. 3 Percent concentration of mercury extracted in different steps of different coal seams

淮北煤田不同煤层煤中汞的赋存状态的逐级提取结果如图 3 所示。从图 3 可知,受岩浆侵入的影响,不同煤层煤中汞的赋存状态存在较大的区别。不受岩浆侵入影响的 10 煤、4 煤和 3 煤层中汞的赋存状态主要是有机结合态(分别占总汞含量的 32.9% 和 39.9%)和硫化物结合态(分别占总汞含量的 41.8%和 54.5%)。而受岩浆侵入影响的 5 煤层和 7 煤层中汞的赋存状态主要以硅酸盐结合态为主,分别占 5 煤层和 7 煤层中总汞含量的 47.6%和 43.3%,其次为硫化物结合态和有机物结合态。笔者前期的研究发现(Zheng *et al.*, 2006),5 煤中矿物质主要为粘土矿物、碳酸盐矿物和石英以及少量的针铁矿,其中粘土矿物含量最高,相对含量占 60% 以上,且主要为高岭石和伊利石,其次为蒙脱石和绿泥石,5 煤和 7 煤中的汞的逐级化学提取实验显示汞主要以硅酸盐结合态存在,可能与粘土的吸附作用有关。这些结果与 Feng and Hong(1999)以及 Zhang *et al.*(1999, 2004)对中国西南地区煤中汞的赋存状态的研究结果存在较大的不同,他们的研究结果显示,西南地区煤中的汞主要以硫化物结合态存在,而以硅酸盐结合态存在的相对较少。

4 结论

(1) 淮北煤田煤中的汞明显富集,煤中汞的含量范围为 58.9~793.8 ng/g,算术平均值为 262.9 ng/g,分别是华北石炭-二叠纪煤、中国煤和美国煤中汞的平均含量的 1.5、2.6 和 1.5 倍,与世界煤中汞的克拉克值相比,富集系数达到 2.6。(2) 受岩浆侵入的影响,不同煤层煤中汞的赋存状态存在较大的差别,相关分析和逐级提取实验分析的结果显示,不受岩浆侵入影响的 10 煤、4 煤和 3 煤层中的汞主要

以有机结合态和硫化物结合态为主,受岩浆侵入影响的 5 煤和 7 煤层中的汞主要以硅酸盐结合态为主,其次为硫化物结合态和有机结合态。

References

Boo L. E., Helble J. J., 1995. A laboratory study of the partitioning of trace elements during pulverized coal combustion. *Energy Fuels*, 9(5): 880-887.

Dai S. F., Ren D. Y., Tang, Y. G., et al., 2005. Concentration and distribution of elements in Late Permian coals from western Guizhou Province, China. *International Journal of Coal Geology*, 61: 119-137.

Diehl S. F., Goldhaber, M. B., Hatch, J. R., 2004. Modes of occurrence of mercury and other trace elements in coals from the Warrior field, Black Warrior basin, northwestern Alabama. *International Journal of Coal Geology*, 59: 193-208.

Ding Z. H., Zheng, B. S., Finkelman, R. B., et al., 2003. Subsequent leaching study of typical high As coal samples from Southwest Guizhou Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(2): 209-213 (in Chinese with English abstract).

Ding Z. H., Zheng, B. S., Zhang, J. Y., et al., 2001. Geological and geochemical characteristics of high arsenic coals from endemic arsenosis areas in southwestern Guizhou Province, China. *Applied Geochemistry*, 16: 1353-1360.

Feng X., Hong, Y., 1999. Modes of occurrence of mercury in coals from Guizhou, People's Republic of China. *Fuel*, 78: 1181-1188.

Finkelman, R. B., 1993. Trace and minor elements in coal. In: Engel, M. H., Macko, S. A., eds., *Organic geochemistry*. Plenum, New York, 593-607.

Finkelman, R. B., 1994. Modes of occurrence of potentially hazardous elements in coal: Levels of confidence. *Fuel Process Technology*, 39: 21-24.

Gao L. F., Liu, G. J., Chou C. L., et al., 2005. The study of sulfur geochemistry in Chinese coals. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 24(1): 79-87 (in Chinese with English abstract).

Ghosh, S. B., Das, M. C., Roy, R. R., et al., 1994. Mercury in Indian coals. *Indian Journal of Chemistry Technology*, 1: 237-240.

Jozef, M. P., Elisabeth, G. P., Frits, S., et al., 2003. Mapping 1995 global anthropogenic emissions of mercury. *Atmospheric Environment*, 37(1): 109-117.

Kortenski, J., Sotirov, A., 2002. Trace and major element

- content and distribution in Neogene lignite from the Sofia basin, Bulgaria. *International Journal of Coal Geology*, 52: 63 – 82.
- Liu, G. J., Yang, P. Y., Peng, Z. C., 2004. Petrographic and geochemical contrasts and environmentally significant trace elements in marine influenced coal seams, Yanzhou mining area, China. *Journal of Asian Earth Science*, 23: 491 – 506.
- Liu, G. J., Zhang, H. Y., Zheng, L. G., et al., 2004. Distribution, occurrence and accumulation factors of chlorine in coal from Jining coal field. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1): 85 – 92 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Lu, X. H., Guo, X., et al., 2000. Speciation analysis of arsenic and mercury in coal. *Journal of Huazhong University of Science & Technology*, 28(7): 71 – 73 (in Chinese with English abstract).
- Milena, H., Nataša, N., Vesna, F., et al., 2003. Total mercury, methylmercury and selenium in mercury polluted areas in the province Guizhou, China. *The Science of the Total Environment*, 304: 231 – 256.
- Nriagu, J. Q., Paeyna, J. M., 1988. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soil by trace metals. *Nature* 333: 134 – 139.
- Palmer, C. A., Mroczkowski, S. J., Kolker, A., et al., 2000. Chemical analyses and modes of occurrence of selected trace elements in a Powder River basin coal and its corresponding simulated cleaned coal. U. S. Geology Survey Open File Reo., 00 – 323, 52 Washington, D. C.
- Quero, X., Fernández Turie, J. L., López Soler, A., 1995. Trace elements in coal and their behavior during combustion in a large power station. *Fuel* 74: 331 – 343.
- Skyllberg, U., Xia, K., Bloom, P. R., et al., 2004. Binding of mercury (II) to reduced S in soil organic matter along upland peat soil transects. *Journal of Environment Quality*, 29: 855 – 865.
- Slemr, F., Langer, E., 1992. Increase in global atmospheric concentration of mercury inferred from measurements over the Atlantic Ocean. *Nature* 355: 434.
- Tang, X. Y., Huang, W. H., 2000. Trace elements in Chinese coals. The Commercial Press, Beijing, 8 (in Chinese).
- Toole O'Neil, B., Tewalt, S. J., Finkelman, R. B., et al., 1999. Mercury concentration in coal unraveling the puzzle. *Fuel*, 78: 47 – 54.
- U.S. Environmental Protection Agency, 2000. Method 7473. Mercury in solids and solutions by thermal decomposition, amalgamation and atomic absorption spectrometry. Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical methods, SW – 846, update IV A. Washington, DC: Gov. Print. Office.
- Yudovich, Ya. E., Ketris, M. P., 2005. Mercury in coal: A review Part 1. Geochemistry. *International Journal of Coal Geology*, 62: 107 – 134.
- Zhang, J., Qi, U. Y., Ren, D., et al., 2004. Concentrations and occurrences of mercury and arsenic in coals from the Qianxi fault depression area in southwestern Guizhou, China. 12th International Conference of Coal Science (2 – 6 Nov. 2003), Cairns, Australia No. 7B2, 9.
- Zhang, J., Ren, D., Xu, D., 1999. Distribution of arsenic and mercury in Triassic coals from Longtoushan syncline, southeastern Guizhou, P. R. China. In: Li B. Q., Liu Z. Y., eds., Prospects for coal science in the 21st century. Shanxi Science and Technology Press, Taiyuan, 153 – 156.
- Zheng, L. G., Liu, G. J., Chou, C. L., et al., 2006. Geochemistry of rare earth elements in Permian coals from the Huaibei coalfield, Anhui Province, China. *Fuel* (accepted).

附中文参考文献

- 丁振华, 郑宝山, Finkelman, R. B., 等, 2003. 典型高砷煤样品的连续浸取实验研究——兼论黔西南高砷煤中砷的赋存状态. 地球科学——中国地质大学学报, 28(2): 209 – 213.
- 高连芬, 刘桂建, Chou, C. L., 等, 2005. 中国煤中硫的地球化学研究. 矿物岩石地球化学通报, 24(1): 79 – 87.
- 刘桂建, 张浩原, 郑刘根, 等, 2004. 济宁煤田煤中氯的分布、赋存及富集因素研究. 地球科学——中国地质大学学报, 29(1): 85 – 92.
- 刘晶, 陆晓华, 郭欣, 等, 2000. 煤中痕量砷和汞的形态分析. 华中理工大学学报, 28(7): 71 – 73.
- 唐修义, 黄文辉, 2000. 中国煤中的微量元素. 北京: 商务印书馆, 8.