

薛杨,邱素芬,许端平,等.不同粒级煤胶体对汞的吸附热力学[J].煤炭学报,2017,42(4):1050-1055. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2016.0987

Xue Yang, Qiu Sufen, Xu Duanping, et al. Adsorption thermodynamics of mercury on three kinds of particle size colloids from coal[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 1050-1055. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0987

不同粒级煤胶体对汞的吸附热力学

薛 杨¹, 邱素芬¹, 许端平¹, 赵晓亮^{1,2}, 李佳慧¹, 刘嘉欣¹

(1. 辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁省煤炭资源安全开采与洁净利用工程研究中心, 辽宁 阜新 123000)

摘 要:采集煤样并提取煤胶体,通过分批实验研究其对汞的吸附热力学特性。结果表明:温度和粒径都能显著影响煤胶体对汞的吸附作用,随温度的升高、粒径的减小,煤胶体对汞的吸附量均增大。煤胶体对汞的吸附过程可用吸附-分配复合模型较好的描述,这说明汞在煤胶体上的吸附并不是单一的表面吸附或分配作用,而是这两种吸附作用的叠加。其中,0~2, 2~5 μm的煤胶体对汞的吸附以表面吸附为主,而汞在5~10 μm的煤胶体上的吸附则主要是分配作用。另外,温度越高、煤胶体的粒径越小,分配作用在煤胶体对汞的吸附中的贡献越小,表面吸附的贡献越大。吸附反应的 ΔG^0 为负值, ΔH 在24.5~86.1 kJ/mol, ΔS 为正值,说明煤胶体对汞的吸附可自发进行,为吸热反应,吸附过程中系统的混乱度增加。汞在0~2 μm煤胶体上以化学吸附为主,而在2~5和5~10 μm的煤胶体上则主要为物理吸附。

关键词:煤胶体;汞;吸附热力学;等温吸附

中图分类号:X506

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2017)04-1050-06

Adsorption thermodynamics of mercury on three kinds of particle size colloids from coal

XUE Yang¹, QIU Su-fen¹, XU Duan-ping¹, ZHAO Xiao-liang^{1,2}, LI Jia-hui¹, LIU Jia-xin¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technology University, Fuxin 123000, China; 2. Research Center of Coal Resources Safe Mining and Clean Utilization of Liaoning, Fuxin 123000, China)

Abstract: Coal samples were collected from Huolinhe Coal mine in Inner Mongolia, China, and three kinds of particle size colloids (0-2, 2-5, and 5-10 μm) were extracted. The batch experiments have been carried out to study the adsorption isotherm and thermodynamics of mercury on colloid from coal. The results show that the sorption was affected by temperature and particle size. When temperature rose, the sorption capacities of colloids from coal were increased. Sorption capacity was decreased as the increase of particle size. The data of sorption isotherm of mercury on colloid from coal was discussed using two kinds of the Dual Adsorption-Partition models. The experimental data fitted the Dual Adsorption-Partition model. For the colloids with sizes <5 μm, the adsorption is predominant in the sorption of mercury, which accounts for 64.1% - 83.4% of the sorption. When the particle size is 5-10 μm, the accounts of the partition were 49.6 - 92.5. At the different temperatures, the contribution of adsorption to sorption follows the order "45 °C" > "35 °C" > "25 °C". The value of Gibbs free energy was negative, which showed that the reaction process was spontaneous. Sorption enthalpy was in a range from 24.5-86.1 kJ/mol, which indicated that the sorption process was endothermic. The change of entropy value was all positive, which showed that the sorption reaction was an increased

收稿日期:2016-07-18 修回日期:2016-10-03 责任编辑:许书阁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41373125);辽宁工程技术大学生产技术创新研究基金资助项目(20160005T);辽宁省煤炭资源安全开采与洁净利用工程研究中心开放基金资助项目(LNTU15KF13)

作者简介:薛 杨(1979—),男,河北昌黎人,讲师,硕士。Tel:0418-3352505, E-mail: xueyangqq@126.com. 通讯作者:许端平(1961—),男,江苏溧水人,教授,博士。E-mail: xdp1961@sina.com

randomness process. The adsorption of mercury on the colloid (0–2 μm) was mainly a chemical adsorption process, while on the colloids (2–5 μm and 5–10 μm) were mainly a physical adsorption process.

Key words: colloids from coal; mercury; adsorption thermodynamics; isotherm

汞是环境中毒性极强的重金属元素之一。不同于有机污染物,汞无法降解。一旦进入食物链,会在生物体内蓄积^[1-2],对中枢神经系统、肾、肺和生殖系统产生急性或慢性毒性作用^[3-5]。由于汞具有持久性、生物富集性和强毒性等特性,因此被许多国际机构列为优先污染物^[6-7]。聚氯乙烯的生产、燃煤、造纸、橡胶加工等行业都会导致汞向环境中的释放^[8-9],其中,孙阳昭等认为燃煤是汞无意排放的优先控制行业^[10]。

煤炭在开采、贮存和加工运输过程中会产生大量的粉尘,其中小于 10 μm 的部分在环境科学领域称为煤胶体^[11],同时在燃煤过程中也会产生大量 10 μm 以下的细颗粒物^[12]。研究表明:随煤粉粒度的减小,比表面积急剧增大,大分子结构被破坏,表面官能团增多,提高其对污染物质的吸附作用^[13-15]。吸附污染物的煤胶体进入土壤地下水系统。在土壤中,由于胶体粒径的排阻作用,胶体能够以远远超过水流的速度在土壤孔隙中运移^[16-19]。重金属、有机污染物、病毒、农药等污染物均可吸附于煤胶体之上^[20-22],通过胶体的优先流而加速其在地表水、地下水和土壤中的运移^[23],甚至以超过水的速度运移^[24-25],进而增强了污染物的移动性^[26-27]。因此,研究煤胶体对汞的吸附特性,对预测汞的环境效应,寻求地下水中汞的控制对策和措施有着重要的意义。

1 实验材料与方法

1.1 煤胶体的制备与表征

煤粉样品采集自内蒙霍林河矿区,过筛(180 目筛)风干后备用。煤胶体的提取采用重力沉降和离心沉降法进行,称取 132 g 风干样品置于 5 000 mL 的烧杯中,加入 4 000 mL 去离子水(水土比为 1 000 : 33(m/m)),超声 30 min(每 5 min 搅拌一次),沉降 24 h,用虹吸法取 20 cm 上清液,其中悬浮的固体均为粒径 < 10 μm 的煤胶体。将上清液以 1 500 r/min 离心 10 min,取上清液中悬浮的固体,得到粒径 < 2 μm 的煤胶体,而沉降下来的固体再加水配成水土比为 1 000 : 33(m/m) 的悬浮液,超声 30 min(每 5 min 搅拌一次),沉降 1 h,用虹吸法取 10 cm 上清液中悬浮的固体,得到粒径 2 ~ 5 μm 的煤胶体,而沉降下来的固体则为 5 ~ 10 μm 的煤胶体。将上述方法提取的煤胶体冷冻干燥,低温保存备用。

将各粒级的煤胶体配成悬浮液,超声分散 3 min,用 LA-300 型激光粒度仪测定其粒径分布。BET 法测定胶体的比表面积。煤胶体的 pH 值采用国标方法(GB/T 12496. 7—1999)测定。

1.2 煤胶体对汞的等温吸附实验方法

分别准确称取 0 ~ 2, 2 ~ 5, 5 ~ 10 μm 煤胶体 0.05 g 于一系列 100 mL 具塞磨口锥形瓶中,加入 30 mL 质量浓度为 0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 mg/L 的汞溶液,在空气浴恒温振荡箱中 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,以 150 r/min 分别振荡 12 h(动力学实验中确定的到达平衡时间为 6 ~ 8 h),用移液管准确移取 20 mL 样品溶液于 50 mL 离心管中,4 000 r/min 离心 20 min,取上清液过 0.22 μm 的 PES 滤膜,用 5% 的 HCl 溶液稀释以达到原子荧光光谱仪检测限,用原子荧光光谱仪测量汞的浓度。改变恒温振荡箱温度为 35, 45 $^{\circ}\text{C}$ 重复上述过程。每组实验做 3 个平行样,文中所示为平均值。

2 实验结果与讨论

2.1 煤胶体的性质

所提取煤胶体的粒径分布如图 1 所示,0 ~ 2, 2 ~ 5 和 5 ~ 10 μm 的煤胶体的质量分数分别为 72.17%, 59.36% 和 56.96%,中位粒径和平均粒径分别是 1.875 和 1.981 μm , 3.409 和 3.905 μm , 7.974 和 8.269 μm ,说明所提取的煤胶体基本符合预设的范围。所提取煤胶体的 pH 值、比表面积及孔隙分布见表 1。

由表 1 可知,随煤胶体粒径的增加,煤胶体的 pH 值逐渐增加。BET 比表面积、总孔容量由大到小分别为:0 ~ 2 > 2 ~ 5 > 5 ~ 10 μm ,平均孔径由小到大分别为:0 ~ 2 > 2 ~ 5 > 5 ~ 10 μm 。

2.2 煤胶体对汞的等温吸附特性

不同温度条件下,0 ~ 2, 2 ~ 5, 5 ~ 10 μm 煤胶体对汞的吸附等温线如图 2 所示。由图 2 可知,对于 0 ~ 2, 2 ~ 5 和 5 ~ 10 μm 的煤胶体,随温度的升高,煤胶体对汞的吸附量逐渐增加,表明吸附过程为吸热反应。可能是因为温度升高,加快了 Hg^{2+} 离子向吸附剂的运动速率,增大了煤胶体与 Hg^{2+} 的接触几率,让更多的吸附质有机会与吸附剂发生吸附作用;另外,温度升高, Hg^{2+} 离子的活度相应增加,有利于煤胶体对 Hg^{2+} 的吸附^[28]。

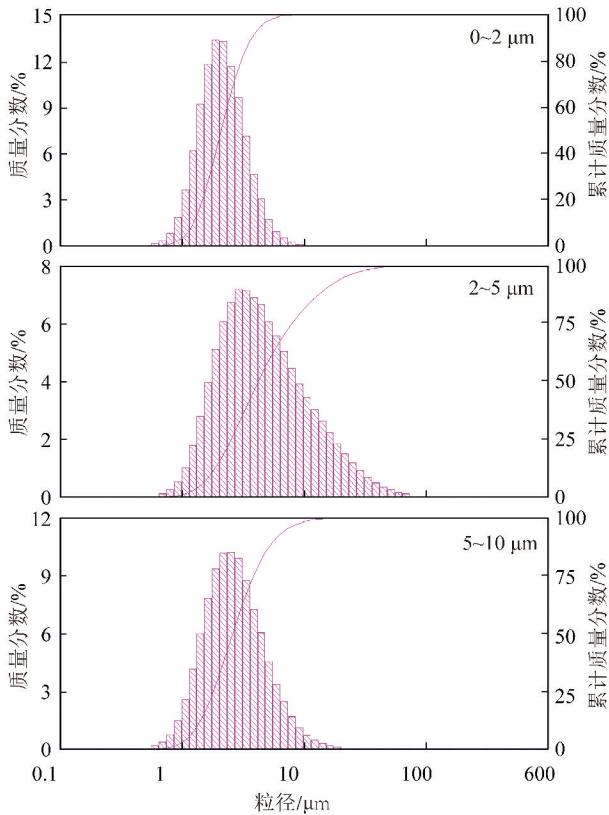


图1 煤胶体粒径分布

Fig. 1 Diameter distribution of colloids from coal

表1 煤胶体的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of colloids from coal

粒径/ μm	pH 值	比表面积/ (m ² · g ⁻¹)	总孔容量/ (cm ³ · g ⁻¹)	平均孔径/ nm
0~2	5.23	55.09	0.297 0	107.8
2~5	5.32	22.59	0.191 5	165.2
5~10	5.70	7.323	0.060 5	169.5

在同一温度条件下,随煤胶体粒径的增大,煤胶体对 Hg²⁺ 的饱和吸附量逐渐变小,可能是因为随煤胶体的粒径增大,其比表面积逐渐减小,减小了其与 Hg²⁺ 的接触面积,进而使煤胶体对 Hg²⁺ 的吸附量降低。

2.3 表面吸附和分配作用对汞在煤胶体上吸附作用的贡献

夏星辉等^[29]指出,在自然条件下,有机污染物在沉积物上的吸附过程是复杂的,不是单一的表面吸附或者分配过程,即吸附等温线可能是不同类型的吸附等温线的重叠,可用吸附-分配复合模式来表示,见式(1),(2)。式(1)为 Langmuir 吸附等温式和线性分配等温式的复合,式(2)为 Freundlich 吸附等温式和线性分配等温式的复合。

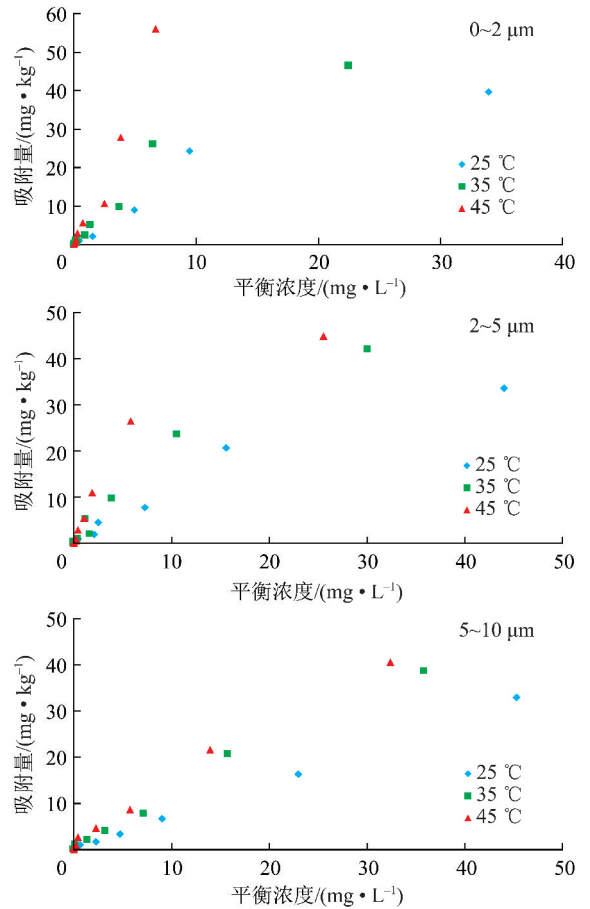


图2 煤胶体对汞的吸附等温线

Fig. 2 Sorption isotherms of Hg on colloids at different temperature

$$q_c = \frac{ak_L C_e}{1 + k_L C_e} + K_d C_e \quad (1)$$

$$q_c = k_F C_e^n + K_d C_e \quad (2)$$

为了解表面吸附和分配作用对汞在煤胶体上吸附的贡献,运用吸附-分配复合模型对图2的数据进行拟合,拟合结果见表2。

表2 两种分配复合模型拟合参数

Table 2 Parameters obtained from the dual adsorption-partition model

粒径/ μm	温度/ °C	L-分配复合模型			F-分配复合模型	
		a	R ²	SSE	R ²	SSE
0~2	25	41	0.973	2.444	0.956	3.097
	35	47	0.978	2.505	0.968	3.042
	45	52	0.992	1.991	0.965	3.768
2~5	25	34	0.984	1.572	0.975	1.989
	35	42	0.992	1.366	0.984	1.917
	45	45	0.996	1.082	0.968	2.950
5~10	25	35	0.999	0.256	0.999	0.256
	35	38	0.995	0.937	0.999	1.128
	45	40	0.996	0.977	0.994	0.997

由表2可知,用吸附-分配复合模型可以很好的描述煤胶体对汞的吸附过程(R^2 更大,且最大吸附量也与实验最大吸附量相符),这说明汞在煤胶体上的吸附并不是单一的表面吸附或分配作用,而是这两种吸附作用的叠加。

而在两种吸附分配模型中,式(1)的拟合效果要优于式(2) (R^2 更大,SSE更小)。因此选用 Langmuir 吸附等温式和线性分配等温式的复合模型来分析表面吸附和分配作用对汞在煤胶体上吸附的贡献,结果见表3。

表3 表面吸附和分配作用对总吸附的贡献
Table 3 Contribution of adsorption and partition to sorption

粒径/ μm	温度/ $^{\circ}\text{C}$	Freundlich 和分配作用复合模型			Langmuir 和分配作用复合模型		
		最大吸附量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	F 表面吸附 贡献/%	分配作用 贡献/%	最大吸附量/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	L 表面吸附 贡献/%	分配作用 贡献/%
0~2	25	41.07	99.95	0.05	41.27	64.1	35.9
	35	47.77	99.95	0.05	47.06	65.1	34.9
	45	51.68	91.10	8.90	48.27	83.4	16.6
2~5	25	34.66	99.89	0.11	34.06	64.9	35.1
	35	42.92	99.97	0.03	42.20	65.6	34.4
	45	46.46	100	0	45.04	80.6	19.4
5~10	25	32.16	100	0	35.26	7.5	92.5
	35	38.98	99.95	0.05	38.77	40.2	59.8
	45	40.71	92.02	7.98	40.62	50.4	49.6

由表3可知,在25,35和45 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,0~2 μm 表面吸附的贡献率分别为64.1%,65.1%和83.4%,而粒径分别为2~5 μm 时,其表面吸附的贡献率分别为64.9%,65.6%,80.6%;粒径为5~10 μm 时,其表面吸附的贡献率分别为7.5%,40.2%和50.4%。

表明随温度的升高,分配作用的贡献率逐渐减少,而表面吸附的贡献率则逐渐增加。这是因为随温度的升高,汞的溶解度增大,降低了 Hg^{2+} 在煤胶体上的分配作用^[30]。同时 Hg^{2+} 的运动速度变快,增加了其与煤胶体接触的机会。

而粒径越大,分配作用的贡献率越大而表面吸附的贡献率越小,这是因为随煤胶体粒径的增大,煤胶

体的比表面积减小,表面的吸附点位减少。

2.4 煤胶体对汞的吸附热力学特性

为了解煤胶体对汞的吸附热力学特性,通过下列公式计算煤胶体对Hg吸附的各项指标参数^[31]为

$$K_c = q/C_e \quad (3)$$

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_c \quad (4)$$

$$\Delta G^0 = \Delta H - T\Delta S \quad (5)$$

式中, K_c 为平衡常数; C_e 为平衡质量浓度(mg/L); q 为平衡吸附量(mg/kg); ΔG^0 为自由能变(J/mol); R 为气体常数($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$); T 为绝对温度(K); ΔH 为焓变(kJ/mol); ΔS 为熵变($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)。

热力学参数计算结果见表4。

表4 热力学参数
Table 4 Parameters of thermodynamic equation

粒级/ μm	温度/ $^{\circ}\text{C}$	$K_c/10^{-3}$	$-\Delta G^0/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta S/(\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1})$	$\Delta H/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
0~2	25	1.167	17.5		
	35	2.070	19.6	319.5	86.1
	45	8.389	23.9		
2~5	25	0.761	16.4		
	35	1.390	18.5	166.0	37.0
	45	1.760	19.8		
5~10	25	0.724	16.3		
	35	1.073	17.9	126.7	24.5
	45	1.249	18.8		

自由能变是吸附驱动力的体现, $\Delta G^0 < 0$, 说明吸附后标准自由能的变小是煤胶体对 Hg^{2+} 吸附的推动力, 表明吸附反应可自发进行。温度从 25 °C 上升到 45 °C, ΔG^0 的绝对值逐渐变大, 表明煤胶体对 Hg^{2+} 过程在温度越高自发进行的趋势越明显, 也更容易发生。

3 种粒径的煤胶体吸附反应的焓变 $\Delta H > 0$, 说明该吸附反应为吸热反应, 随温度的升高, 向正反应方向进行^[33-34]。这与前面吸附等温线所示结果一致。另外焓变值还可以用来推断吸附反应的机理(表 5), Hg^{2+} 在不同粒级的煤胶体中的焓变 ΔH 存在显著差异, 3 种粒级煤胶体的吸附焓变参数分别为: 0 ~ 2 μm 煤胶体为 86.1 kJ/mol (>40 kJ/mol), 推断主要吸附机理是化学键作用, 以化学吸附为主; 2 ~ 5 μm 煤胶体为 37.0 kJ/mol (<40 kJ/mol), 推断主要吸附机理是氢键和离子和配位基交换作用, 以物理吸附为主; 5 ~ 10 μm 煤胶体为 24.5 kJ/mol (<40 kJ/mol), 推断主要吸附机理是氢键和偶极矩的共同作用, 以物理吸附为主。说明粒级越小, 吸附焓变值越大, 吸附的作用力越强。

表 5 不同作用引起的吸附反应焓变^[32]

Table 5 Adsorption reaction enthalpy change due to the different roles^[32] kJ/mol

范德华力	疏水作用	氢键	电荷转移	离子和配位基交换	偶极矩	化学键
4.2 ~ 8.4	≈5	2 ~ 40	—	≈40	2 ~ 29	63 ~ 84

熵值 $\Delta S > 0$, 熵值增大, 说明煤胶体对 Hg^{2+} 的吸附过程中系统的混乱度是增加的, 有利于反应自发进行。煤胶体对 Hg^{2+} 的吸附机制是离子交换作用, Hg^{2+} 换出 H^+ , H^+ 的活性更大, 所以煤胶体对 Hg^{2+} 的吸附过程熵值才会增大。

3 结 论

(1) 温度和粒径都能显著影响煤胶体对汞的吸附作用, 随温度的升高, 煤胶体粒径的减小, 煤胶体对汞的吸附量均增大。

(2) 煤胶体对汞的吸附实验数据用 Langmuir 吸附等温式和线性分配等温式的复合模型拟合的效果较好 ($R^2 > 0.973$, $\text{SSE} < 2.505$), 这说明汞在煤胶体上的吸附并不是单一的表面吸附或分配作用, 而是这两种吸附作用的叠加。

(3) 0 ~ 2, 2 ~ 5 μm 的煤胶体对汞的吸附以表面吸附为主, 而汞在 5 ~ 10 μm 的煤胶体上的吸附则主要是分配作用。另外, 温度越高、煤胶体的粒径越小,

分配作用在煤胶体对汞的吸附中的贡献越小, 表面吸附的贡献越大。

(4) 吸附反应的 ΔG^0 在 -16.3 ~ -23.9 kJ/mol, ΔH 在 24.5 ~ 86.1 kJ/mol, ΔS 为正值, 说明煤胶体对汞的吸附可自发进行, 为吸热反应, 吸附过程中系统的混乱度增加。汞在 0 ~ 2 μm 煤胶体上以化学吸附为主, 而在 2 ~ 5 和 5 ~ 10 μm 的煤胶体上则主要为物理吸附。

参考文献 (References):

- [1] Li Z, Wu L, Liu H, et al. Improvement of aqueous mercury adsorption on activated coke by thiol-functionalization[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, 228: 925-934.
- [2] Buchanan S, Anglen J, Turyk M. Methylmercury exposure in populations at risk: Analysis of NHANES 2011-2012[J]. Environmental Research, 2015, 140: 56-64.
- [3] Pavlish J H, Holmes M J, Benson S A, et al. Application of sorbents for mercury control for utilities burning lignite coal[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85: 563-576.
- [4] Varian-Ramos C W, Swaddle J P, Cristol D A. Mercury reduces avian reproductive success and imposes selection: An experimental study with adult-or lifetime-exposure in zebra finch[J]. PLOS One, 2014, 9: 0095674.
- [5] Jackson A K, Evers D C, Adams E M, et al. Songbirds as sentinels of mercury in terrestrial habitats of eastern North America[J]. Ecotoxicology, 2015, 24: 453-467.
- [6] Wang J, Deng B L, Chen H, et al. Removal of aqueous Hg(II) by polyaniline: Sorption characteristics and mechanisms[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(14): 5223-5228.
- [7] Zhang F S, Nriagu J O, Itoh H. Mercury removal from water using activated carbons derived from organic sewage sludge[J]. Water Research, 2005, 39(2): 389-395.
- [8] Kim B J, Bae K M, An K H, et al. Elemental mercury adsorption behaviors of chemically modified activated carbons[J]. Bulletin of the Korean Chemical Society, 2011, 32(4): 1321-1326.
- [9] Yardim M F, Budinova T, Ekinci E, et al. Removal of mercury (II) from aqueous solution by activated carbon obtained from furfural[J]. Chemosphere, 2003, 52(5): 835-841.
- [10] 孙阳昭, 陈扬, 蓝虹, 等. 中国汞污染的来源、成因及控制技术路径分析[J]. 环境化学, 2013, 32(6): 937-942.
Sun Yangzhao, Chen Yang, Lan Hong, et al. Study on pollution sources, cause of mercury pollution and its control technical roadmap in China[J]. Environmental Chemistry, 2013, 32(6): 937-942.
- [11] Werner S. Chemical interaction in particle separation[J]. Environmental Science & Technology, 1977, 11(2): 1066-1070.
- [12] 张凯, 龚本根, 田冲, 等. 燃煤细颗粒物排放实验及形成机理[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2696-2701.
Zhang Kai, Gong Bengeng, Tian Chong, et al. Formation mechanisms of fine particles generated from coal combustion[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2696-2701.

- [13] 姜秀民,李巨斌,邱健荣.超细化煤粉燃烧特性的研究[J].中国电机工程学报,2000,20(16):71-74.
Jiang Xiumin, Li Jubin, Qiu Jianrong. Study on combustion characteristic of micro-pulverized coal [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(16):71-74.
- [14] James S C, Chrysikopoulos C V. Transport of polydisperse colloid suspensions in a single fracture [J]. Water Resources Research, 1999, 35(3):707-718.
- [15] Nunez G A, Briceno M I, Joseph D D, et al. Colloidal coal in water suspensions [J]. Energy & Environmental Science, 2010, 3:629-640.
- [16] Bradford S A, Bettahar M. Straining attachment and detachment of cryptosporidium oocysts in saturated porous media [J]. Environ. Qual., 2005, 34(2):469-478.
- [17] Keller A A, Sirivithayapakorn S, Chrysikopoulos C V. Early break-through of colloids and bacteriophage MS₂ in a water-saturated sand column [J]. Scholarship Repository, 2004, 40:1-11.
- [18] Yosuke F, Motoyoshi K. Transport of colloidal silica in unsaturated sand; Effect of charging properties of sand and silica particles [J]. Chemosphere, 2016, 154:179-186.
- [19] 许端平,李建,陈晓.煤基胶体特征及其在多孔介质中的运移行为[J].安全与环境学报,2015,15(2):232-235.
Xu Duanping, Li Jian, Chen Xiao. Features of the colloids isolated from the coal and their migration behavior in the porous media [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(2):232-235.
- [20] 刘庆玲,徐绍辉.地下环境中胶体促使下的污染物运移研究进展[J].土壤,2005,37(2):129-135.
Liu Qingling, Xu Shaohui. Colloid-facilitated transport of contaminants in subsurface environment [J]. Soils, 2005, 37(2):129-135.
- [21] 殷宪强.胶体对铅运移的影响及铅的生物效应[D].咸阳:西北农林科技大学,2010.
Yin Xianqiang. Effect of colloid on Pb transport and biological effect of Pb [J]. Xianyang: Northwest A & F University, 2010.
- [22] 许端平,李慧建,王鹏,等.煤基胶体对草甘膦的吸附特征研究[J].地球与环境,2015,43(3):316-321.
Xu Duanping, Li Huijian, Wang Peng, et al. Sorption characteristics of glyphosate on colloids extracted from coal dust [J]. Earth and Environment, 2015, 43(3):316-321.
- [23] Barton C D, Karathanasis A D. Influence of soil colloids on the migration of atrazine and zinc through large soil monoliths [J]. Water, Air & Soil Pollution, 2003, 143(1):3-21.
- [24] Citeau L, Lamy I, Oort F, et al. Colloidal facilitated transfer of metals in soils under different land use [J]. Colloids and Surfaces A, 2003, 217(1-3):11-19.
- [25] Lin Qi, Xu Xin, Bao Qibei, et al. Influence of water-dispersible colloids from organic manure on the mechanism of metal transport in historically contaminated soils: coupling colloid fractionation with high-energy synchrotron analysis [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(2):349-359.
- [26] 唐颖,李航,朱华玲,等.SDBS/Na⁺对红壤胶体悬液稳定性的影响[J].环境科学,2014,35(4):1540-1547.
Tang Ying, Li Hang, Zhu Hualing, et al. Impact of SDBS/Na⁺ on red soil colloidal stability [J]. Environmental Science, 2014, 35(4):1540-1547.
- [27] 许端平,李晓波,薛杨,等.不同环境条件下的煤基胶体稳定性[J].煤炭学报,2015,40(8):1936-1941.
Xu Duanping, Li Xiaobo, Xue Yang, et al. Stability of coal colloid under different environmental parameters [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(8):1936-1941.
- [28] Langmuir I. Adsorption of gases on plain surface glass mica platinum [J]. Journal of the American Chemical Society, 1918, 40(9):1361-1403.
- [29] 夏星辉,余晖,陈立.黄河水体颗粒物对几种多环芳烃生物降解过程的影响[J].环境科学学报,2005,25(9):1226-1231.
Xia Xinghui, Yu Hui, Chen Li. Effect of particles on the biodegradation of PAHs in natural waters—A Yellow River [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(9):1226-1231.
- [30] 傅献彩,沈文霞,姚天杨,等.物理化学(第五版)[M].北京:高等教育出版社,2006.
Fu Xiancai, Shen Wenxia, Yao Tianyang, et al. Physical chemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [31] Chasar L C, Scudder B C, Stewart A R, et al. Mercury cycling in stream ecosystems. 3. Trophic dynamics and methylmercury bioaccumulation [J]. Environ. Sci. Technol., 2009, 43:27-33.
- [32] Von Open B, Kondel W, Klein W. Sorption of nonpolar compounds to soils Processes, measurement and experience with the applicability of the modified OECD-guideline [J]. Chemosphere, 1991, 22:285-304.
- [33] Agrawal A, Sahu K K. Kinetic and isotherm studies of cadmium adsorption on manganese nodule residue [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 137(2):915-924.
- [34] Demiral H, Demiral I, Tumsek F, et al. Adsorption of chromium(VI) from aqueous solution by activated carbon derived from olive bagasse and applicability of different adsorption models [J]. Chem. Eng. J., 2008, 144(2):188-196.