

悬浮泥沙对酚类化合物的吸附特性研究

张海平, 朱宜平, 陈玲, 赵建夫

(同济大学环境科学与工程学院污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:研究了 4 种分别取自长江口和杭州湾的悬浮泥沙样品对苯酚、邻氯酚和 2, 4-二氯酚的吸附特性. 结果表明, 在 12 h 内可以达到对酚类化合物的吸附平衡, 对苯酚的吸附量小, 且不同样品间无显著差别, 样品对酚类化合物吸附量随着酚类化合物氯化程度的提高而增大, 与样品粒径分布、比表面积、有机物含量有关. 在酚类化合物初始浓度 < 2.0 mg/L 时, 样品对酚类化合物的等温吸附可以用 Freundlich 吸附等温式来表征, 计算得到吸附常数 K_{oc} 分别为 622 ~ 1 410、3 287 ~ 3 707、6 444 ~ 8 787. 挥发酚国家二级排放标准限定浓度为 0.5 mg/L 以下, 此浓度下水体中悬浮泥沙能够有效吸附挥发酚, 但高盐度不利于酚类化合物的吸附.

关键词: 悬浮泥沙; 吸附; 苯酚; 邻氯酚; 2, 4-二氯酚

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)01-0071-06

Sorption of Phenolic Compounds by Suspended Particulates

ZHANG Hai-ping, ZHU Yi-ping, CHEN Ling, ZHAO Jian-fu

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Sorption properties of phenol, *o*-chlorophenol, 2, 4-dichlorophenol on four kinds of suspended particles sampled from Changjiang Estuary and Hangzhou Bay were investigated. Experiments show that sorption equilibrium can be achieved in 12h for these phenolic compounds. As the content of chlorine in phenolic ring increases, the sorption amount on the samples enhances. For phenol, sorption amount on the samples are much less than the other two phenolic compounds and no distinct differences are obtained between different samples. The sorption ability of suspended particles has close relation with their particle size distribution, specific surface area and organic content. It is shown that when the initial phenolic concentration is smaller than 2.0 mg/L, Freundlich isotherm is suggested as the most appropriated fitting type. Sorption constants K_{oc} calculated from Freundlich isotherm for these three phenolic compounds are 622 ~ 1 410, 3 287 ~ 3 707, 6 444 ~ 8 787 respectively. As limited by the national discharge standard, volatile phenols discharge concentration can't exceed 0.5 mg/L. Suspended particles can absorb them effectively under this concentration range, but high salinity has a negative effect.

Key words: suspended particulates; sorption; phenol; *o*-chlorophenol; 2, 4-dichlorophenol

悬浮泥沙是水体沉积物的主要来源, 但与沉积物相比, 悬浮泥沙在粒径分布、有机物含量等方面都存在差异, 同时悬浮泥沙随水体运动, 不断受到水流的剪切作用, 因此与沉积物相比吸附能力会表现出差异性. 国内外已经开展了大量有关底泥或沉积物对污染物吸附性能及迁移转化的影响研究^[1~4], 但有关悬浮泥沙对污染物的吸附性能研究报道较少. 而酚类化合物作为重要的化工原料和中间产物, 广泛应用在药物、塑料、防腐剂生产等行业中. 由于酚类化合物具有比较强的生物毒性, 很多都是美国 EPA 所列出的优先控制污染物, 因此关于酚类化合物进入水体后的赋存状态、迁移转化和归趋等问题是环境科学领域研究的一个热点. 本研究选取苯酚、邻氯苯酚和 2, 4-二氯苯酚作为代表性酚类化合物, 分析了悬浮泥沙对低浓度酚类化合物的吸附特性.

1 材料与方法

1.1 样品及试剂

实验所用 1 号、2 号悬浮泥沙样品采自长江口, 取样点位置分别为 (121°28'45"E, 31°27'28"N)、(121°26'31"E, 31°28'21"N); 3 号、4 号样品取自杭州湾金山附近水域, 取样点位置分别为 (121°21'10"E, 30°40'28"N)、(121°25'50"E, 30°40'17"N). 采集一定体积含悬浮泥沙的水样运回实验室后抽滤, 并将抽滤得到泥沙样品在搪瓷盘中平铺成薄层状, 放入 40℃ 的烘箱中, 采用强制通风风干. 风干后的样品用研钵捣碎, 然后过 80 目筛储存在棕色玻璃瓶中避光保存备用.

收稿日期: 2006-12-24; 修订日期: 2007-07-04

基金项目: 教育部科技重点研究项目 (104192)

作者简介: 张海平 (1966 ~), 男, 副教授, 主要研究方向为区域水污染控制及数值模拟, E-mail: hpzhang@mail.tongji.edu.cn

实验所用苯酚、邻氯酚、2, 4-二氯酚及其它化学药品试剂均为分析纯.

1.2 实验方法

1.2.1 样品特性分析

悬浮泥沙样品粒径分布情况采用 LS230 型激光粒度仪进行分析, 比表面积采用 Autoscan-60 压汞仪测定; 泥沙中有机质含量采用重铬酸钾法测定; 泥沙中矿物成分采用 D/max 2550 型 X 射线衍射仪进行半定量.

1.2.2 样品吸附实验

(1)吸附平衡时间的确定 称取 2.00 g 悬浮泥沙样品加入到一系列 100 mL 磨口锥形瓶中, 并加入适当体积的蒸馏水, 置于恒温(25℃)振荡器上振荡 2 h, 以使吸附剂与溶液达到平衡, 加入 1.0 mg/L 的邻氯酚溶液, 并加入 100 mg/L 的 NaN_3 0.1 mL, 以抑制微生物对吸附质的降解, 调节 pH 为 7.0 左右, 抑制邻氯酚的解离(邻氯酚 $\text{p}K_{\text{a}} = 8.52$), 最终使溶液总体积保持 50 mL, 加塞, 在 25℃ 避光条件下以转速为 450 r/min 振荡旋转, 使所有泥沙颗粒保持悬浮状态. 在反应时间达到 0.5、1、2、4、8、12 和 24 h 时分别取出一批样品, 静置沉淀后取上清液进行离心分离(7 000 r/min, 20 min), 用紫外光谱法测定离心分离后上清液中邻氯酚的浓度^[5], 另做空白对照以确定全程邻氯酚的损失, 结果表明挥发、光解可忽略. 苯酚和 2, 4-二氯酚实验方法同邻氯酚.

(2)等温吸附实验 称取 1 号悬浮泥沙样品 2.00 g, 调节初始 pH = 7.0, 苯酚、邻氯酚和 2, 4-二

氯酚的初始浓度为 0.4 ~ 2.0 mg/L, 反应体积为 50 mL, 反应温度为 25℃, 吸附反应时间根据上述实验结果, 分析 1 号悬浮泥沙对 3 种酚的吸附动力学规律. 同样方法做 2、3 和 4 号 3 种样品对苯酚、邻氯酚和 2, 4-二氯酚的吸附.

(3)盐度对吸附的影响 在 pH = 7.0, 邻氯酚初始浓度范围为 0.4 ~ 2.0 mg/L, 反应温度为 25℃, 利用人工配制的海水, 对 1 号样品分别选取盐度为 0.05‰、5‰和 10‰, 3 号样品选取盐度为 10‰、16‰和 22‰进行实验.

2 结果与讨论

2.1 样品理化性质

4 种样品粒径分布及有机质含量情况如表 1 所示. 测试结果与相关报道^[6-7]是一致的, 采自长江口的 2 个悬浮泥沙样品粒径 < 10 μm 部分所占比例比采自杭州湾的 2 个样品高, 而 1 号、2 号样品间, 3 号、4 号样品间粒径分布差别不大. 4 种样品的比表面积也具有同样的规律, 但 1 号、2 号样品有机质含量却比 3 号、4 号低.

对 4 种样品的矿物成分分析表明, 矿物成分没有显著差异, 主要矿物成分为伊利石(约占样品干重的 67.0% ~ 72.0%)、绿泥石(约 11.4% ~ 13.9%)、高岭石(约 9.0% ~ 11.9%)、蒙脱石(约 2.4%), 其它约 1%, 因此矿物成分对吸附特性的影响可以不考虑.

2.2 吸附平衡时间确定

表 1 样品的粒径分布及有机质含量

Table 1 Samples' sizes distribution and organic matter contents

样品编号	比表面积 / $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	粒径分布/%						有机质
		< 2 μm	2 ~ 5 μm	5 ~ 10 μm	10 ~ 15 μm	15 ~ 20 μm	> 20 μm	/%
1	8.9	12.2	21.7	38.3	8.7	7.9	11.2	0.87
2	8.3	10.7	22.3	35.2	10.6	8.1	13.1	1.03
3	7.3	5.1	23.3	34.5	18.4	8.5	10.2	1.89
4	7.1	5.3	21.6	34.2	19.5	7.8	11.6	1.21

邻氯酚在 4 种样品上吸附量随时间变化关系如图 1 所示. 从图 1 看出, 4 种样品在前 4h 内吸附速率比较高, 12 h 之后吸附速率增加已经很小, 主要是慢吸附, 这与文献[8]的结论是一致的, 可以认为 12 h 后吸附已经达到平衡, 考虑到实验操作安排上的方便, 取后续实验中吸附时间为 24 h.

对比图 1 和表 1 可以发现, 样品有机质含量和比表面积均影响吸附量的大小. 1 号与 2 号、3 号与 4 号悬浮泥沙相比, 其粒径分布比较接近, 比表面

积相差不大, 但来源不同, 有机质的含量呈现显著的差异, 造成吸附量差别明显. 与其它 3 种样品相比, 1 号样品虽然比表面积最大, 但有机质含量最低, 其对邻氯酚的吸附量最小, 特别是吸附时间 > 4 h 后, 1 号样品与其它样品之间的吸附量差异变得明显. 2 号样品虽然比表面积大于 4 号, 但有机质含量小于后者, 两者间的吸附量比较接近. 以上现象表明, 邻氯酚在 4 种悬浮泥沙样品上的吸附既有表面吸附作用, 也有分配作用. 根据本实验尚难

以判断 4 种样品对邻氯酚作用何种影响更明显, 需要进一步研究. 4 种泥沙样品对苯酚和 2, 4-二氯酚的吸附量随时间的变化关系同邻氯酚的规律相同, 此处不再列出详细的实验数据.

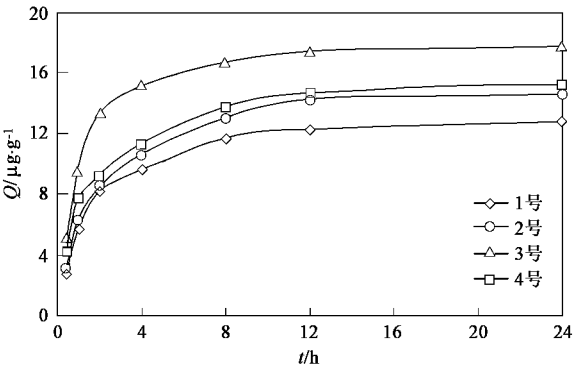


图 1 样品对邻氯酚的吸附量随时间的变化
Fig.1 o-chlorophenol sorption as a function of time by four suspended particulates samples

2.3 等温吸附模式确定

2.3.1 样品对苯酚的等温吸附

4 种样品对苯酚的等温吸附结果如图 2 所示. 根据文献[9], 沉积物中酚类残留物浓度很少超过 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 而实验中得到的样品对苯酚的吸附量数量级在 $\mu\text{g}/\text{g}$, 因此可以忽略样品中苯酚的背景浓度值, 认为吸附曲线是过原点的. 一般认为, 苯酚具有高溶解度和低辛醇-水分配系数 (K_{ow}), 表现出比较强的离子性化合物的特点, 所以泥沙对苯酚的吸附量很小[9]. 实验中调节初始 $\text{pH} = 7.0$, 小于苯酚的 $\text{p}K_a$ 值 ($\text{p}K_a = 10.02$), 以抑制苯酚的电离. 从图 2 可以看出, 随着苯酚初始浓度由 $0.4 \text{ mg}/\text{L}$ 增加到 $2.0 \text{ mg}/\text{L}$, 样品对苯酚的绝对吸附量也从 $3 \mu\text{g}/\text{g}$ 增加到 $11 \mu\text{g}/\text{g}$ 左右, 但相对吸附量却从 31% 左右下降到 21% 左右, 表明即使在很低的吸附质浓度下样品的吸附能力是有限的.

一般认为, 等温条件下水体沉积物、土壤对非离子性化合物的表面吸附作用符合 Langmuir 定律, 而分配作用则与吸附剂有机质含量线性相关. Freundlich 等温吸附模型作为一种经验模型, 也得到了广泛应用. 这 3 种拟合模式的表达式分别为:

①线性等温式: $Q = Kc_e$.

式中, Q 为达到平衡时的吸附量, K 为线性吸附常数, c_e 为平衡时的吸附质浓度. 由于吸附是动态平衡过程, 只有当吸附质初始浓度为 0 时, 其平衡浓度才可能为 0, 因此不考虑吸附质背景浓度时, 线性吸附等温式应该是一条通过原点的直线.

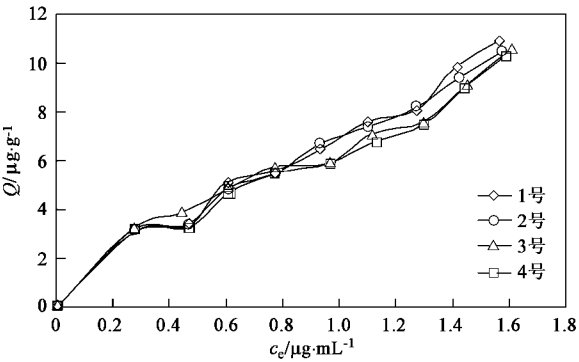


图 2 样品对苯酚的等温吸附
Fig.2 Sorption isotherms of phenol by four suspended particulates samples

② Freundlich 等温式: $Q = K_f c_e^n$

式中, Q 为达到平衡时的吸附量, c_e 为平衡时的吸附质浓度, K_f 为 Freundlich 吸附常数, n 为 Freundlich 吸附指数.

③ Langmuir 等温式: $Q = \frac{Q_s b c_e}{1 + b c_e}$

式中, Q 为达到平衡时的吸附量, c_e 为平衡时的吸附质浓度, Q_s 为最大吸附量, b 为常数.

表 2 给出了样品对苯酚吸附拟合的结果. 由表 2 可以看出, 悬浮泥沙样品对苯酚的吸附采用线性模式拟合或者 Freundlich 模式拟合都具有比较好的相关性, 4 个样品对苯酚的吸附能力非常接近. 根据文献[10]介绍的方法, 在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下对回归直线、Freundlich 曲线转换得到的直线、Langmuir 曲线转换得到的直线比较表明: 同种拟合模式下的 4 条直线没有显著差别, 可以用一条公共直线来代表. 这表明, 在比表面积和有机质含量共同影响下, 悬浮泥沙对苯酚的吸附差异性并不显著.

采用线性拟合时, 本实验得到的 4 种样品对苯酚的吸附常数 K 在 $6.3 \sim 7.0$ 之间, 比文献[11]报道的西湖底泥值 $1.10 \sim 2.13$ 要大, 但处于相同的数量级. 本实验中没有测定悬浮泥沙中有机碳含量, 根据文献[9], f_{om} (有机质含量) 与 f_{oc} (有机碳含量) 可以通过 Van Bemmelen 常数 1.724 进行互换, 由此计算出采用 Freundlich 拟合时 4 种样品的有机碳吸附常数 K_{oc} 分别为 1410 、 1172 、 622 、 936 , 比文献[12]报道的底泥 K_{oc} 值 46.4 要大. 由于悬浮泥沙间性质差异对苯酚吸附影响不显著, 造成本研究得到的苯酚吸附常数比文献报道值大的主要原因可能是由于本实验中苯酚所采用的初始浓度范围远小于文献中所使用的范围.

2.3.2 样品对邻氯酚的等温吸附

样品对邻氯酚的吸附特性如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 在邻氯酚初始浓度为 0.4 mg/L 时, 4 种样品对其吸附能力非常接近. 随着初始浓度的增大, 1 号、2 号样品间差异先是增大, 然后保持不变,

而 3 号、4 号与 1 号、2 号之间的吸附能力差别表现得越来越显著, 这是与苯酚的吸附明显不同的. 对照表 1, 1 号、2 号粒径比 3 号、4 号比表面积更大些, 有机质含量低, 这说明随着水体中邻氯酚浓度的增大, 分配作用效应在增强.

表 2 样品对苯酚吸附的拟合
Table 2 Phenol isotherm sorption fitting

样品编号	线性模式		Freundlich 模式		Langmuir 模式	
	方程	R^2	方程	R^2	方程	R^2
1	$Q = 6.96c_e$	0.97	$Q = 7.11c_e^{0.75}$	0.95	$Q = 12.30c_e/(1 + 0.76c_e)$	0.88
2	$Q = 6.79c_e$	0.97	$Q = 7.00c_e^{0.73}$	0.96	$Q = 12.52c_e/(1 + 0.81c_e)$	0.90
3	$Q = 6.52c_e$	0.93	$Q = 6.82c_e^{0.64}$	0.96	$Q = 14.77c_e/(1 + 1.18c_e)$	0.93
4	$Q = 6.35c_e$	0.95	$Q = 6.57c_e^{0.68}$	0.93	$Q = 13.66c_e/(1 + 1.12c_e)$	0.85
公共方程	$Q = 6.61c_e$	—	$Q = 7.66c_e^{0.70}$	—	$Q = 13.28c_e/(1 + 0.96c_e)$	—

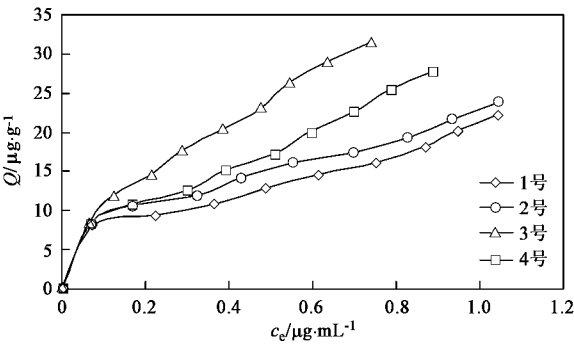


图 3 样品对邻氯酚的吸附
Fig.3 Sorption isotherms of *o*-chlorophenol by four suspended particulates samples

样品对邻氯酚吸附的拟合见表 3. 可以看出, 4 种样品 Freundlich 等温吸附模型拟合的效果要比

线性模式和 Langmuir 模式好. 按照文献[10]方法, 对样品吸附效果线性回归方程或转化的线性回归方程比较发现, 3 号样品的回归方程在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时与其它样品回归方程具有明显差异, 而其它 3 种样品之间没有显著差异. 这也验证了由于 3 号样品有机质含量明显比其它 3 个样品高, 使得在相同的初始浓度下, 它对邻氯酚的吸附量更大.

由 Freundlich 等温式计算得到 4 种样品的 K_{oc} 值分别为 3 707、3 479、3 287 和 3 698, 比李铁等^[12]报道底泥 K_{oc} 值 557.6 大, 由于李铁等没有报道他们所用样品的粒径分布、比表面积等信息, 笔者推测 K_{oc} 值相差较大可能是悬浮泥沙与底泥比表面积不同以及所采用的吸附剂初始浓度范围不同造成的.

2.3.3 样品对 2, 4-二氯酚的等温吸附

表 3 样品对邻氯酚吸附的拟合
Table 3 *o*-chlorophenol isotherm sorption fitting

样品编号	线性模式		Freundlich 模式		Langmuir 模式	
	方程	R^2	方程	R^2	方程	R^2
1	$Q = 23.09c_e$	0.83	$Q = 18.71c_e^{0.39}$	0.89	$Q = 172.41c_e/(1 + 9.83c_e)$	0.71
2	$Q = 25.05c_e$	0.71	$Q = 20.79c_e^{0.38}$	0.95	$Q = 192.31c_e/(1 + 9.77c_e)$	0.83
3	$Q = 48.16c_e$	0.86	$Q = 35.66c_e^{0.39}$	0.99	$Q = 166.67c_e/(1 + 5.13c_e)$	0.96
4	$Q = 33.15c_e$	0.88	$Q = 25.96c_e^{0.47}$	0.94	$Q = 169.49c_e/(1 + 7.27c_e)$	0.84

样品对 2, 4-二氯酚的吸附情况见图 4 所示. 从中可以发现, 样品对 2, 4-二氯酚的等温吸附与邻氯酚表现出相似的规律, 在初始浓度为 0.4 mg/L 时, 样品之间的吸附能力差异相差不大, 但随着吸附质初始浓度的增大, 吸附量之间的差异也在增大. 对照表 1、图 3 和图 4 可以发现, 由于 4 种样品间比表面积相差幅度在 13% 以内, 但有机质含量 3 号是 1 号的

2.2 倍, 因此样品对邻氯酚和 2, 4-二氯酚之间的吸附差异应主要是有机质含量不同引起的.

表 4 给出了对 2, 4-二氯酚吸附的拟合情况. 由表 4 可以发现, 对 2, 4-二氯酚的等温吸附拟合采用 Freundlich 模式进行拟合比线性拟合或 Langmuir 拟合具有更好的相关性, 表明 2, 4-二氯酚吸附表现出非线性特征, 计算得到的 K_{oc} 值 6 444 ~ 8 787 间.

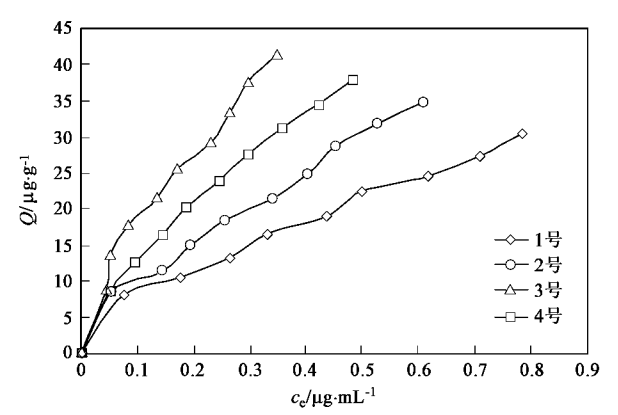


图 4 悬浮泥沙样品对 2, 4-二氯酚的吸附

Fig.4 Sorption isotherms of 2, 4-dichlorophenol by four suspended particulates samples

表 4 泥沙样品对 2, 4-二氯酚吸附的拟合

Table 4 2, 4-dichlorophenol isotherm sorption fitting

样品编号	线性模式		Freundlich 模式		Langmuir 模式	
	方程	R^2	方程	R^2	方程	R^2
1	$Q = 41.57c_e$	0.92	$Q = 32.52c_e^{0.59}$	0.97	$Q = 131.58c_e/(1 + 4.38c_e)$	0.89
2	$Q = 62.04c_e$	0.95	$Q = 44.38c_e^{0.62}$	0.96	$Q = 185.19c_e/(1 + 5.43c_e)$	0.88
3	$Q = 130.25c_e$	0.90	$Q = 80.62c_e^{0.65}$	0.97	$Q = 270.27c_e/(1 + 4.11c_e)$	0.94
4	$Q = 87.37c_e$	0.93	$Q = 61.67c_e^{0.47}$	1.00	$Q = 192.31c_e/(1 + 3.75c_e)$	0.98

趋势. 这种非线性现象在本实验中尚不明显, 还需要进一步的研究.

比较样品对 3 种酚吸附量可以发现, 随着氯化程度的增加, 泥沙样品对酚类化合物的吸附量也在增加, 这与文献[12]的研究结论是一致的, 主要是由于随着酚类化合物氯化程度的增加, 其非离子性也在增加, K_{ow} 也增大.

2.3.4 盐度对吸附的影响

长江口盐度变化范围一般在 0.04‰~10‰之间, 以取自长江口的 1 号悬浮泥沙和邻氯酚为代表, 考察 0.05‰、5‰和 10‰ 3 种盐度条件下吸附影响, 并与没有外加盐度条件下做对比. 杭州湾盐度变化范围一般在 10‰~22‰之间, 因此选择盐度为 10‰、16‰和 22‰. 盐度影响下的邻氯酚等温吸附曲线见图 5 和图 6. 由图 5 可知, 1 号样品在 4 种盐度下的吸附能力非常接近, 对 4 组吸附数据分析表明: 显著性水平 $\alpha = 0.05$ 时, 1 号样品在 0.05‰盐度下对邻氯酚的吸附比盐度为 0 时要高, 而 5‰、10‰盐度下样品的吸附量均比 0 盐度下低, 10‰盐度下样品对邻氯酚的吸附量最低. 由图 6 可知, 随着盐度的上升, 3 号样品对邻氯酚的吸附呈下降趋势.

本研究结果表明, 在一定盐度范围内悬浮泥沙

在 Chiou 等^[13]考察了 3, 5-二氯苯酚相对平衡浓度 (相对平衡浓度 = 吸附质平衡浓度/吸附质饱和和溶解浓度) 在 0~0.6 范围内时, 在泥沼土上的吸附情况, 得出相对平衡浓度在 0~0.1 范围内, 3, 5-二氯苯酚表现出明显的非线性吸附现象. 他们认为产生这种现象的原因是在低吸附质浓度下, 土壤或者沉积物中的有机质 (soil/sediment organic matter, SOM) 能够与吸附质产生特殊的作用力, 使得更多吸附质能够分配到有机质中去; 但是当吸附质浓度达到一定值以后, 由于 SOM 含量有限, 因此仅能依靠分配作用和吸附作用, 不再产生特殊作用力. 由于本实验中 2, 4-二氯苯酚的相对平衡浓度 < 0.000 3 mg·mL⁻¹, 因此可以用 Chiou 等的理论来解释这种非线性吸附

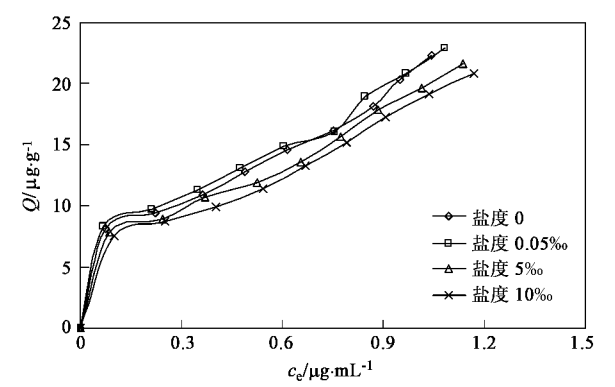


图 5 不同盐度下 1 号样品对邻氯酚的等温吸附

Fig.5 o-chlorophenol isothermal sorption by sample 1 under different salinities

对邻氯酚的吸附可能随着盐度的升高有所上升, 但盐度过高时, 吸附量反而下降. 有关盐度或离子浓度对泥沙或沉积物吸附性能的影响目前报道结果还存在很多不一致^[14~17], 可能与吸附剂样品以及吸附质样品本身的物化性质, 吸附实验的条件等均有关, 影响吸附过程的机理还需要进一步研究.

3 结论

(1) 悬浮泥沙样品对酚类化合物的吸附可以在

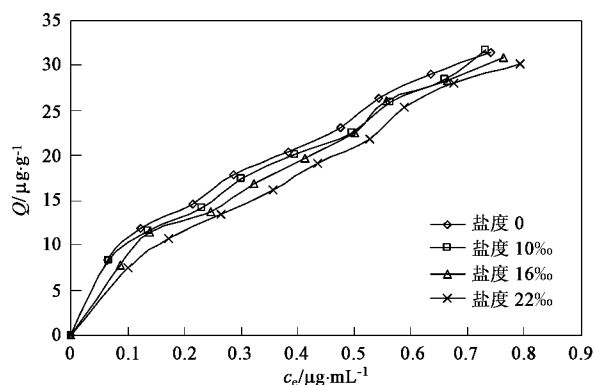


图 6 不同盐度下 3 号样品对邻氯酚的等温吸附

Fig.6 *o*-chlorophenol isothermal sorption
by sample 3 under different salinities

12 h 内达到相对平衡状态,与底泥的吸附特性一致。

(2)当苯酚、邻氯酚、2,4-二氯酚 3 种化合物的初始浓度为 0.4 mg/L 时,悬浮泥沙对其相对吸附量范围分别为 31.3% ~ 33.3%、81% ~ 84%、76% ~ 86%,当初始浓度为 0.6 mg/L 时,相对吸附量分别为 22.1% ~ 25.5%、60.0% ~ 79.3% 和 80.7% ~ 82.0%,而目前国内挥发酚的二级排放标准为 0.5 mg/L,表明河流中的悬浮泥沙具有有效吸附排入的酚类化合物的能力。

(3)4 种悬浮泥沙对苯酚的吸附没有显著差别,吸附量随着酚类化合物氯化程度的增加而增加。

(4)在 3 种酚的初始浓度为 0.4 ~ 2.0 mg/L 范围内,悬浮泥沙样品对酚类化合物的等温吸附用 Freundlich 吸附等温式拟合比线性吸附等温式和 Langmuir 等温式具有更好的拟合效果。

(5)过高的盐度使得悬浮泥沙对邻氯酚的吸附量反而减小。

参考文献:

- [1] 迟杰,黄国兰,杨彬.五氯酚在表面微层水与表层水间的分配行为[J].环境科学,1999,20(6):18-21.
- [2] 王树功,谢镜明,吴群河,等.小东江底泥中挥发酚的垂向

分布研究[J].环境科学研究,2001,14(5):17-19.

- [3] Kansanen P H. Distribution and accumulation of total organic chlorine and chlorophenol compounds in the sediments of Lake Etela-Saimaa, Finland [J]. Water Science and Technology, 1988, 20 (2): 197-201.
- [4] Chiou C T. Partition and adsorption of organic contaminants in environmental systems [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2002. 124-128.
- [5] 黄君礼,鲍治宇.紫外吸收光谱法及其应用[M].北京:中国科学技术出版社,1992.199-202.
- [6] 张志忠.长江口细颗粒泥沙基本特性研究[J].泥沙研究,1996,(1):67-73.
- [7] 茹荣忠.杭州湾海域水体悬浮泥沙粒度统计分析[J].东海海洋,2002,20(4):13-18.
- [8] Zhu L Z, Chen B L, Tao S, *et al.* Interactions of Organic Contaminants with Mineral-Adsorbed Surfactants [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(17): 4001-4006.
- [9] 金相灿,程振华,徐南妮,等.有机化合物污染化学——有毒有机物污染化学[M].北京:清华大学出版社,1990.255-265.
- [10] 陶澍.应用数理统计方法[M].北京:中国环境科学出版社,1994.348-353.
- [11] 朱利中,徐霞,胡松,等.西湖底泥对水中苯胺、苯酚的吸附性能及机理[J].环境科学,2000,21(2):28-31.
- [12] 李铁,叶常明.酚类化合物在水体颗粒物上的吸附实验[J].环境化学,1997,16(3):227-232.
- [13] Chiou C T, Kile D E, Rutherford D W, *et al.* Sorption of Selected Organic Compounds from Water to a Peat Soil and Its Humic-Acid and Humic Fractions: Potential Sources of the Sorption Nonlinearity [J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34(7): 1254-1258.
- [14] Dai S Q, Huang G L, Cai Y. The adsorption behaviour of dimethyltin from seawater onto sedimentary phase in Tianjin Harbor [J]. Environmental Pollution, 1993, 82 (3): 217-221.
- [15] Hoch M. Assessment of Salinity Variations in TBT Adsorption onto Kaolinite and Montmorillonite at Different pH Levels [J]. Water, Air & Soil Pollution, 2004, 152(1-4): 349-362.
- [16] 孙卫玲,倪晋仁,郝鹏鹏,等.泥沙对双酚 A 的吸附及其影响因素研究[J].环境科学学报,2004,24(6):975-981.
- [17] 谢玲玲,周培疆,刘丽君,等.五氯苯酚在武汉东湖底质颗粒物上的吸附研究[J].武汉大学学报(理学版),2005,51 (4): 448-452.