

Adsorption Behavior of Nitrobenzene Contaminants on Suspended Particles in Lanzhou Section of the Yellow River

Yufeng Jiang, Alounpadeth Phouangphet, Hong Wen, Qian Zhang, Lanlan Liu, Longmiao Yuan, Jihui Bai

College of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu
Email: jiangyf7712@126.com

Received: Dec. 1st, 2018; accepted: Dec. 21st, 2018; published: Dec. 28th, 2018

Abstract

In order to fully understand the adsorption effect of nitrobenzene pollutants on suspended particles, the adsorption behavior and influencing factors of nitrobenzene on suspended particles in the Lanzhou section of the Yellow River were studied. The study found that suspended particles in water have a great influence on the adsorption capacity of nitrobenzene pollutants. Therefore, this paper selects the suspended particles from the Lanzhou section of the Yellow River as the research object, and uses the batch experiment method to explore the migration and adsorption characteristics of nitrobenzene pollutants in suspended particles. The results show that the adsorption of nitrobenzene pollutants on suspended particles in the Lanzhou section of the Yellow River is divided into three stages, namely, fast, slow and equilibrium adsorption periods, and the adsorption equilibrium time is 18 h. The kinetic adsorption process of suspended particulates to nitrobenzene pollutants in the Lanzhou section of the Yellow River is in good agreement with the quasi-secondary adsorption kinetics model; the thermodynamic adsorption is in good agreement with the Freundlich isotherm adsorption model; during the adsorption process, the free energy change of the adsorption of nitrobenzene $\Delta G^0 < 0$, the enthalpy change ΔH^0 and the entropy change ΔS^0 are all > 0 , which indicates that the adsorption of nitrobenzene pollutants by the suspended particles in the Lanzhou section of the Yellow River is a spontaneous endothermic process and the chaotic degree of the adsorption system increases. The initial concentration of nitrobenzene pollutants, the pH of the solution and the particle size of the suspended particles have a great influence on the adsorption. The specific performance is as follows: the adsorption capacity is proportional to the initial concentration of nitrobenzene pollutants, and inversely proportional to the particle size of suspended particles. When the pH is in the range of 3~5 and 8~10, the adsorption capacity is proportional to the pH value. When the pH is in the range of 5~8, the adsorption capacity remains basically unchanged. Generally speaking, the adsorption of nitrobenzene by suspended particles in water is a spontaneous endothermic process affected by initial concentration of nitrobenzene, solution pH and particle size of suspended particles.

Keywords

Suspended Particulate Matter, Nitrobenzenes, Kinetic Adsorption, Thermodynamic Adsorption, Lanzhou Section of the Yellow River

黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯污染物的吸附行为研究

蒋煜峰, Alounpadeth Phouangphet, 温红, 张前, 刘兰兰, 原陇苗, 白继辉

兰州交通大学, 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州

Email: jiangyf7712@126.com

收稿日期: 2018年12月1日; 录用日期: 2018年12月21日; 发布日期: 2018年12月28日

摘要

为全面了解悬浮颗粒对硝基苯类污染物的吸附影响, 研究了黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯的吸附行为及影响因素。研究发现, 水体中悬浮颗粒对硝基苯类污染物的吸附能力存在很大的影响。因此, 本文选取黄河兰州段悬浮颗粒作为研究对象, 采用批量实验法探索硝基苯类污染物在悬浮颗粒中的迁移规律和吸附特征。结果表明: 硝基苯类污染物在黄河兰州段悬浮颗粒上的吸附分为三个阶段, 即快速、慢速和平衡吸附期, 吸附平衡时间为18 h。黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯类污染物的动力学吸附过程较好地符合准二级吸附动力学模型; 热力学吸附较好地符合Freundlich等温吸附模型; 在吸附过程中, 硝基苯的吸附自由能变 $\Delta G^0 < 0$, 焓变 ΔH^0 及熵变 ΔS^0 均 > 0 , 表明黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯类污染物的吸附是一个自发吸热且吸附体系的混乱度增大的反应过程。硝基苯类污染物的初始浓度、溶液pH和悬浮颗粒粒径均对吸附有较大影响, 具体表现为: 吸附容量与硝基苯类污染物初始浓度呈正比, 与悬浮颗粒粒径呈反比, pH在3~5和8~10范围内时, 吸附容量与pH值呈正比, pH在5~8范围内时, 吸附容量基本保持不变。总体来看, 水体中的悬浮颗粒对硝基苯的吸附是受硝基苯初始浓度、溶液pH和悬浮颗粒粒径影响的自发吸热过程。

关键词

悬浮颗粒物, 硝基苯类, 动力学吸附, 热力学吸附, 黄河兰州段

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 用于国防、化工、印染等行业的硝基苯排放量超过 10,000 t/y, 并且呈逐年增长趋势[1]。硝基苯不溶于水且具有极高的稳定性, 进入环境中的硝基苯类污染物除少数会被微生物降解外, 大多数会残留在水体和土壤中, 造成严重的环境污染和危害[2] [3]。但同时, 又因为其在水中有一定的溶解度, 所以还可能对水体造成较长时间的污染[4]。环境中的硝基苯可以通过皮肤、呼吸道等途径进入人类和动物体内, 也可以通过植物的呼吸作用进入植物体内, 在植物体内富集, 经过生物链进入人类和动物体内, 而后对肾、肝、脾等脏器功能产生严重损伤[5]。由于硝基苯类污染物的强致癌性、高毒性和致突变性等, 我国已将其列入优先监测污染物名单[6]。

黄河兰州段贯穿兰州市, 为广大兰州市民提供生活和工业用水。兰州现存的化工、国防和印染等企

业排放的含有硝基苯类污染物的废水进入黄河兰州段水域,致使硝基苯类污染物在黄河兰州段水体和土壤中大量残留。硝基苯的密度大于水,进入水体的硝基苯会沉入水底,所以从水面挥发的比例较小,大多数被悬浮颗粒物所吸附并随着悬浮颗粒物迁移[7]。研究表明,水体中悬浮颗粒对硝基苯类污染物的吸附能力较强。针对硝基苯类污染物,最常用的处理方法是吸附法[8]。因此,掌握硝基苯进入悬浮颗粒后的迁移规律,就可以通过强化或控制其迁移过程,有效将其对环境的影响降到最低。

本文以黄河兰州段悬浮颗粒为研究对象,采用紫外分光光度法,研究了硝基苯类污染物在悬浮颗粒中的迁移规律和吸附特征,以期环境中硝基苯类污染物的预防和去除提供一个可信赖的依据。

2. 材料与方法

2.1. 材料与仪器

硝基苯(分析纯,上海中秦化学试剂有限公司);无水甲醇(分析纯,纯度 99.5%,广州市金华大化学试剂有限公司);硫酸(分析纯,纯度 98%,天津市标准科技有限公司);氢氧化钠(分析纯,纯度 96.6%,广州市金华大化学试剂有限公司);氯化钙二水(分析纯,纯度(以无水盐计) 74%,天津市凯信化学工业有限公司);实验用水为一次蒸馏水。

硝基苯储备液:在 500 ml 棕色容量瓶中加入 200 ml 的无水甲醇(助溶),然后加 0.21 ml 硝基苯,蒸馏水定容,配制成质量浓度为 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硝基苯储备液(临用前现配),再按吸附试验的要求稀释备用。

UV-2102C 型紫外可见分光光度计(尤尼柯上海仪器有限公司);多功能恒温水浴振荡器(江苏正基仪器有限公司);TDL-40B 台式离心机(上海安亭科学仪器厂);PHS-3C 型精密 pH 计(上海仪电科学仪器股份有限公司,雷磁仪器厂)。

2.2. 试供样品

悬浮颗粒是取自兰州市安宁区湿地公园的黄河水体,经过风干等过程后,分别筛选出粒径为 $150 \mu\text{m}$ 、 $106 \mu\text{m}$ 和 $48 \mu\text{m}$ 的备用,悬浮颗粒的 pH 为 7.94,有机物的含量为 3.30%。

2.3. 试验方法

2.3.1. 吸附动力学试验方法

分别称取 0.500 g 过 300 目筛的悬浮颗粒式样于 10 支 50 mL 离心管中,然后给每个离心管中加入 50 mL 浓度为 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硝基苯溶液,避光处理(铝箔包裹离心管), 25°C 恒温振荡($160 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 0.5, 1, 2, 4, 6, 9, 12, 15, 18, 22 h,取出后以 $4000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min,取上清液测定硝基苯浓度。

2.3.2. 吸附热力学

分别称取 0.500 g 过 300 目筛的悬浮颗粒式样于 3 组(每组 10 支) 50 mL 离心管中,每组依次加入 50 mL 浓度为 0、5、10、20、30、40、50、60、80、100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硝基苯溶液,三组分别在 25°C 、 35°C 和 45°C 下恒温振荡($160 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$) 20 h。静置 2 h 后,以 $4000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min,取上清液测定硝基苯浓度。

2.3.3. 不同影响因素对硝基苯吸附的影响

初始浓度:分别称取 0.500 g 过 300 目筛的悬浮颗粒式样于 10 支 50 mL 离心管中,取一支加蒸馏水做空白,其它分别加入 50 mL 浓度 5、10、20、30、40、50、60、80、100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硝基苯溶液,其余步骤同 2.3.2,温度为 25°C 。

溶液 pH:分别称取 0.500 g 过 300 目筛的悬浮颗粒式样于 8 支 50 mL 离心管中,依次加入 50 mL 浓度为 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硝基苯溶液,调节溶液的 pH 至 2~10(取 8 个点)之间,避光处理(铝箔包裹离心管)。其余步骤同 2.3.2,温度为 25°C 。

悬浮颗粒粒径：分别称取 0.500 g 过 100、150 和 300 目筛的悬浮颗粒式样于三组(每组 10 支) 50 mL 离心管中，每组取一支加蒸馏水做空白，其它分别加入 50 mL 浓度 5、10、20、30、40、50、60、80、100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硝基苯溶液，其余步骤同 2.3.2，温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 。

以上实验，均重复三次取均值。

3. 结果与讨论

3.1. 吸附动力学

由图 1 可知，悬浮颗粒对硝基苯的吸附分为三个阶段。0~5 h 内，曲线斜率最大，悬浮颗粒对硝基苯的吸附速率较大，为快速吸附阶段。该阶段分子之间的相互作用力主要有范德华力、偶极力和氢键力等，这些作用力通常可以使硝基苯快速吸附于悬浮颗粒表面的疏水位[9]。5~18 h 内，悬浮颗粒对硝基苯的吸附速率逐渐降低，为慢速反应阶段。该阶段主要是通过扩散作用进行，溶液中的硝基苯会由液相慢慢进入到悬浮颗粒的微孔隙中，硝基苯为了达到吸附位的饱和点，必须穿过膜扩散到悬浮颗粒固相界面相对静止的水分子层，之后通过孔隙扩散进入到悬浮颗粒微孔隙中，需要在较长的时间内完成。18 h 后，悬浮颗粒对硝基苯的吸附基本达到平衡，即黄河兰州段悬浮颗粒吸附硝基苯的平衡吸附时间为 18 h。

将硝基苯在悬浮颗粒中吸附动力学实验分别采取准一级、准二级动力学模型和颗粒内部扩散模型进行线性拟合，结果如表 1 所示。准二级动力学方程的 R_2^2 值 0.9978 远大于准一级动力学方程的 R_1^2 值 0.6152。因此，硝基苯在黄河兰州段悬浮颗粒上的吸附更符合准二级动力学模型，其吸附是包括外部液膜扩散、表面吸附和颗粒内部扩散的复合吸附，主要吸附过程受化学吸附机理的控制[10][11][12]。

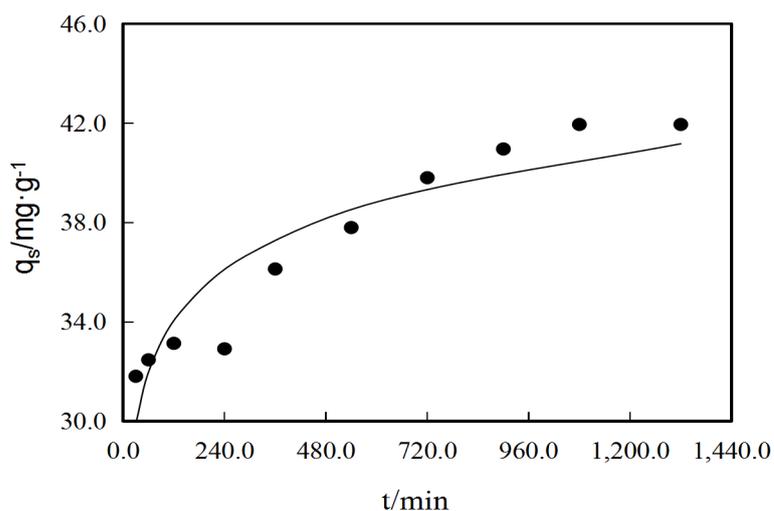


Figure 1. Adsorption kinetics of nitrobenzene on suspended particles in the Lanzhou section of the Yellow River

图 1. 黄河兰州段悬浮颗粒吸附硝基苯的动力学曲线

Table 1. Fitting eigenvalues of adsorption kinetics of nitrobenzene on suspended particles in the Lanzhou section of the Yellow River

表 1. 黄河兰州段悬浮颗粒吸附动力学拟合特征值

浓度(mg/L)	Pseudo-first-order 模型			Pseudo-second-order 模型			Intraparticle 模型		
	k_1	q_1	R_1^2	k_2	q_2	R_2^2	k_p	C	R_p^2
80	17.19	3.977	0.6152	0.0042	4.341	0.9978	0.0373	2.912	0.9588

3.2. 吸附热力学

由图 2 可得, 黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯吸附曲线较为符合 S-型吸附等温线, 表明该吸附是自由的单一多层可逆吸附过程[13]。同时, S-型吸附等温线表示吸附质之间有较强的作用力, 且吸附质之间的相互作用力大于吸附质与吸附剂之间的相互作用力[14]。即随着吸附量的增加, 吸附质之间的协同吸附作用促使吸附量进一步增加。因此, 等温线前半段吸附量缓慢增加, 吸附由单分子层向多分子层过渡, 后半段由于吸附质的协同吸附作用, 吸附量迅速增加。因此, 黄河兰州段悬浮颗粒吸附硝基苯的吸附过程有如下特点: 首先, 吸附剂和吸附质之间存在强度适中的分子间作用力; 其次, 吸附质之间作用力强, 协同吸附作用较大; 最后, 吸附过程中存在竞争吸附。

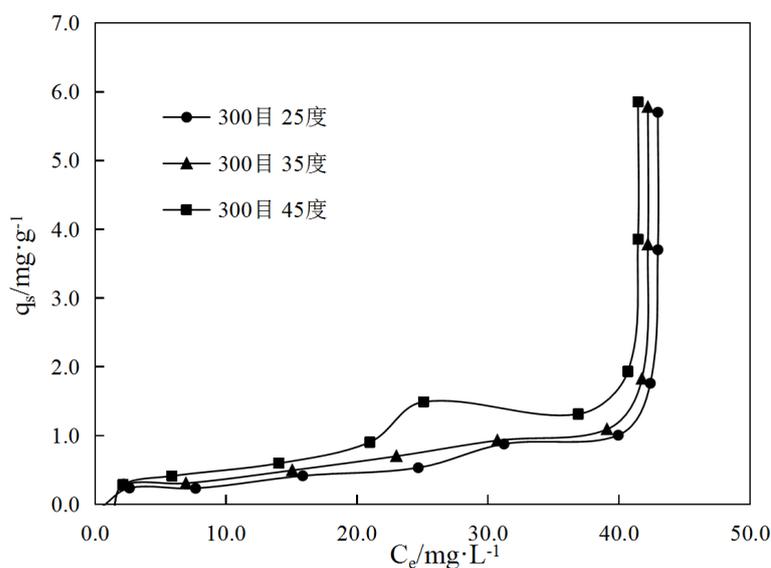


Figure 2. Isothermal adsorption curve of nitrobenzene adsorbed by suspended particles in the Lanzhou section of the Yellow River

图 2. 黄河兰州段悬浮颗粒吸附硝基苯等温吸附曲线

由图 3 可以看出, 黄河段悬浮颗粒对硝基苯的吸附量随温度的升高而增加, 平衡浓度随着温度的增加而减小。低浓度时, 吸附量随硝基苯平衡浓度的增加而缓慢增大; 高浓度时, 悬浮颗粒对硝基苯的吸附量迅速增加, 但硝基苯的平衡浓度基本不变, 这与李皎洁[15]等研究硝基苯在土壤吸附特征中的结论不一致。这可能是因为黄河兰州段悬浮颗粒与草甸黑土的性质和有机质含量不同导致的。研究证明土壤有机质对疏水性有机物的吸附起主导作用, 有机质含量在很大程度上影响疏水性有机物在土壤上的吸附行为[16] [17]。因为在水体中, 土壤极性组分会被极性较强的水分子占据, 而非极性的疏水性化合物则被吸附在非极性组分表面或溶解在土壤有机相中[18]。同时, 硝基苯的疏水作用力、分子间作用力和静电力会吸引悬浮颗粒中有机质表面活性阳离子聚集在其周围形成表面小胶团, 硝基苯浓度越大, 表面小胶团越多。当浓度足够大时, 硝基苯完全被表面小胶团覆盖, 其浓度不再增加而吸附量迅速增加[19]。

将不同温度下黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯的吸附热力学实验数据分别用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型进行线性拟合, 各拟合参数值见表 2。 R_L^2 均小于 R_F^2 , 即 25°C、35°C 和 45°C 时黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯的吸附过程均更好的符合 Freundlich 等温吸附模型, 说明黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯的吸附是吸附材料表面不均匀的多层吸附[20]; 非线性指数 n 均 > 0 , 说明该吸附较为容易进行。

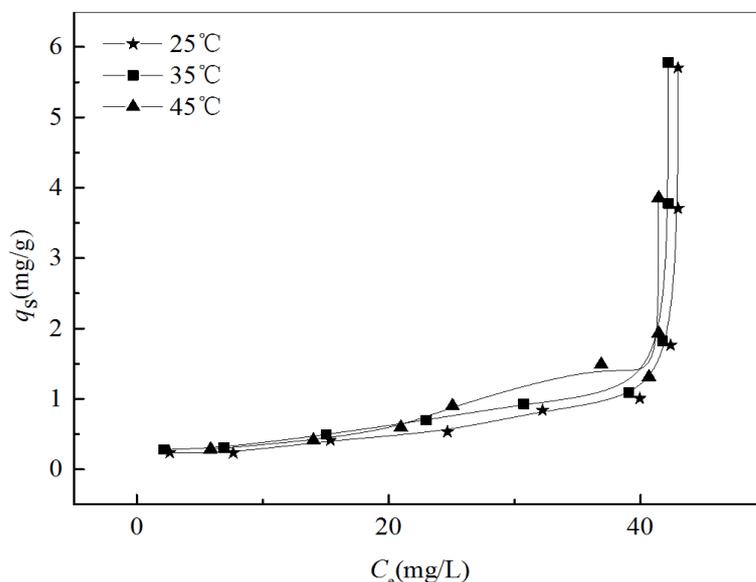


Figure 3. Adsorption thermodynamic curve of nitrobenzene adsorption by suspended particles in the Lanzhou section of the Yellow River

图 3. 黄河兰州段悬浮颗粒吸附硝基苯的吸附热力学曲线

Table 2. Thermodynamic fitting eigenvalues of nitrobenzene adsorbed by suspended particles in the Lanzhou section of the Yellow River

表 2. 黄河兰州段悬浮颗粒吸附硝基苯热力学拟合特征值

吸附剂 T/°C	Langmuir 模型			Freundlich 模型			
	Q_m	K_L	R_L^2	n	K_F	R_F^2	
300	25	1.853	0.05407	0.8203	1.793	0.1053	0.8307
	35	1.846	0.07944	0.8145	2.029	0.1543	0.8864
	45	2.328	0.06373	0.8877	1.702	0.1619	0.9066

3.3. 吸附热力学参数

做 $\ln K \sim 1/T$ 图, 得吉布斯自由能 ΔG^0 、焓变 ΔH^0 及熵变 ΔS^0 如表 3 所示。25°C, 35°C 和 45°C 的条件下, 黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯的吸附过程中的吉布斯自由能 $\Delta G^0 < 0 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, 说明该吸附是自发进行的; 焓变 $\Delta H^0 (17.08 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}) < 40 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 说明黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯的吸附主要是物理吸附 [21]; 同时, $\Delta H^0 > 0$, 说明吸附为吸热反应; 最后, 熵变 $\Delta S^0 > 0$, 说明黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯的吸附是吸热过程中体系混乱度增大的吸热反应 [22]。

Table 3. Thermodynamic parameters of isothermal adsorption of nitrobenzene on suspended particles in the Lanzhou section of the Yellow River

表 3. 硝基苯在黄河兰州段悬浮颗粒上的等温吸附热力学参数值

吸附剂	T	ΔG^0	ΔH^0	ΔS^0
	(°C)	(kJ/mol)	(kJ/mol)	(J/K·mol)
悬浮颗粒	25	-5.577		
	35	-4.786	17.08	39.04
	45	-4.814		

3.4. 吸附影响因素

3.4.1. 初始浓度对黄河兰州段悬浮颗粒吸附硝基苯的影响

由图 4 可知, 黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯的吸附量与溶液中硝基苯的初始浓度呈正比, 即初始浓度越高, 吸附量越大。硝基苯初始浓度在 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 至 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 吸附速率较低, 初始浓度增至 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以后, 吸附速率逐渐增大, 初始浓度增至 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之后, 吸附速率显著增大。这是因为悬浮颗粒在吸附硝基苯时, 由于硝基苯的疏水作用力、分子间作用力及静电力会吸引悬浮颗粒中有机质表面活性阳离子并聚集在其周围形成表面小胶团, 当溶液的浓度大于临界浓度时, 小胶团完全覆盖硝基苯的表面, 溶液的浓度不再增加, 但吸附速率越来越大[19]。

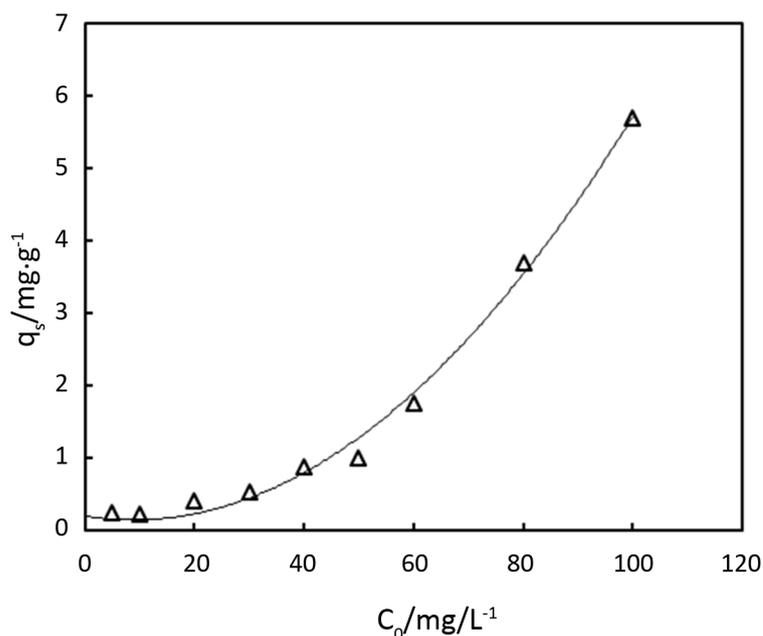


Figure 4. Effect of initial concentration on adsorption of nitrobenzene by suspended particles in Lanzhou section of the Yellow River

图 4. 初始浓度对黄河兰州段悬浮颗粒吸附硝基苯的影响

3.4.2. 黄河兰州段悬浮颗粒不同粒径对硝基苯的吸附影响

由图 5 可知, 相同条件下, 黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯的吸附量与悬浮颗粒的粒径呈反比。这是由于粒径越小, 比表面积越大, 硝基苯通过孔隙进入悬浮颗粒微孔更容易, 从而通过机制扩散与悬浮颗粒的吸附位点结合的概率越大, 悬浮颗粒对硝基苯的吸附量越多, 吸附能力越强[23]。

3.4.3. pH 对黄河兰州段悬浮颗粒吸附硝基苯的影响

由图 6 可得, 当 pH 在 3~5 和 8~10 时, 黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯的吸附量与 pH 值呈正比, 当 pH 在 5~8 时, 其吸附量略有波动, 但基本保持不变。溶液的 pH 会影响悬浮颗粒胶体表面的电荷分布和硝基苯的络合能力, 从而影响悬浮颗粒对硝基苯的吸附量。酸性条件下, 溶液中大量存在的 H^+ 与悬浮颗粒胶体粒子结合, 占据了硝基苯的吸附点位, 所以吸附受到抑制, 导致吸附量与溶液 pH 呈正比。碱性条件下, 悬浮颗粒表面负电荷数增加, 同时硝基苯的络合能力提高, 对吸附产生促进作用, 所以吸附量随 pH 增加而增加[24] [25]。弱酸或中性条件下, 溶液中的 H^+ 较少, 对悬浮颗粒胶体表面的电荷分布影响也就小, 所以吸附基本不受影响, 吸附量保持不变。

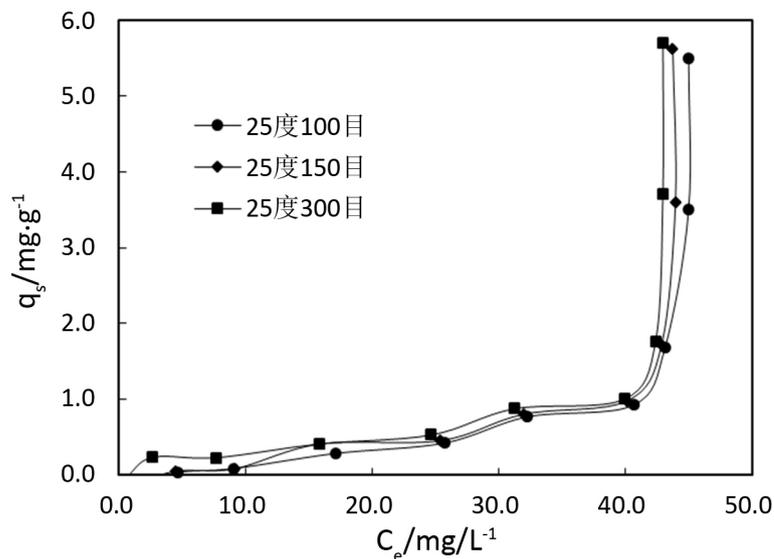


Figure 5. Effect of the adsorption of nitrobenzene on suspended particles with different particle sizes in the Lanzhou section of the Yellow River

图 5. 不同粒径黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯吸附的影响

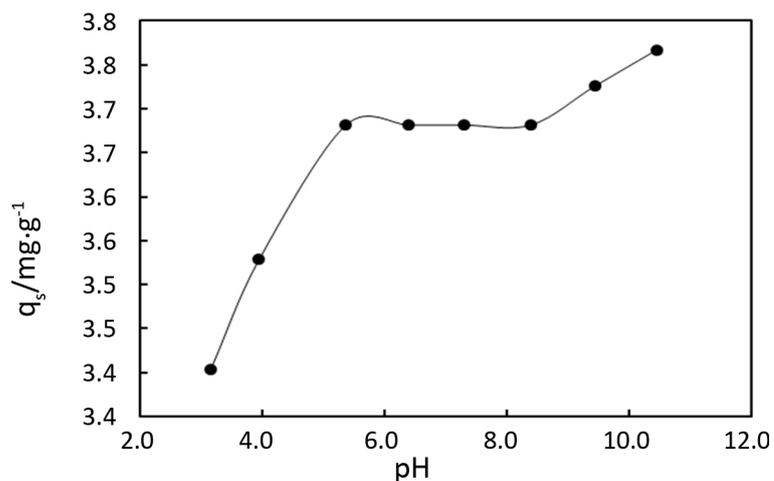


Figure 6. Effect of pH on the adsorption of nitrobenzene by suspended particles in the Lanzhou section of the Yellow River

图 6. pH 对黄河兰州段悬浮颗粒吸附硝基苯的影响

4. 结论

1、黄河兰州段悬浮颗粒对硝基苯的吸附分为快速吸附、慢速吸附和平衡吸附三个阶段，吸附平衡时间为 18 h。0~5 h 为快速吸附阶段，5~18 h 为慢速吸附阶段，拟合过程符合准二级动力学模型，吸附过程包含表面吸附，颗粒内部扩散和外部液膜扩散等。

2、25、35 和 45℃ 时硝基苯在黄河兰州段悬浮颗粒上的吸附曲线较符合 S-型吸附等温模型，吉布斯自由能 $\Delta G^0 < 0$ ，焓变 $\Delta H^0 > 0$ ，熵变 $\Delta S^0 > 0$ 说明该吸附是自发进行的混乱的吸热反应，主要以物理吸附为主。

3、硝基苯初始浓度与硝基苯在黄河兰州段悬浮颗粒上的吸附量和吸附速率均呈正比；粒径与吸附量呈反比；酸性环境抑制吸附，碱性环境促进吸附。

参考文献

- [1] 陈宜菲, 张二华, 陈少瑾, 等. Fe^0 对土壤中硝基苯的还原作用[J]. 环境保护科学, 2005, 31(6): 56-58.
- [2] 高翔云. 白腐菌治理硝基苯类化合物废水的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [3] Hartter, D.R. (1985) The Use and Importance of Nitroaromatic Chemicals in the Chemical Industry. In: Rickert, D.E., Ed., *Toxicity of Nitroaromatic Compounds, Chemical Industry Institute of Toxicology Series*, Hemisphere, Washington DC, 1-14.
- [4] 张涛. 硝基苯在渭河沉积物中吸附特征及双模式阻滞因子的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [5] WHO (2003) Environmental Health Criteria 230. WHO, Geneva.
- [6] 荆肇乾, 彭英艳, 胡静. 杨树叶改性吸附剂对硝基苯的吸附性能研究[J]. 科学技术与程, 2015, 15(24): 140-143.
- [7] 韩龙喜, 颜芬芬. 水体中不可溶沉降型污染物迁移规律研究进展[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 11-15 + 32.
- [8] 郑金来, 李君文, 晁福寰. 苯胺、硝基苯和三硝基甲苯生物降解研究进展[J]. 微生物学通报, 2001, 28(5): 85-88.
- [9] 张营, 刘思惠, 景逵, 等. 硝基苯在不同类型土壤中的吸附特性研究[J]. 广东农业科学, 2013, 40(4): 137-139.
- [10] 蒋煜峰. 环境化学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
- [11] 张继义, 李金涛, 鲁华涛, 等. 小麦秸秆生物碳质吸附剂从水中吸附硝基苯的机理[J]. 环境科学研究, 2012, 25(3): 333-339.
- [12] Chang, M.Y. and Juang, R.S. (2004) Adsorption of Tannic Acid, Humic Acid, and Dyes from Water Using the Composite of Chitosan and Activated Clay. *Journal of Colloid and Interface Science*, **278**, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.05.029>
- [13] 潘焯, 朱杭瑞, 庄淑伟, 等. 竹材不同部位及炭化温度对竹炭吸附性能及远红外发射率影响的研究[J]. 竹子研究汇刊, 2016, 35(1): 17-21.
- [14] 吴焕领, 魏赛男, 崔淑玲, 等. 吸附等温线的介绍及应用[J]. 染整技术, 2006, 128(10): 12-28.
- [15] 李皎洁, 赵晓松. 硝基苯在土壤中的吸附特征及影响因素[J]. 吉林农业大学学报, 2010, 32(2): 181-185.
- [16] 孙亚平, 石辉. 土壤和沉积物对多环芳烃吸附作用的研究进展[J]. 四川环境, 2007, 26(5): 102-106.
- [17] Grathwohl, P. (1990) Influence of Organic Matter from Soils and Sediments from Various Origins on the Sorption of Some Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons, Implications on KOC Correlations. *Environmental Science Technology*, **24**, 1687-1692.
- [18] 王磊, 丁浩然, 陈樯, 等. 四氯乙烯和萘在氧化前后的含水层土壤上的吸附与加标解吸研究[J]. 土壤, 2015, 47(4): 725-732.
- [19] 杨成建, 曾清如, 张静, 等. 非离子表面活性剂在土壤/沉积物中的吸附模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1396-1401.
- [20] 周岩梅, 张琼, 刁晓华, 等. 硝基苯和西维因在活性炭上的吸附效果及动力学研究[J]. 中国环境科学, 2010, 30(9): 1177-1182.
- [21] 谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 等. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. 土壤, 2011, 43(6): 857-861.
- [22] 顾惕人. 表面活性剂吸附理论和 BET 公式——表面胶团的逐级平衡模型[J]. 化学通报, 1995, 3: 30-33.
- [23] 李扬, 李梦耀, 袁胜, 等. 五氯酚钠在黄土性土壤中的吸附与解吸[J]. 应用化工, 2014, 43(5): 880-882.
- [24] 周文富. 卤代苯和苯酚衍生物的位电荷密度能和 $\log K_{ow}$ 与 $-\lg LC_{50}$ 的 QSAR 研究[J]. 有机化学, 2002, 22(9): 658-662.
- [25] 陈爱辉, 梁慧星, 丁成. 硝基苯在米草湿地土壤中的吸附特征[J]. 土壤通报, 2013, 44(5): 1123-1128.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5485，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aep@hanspub.org