

泥沙吸附重金属污染物室内静态试验研究*

黄岁樑** 万兆惠

王兰香

(水利水电科学研究院灾害-环境评价研究中心 北京 100044) (中国环境科学研究院 北京 100012)

提要 从吸附反应动力学方程和质量守恒方程出发, 导出室内静态试验中泥沙吸附量和水相重金属浓度随时间变化的计算公式, 并得出泥沙平衡吸附量和水相平衡浓度随泥沙吸附特性、水相重金属离子初始浓度和泥沙浓度变化的计算公式。结合室内试验, 认为泥沙浓度不影响吸附特性参数, 如饱和吸附量 b 、吸附-解吸速率常数 k 及吸附速率系数 k_1 。

关键词 泥沙 吸附 重金属 污染物 静态试验

分类号 TV149.2; X502

1 引 言

进入天然水体中的重金属污染物能够被水体中的固体悬浮物(主要是泥沙颗粒)所吸附, 这是重金属污染物由液相转入固相的主要途径^[1~5]。固-液界面吸附模型主要参考了固-气界面吸附模型的研究成果^[1]。

(1)当重金属污染物浓度很低时, 可用Henry型吸附等温式及其吸附动力学方程来描述悬浮物对重金属污染物的吸附。吸附动力学方程是描述吸附速率的数学式, 吸附等温式是在温度固定的条件下表达平衡吸附量和水相平衡浓度之间关系的数学式, 根据这种关系绘制的曲线称为吸附等温线。

$$\text{吸附动力学方程} \quad \frac{dN}{dt} = k_1 C - k_2 N \quad (1)$$

$$\text{吸附等温式} \quad N_{\infty} = k_a C_{\infty} \quad (2)$$

式(1)表明, 吸附速率 dN/dt 和水相浓度 C 成正相关, 与吸附量 N 成负相关。 k_1 为吸附速率系数, k_2 为解吸速率系数。式(2)表明, 吸附平衡时, 平衡吸附量 N_{∞} 和水相平衡浓度 C_{∞} 成正比。 k_a 为吸附-解吸速率常数($=k_1/k_2$)。

$$(2)\text{弗林德利希吸附等温式} \quad N_{\infty} = k_b C_{\infty}^{1/n} \quad (3)$$

式中 k_b 和 n 为常数, N_{∞} 和 C_{∞} 物理意义同式(2)。该公式系一经验公式, 系数 k_b 和指数 n 没有明

本文于1993年8月25日收到, 1994年5月30日收到修改稿。

*本研究系国家自然科学基金和水利水电科学基金资助项目。

**现是清华大学水利水电工程系泥沙研究室博士后。

确的物理意义,应用范围仅限于中等浓度的情况。

(3)兰格茂尔吸附模型方程

$$\text{吸附动力学方程} \quad \frac{dN}{dt} = k_1 C(b-N) - k_2 N \quad (4)$$

吸附等温式

$$N_{\infty} = b \frac{C_{\infty}}{k + C_{\infty}} \quad (5)$$

式中 N 和 C 、 N_{∞} 和 C_{∞} 物理意义同上; b 为吸附达到饱和时的最大极限吸附量; k 值相当于吸附量达到饱和吸附量的一半时的水相平衡浓度,是解吸速率系数 k_2 和吸附速率系数 k_1 之比。式(4)表明,吸附速率 dN/dt 和水相浓度 C 及剩余吸附能力 $(b-N)$ 的乘积成正相关,与吸附量 N 成负相关。

2 理论分析(一)

在试验室中进行静态吸附试验时,试验所采用的反应器一般很小(通常是50mL或100mL),而搅拌强度(或振荡强度)却比较大,重金属污染物和泥沙颗粒充分而反复地接触、碰撞,泥沙浓度和重金属污染物浓度在反应器内一般很均匀。由于重金属污染物被泥沙颗粒吸附比较迅速,对于大多数重金属而言;搅拌或振荡终结时,已基本达到平衡状态,因而可以用吸附动力学方程和质量守恒方程来描述这种吸附过程。

(1)当重金属离子浓度很低时,可以用下面的三个方程表示:

①Henry型吸附动力学方程,即式(1)

$$\text{②质量守恒方程} \quad NSV + (1 - S/\rho_s)CV = N_0SV + C_0(1 - S/\rho_s)V$$

一般泥沙浓度较低,则 $1 - S/\rho_s \approx 1$, 上式变成

$$NSV + CV = N_0SV + C_0V = AV \quad (A = N_0S + C_0) \quad (6)$$

③初始条件 $t=0$ 时,

$$\text{初始重金属含量} \quad N|_{t=0} = N_0 \quad (7)$$

$$\text{水相重金属离子初始浓度} \quad C|_{t=0} = C_0 \quad (8)$$

式中 V 为反应器内水溶液的体积; S 为泥沙浓度; t 为时间; C 和 N 分别为任意时刻水相重金属离子浓度和单位重量泥沙吸附量。为更一般起见,设 $N_0 \neq 0$, 其它符号物理意义同上。

将式(6)代入式(1)积分并代入初始条件则得

$$N = \frac{k_1}{Sk_1 + k_2} (SN_0 + C_0) - \frac{k_1 C_0 - k_2 N_0}{Sk_1 + k_2} e^{-(Sk_1 + k_2)t} \quad (9)$$

$$C = SN_0 + C_0 - \frac{S k_1}{Sk_1 + k_2} (SN_0 + C_0) + \frac{k_1 C_0 - k_2 N_0}{Sk_1 + k_2} S e^{-(Sk_1 + k_2)t} \quad (10)$$

上面两式即为反应器内颗粒相浓度和水相浓度随时间变化的规律。

本文主要讨论泥沙对污染物的吸附,因此令 $N_0=0$, 并记 $k' = k_1/k_2$, 则有

$$N = \frac{k}{1 + Sk} C_0 - \frac{k}{1 + Sk} C_0 e^{-k_2(1 + Sk)t} \quad (11)$$

$$C = C_0 - \frac{k}{1 + sk} C_0 + \frac{Sk}{1 + sk} C_0 e^{-k_2(1 + Sk)t} = \frac{1}{1 + sk} C_0 + \frac{Sk}{1 + sk} C_0 e^{-k_2(1 + Sk)t} \quad (12)$$

(2)下面由式(11)和(12)进行简单的讨论:

①当 $S \rightarrow 0$, $N \rightarrow kC_0(1 - e^{-k_2t})$ 为最大值, $SN \rightarrow SkC_0(1 - e^{-k_2t}) \rightarrow 0$ 为最小值, $C \rightarrow C_0$ 为最大值。即泥沙浓度很低时, 单位重量泥沙的吸附量很大, 然而由于泥沙浓度很小, 故总的吸附量小, 对水相浓度影响不大。

②当 $S \rightarrow \infty$, $N \rightarrow 0$ 为最大值, $SN \rightarrow C_0$ 为最大值, $C \rightarrow 0$ 为最小。可见泥沙浓度很高时, 反应器内所有的重金属离子都可能被吸附, 水相浓度会很低, 但并不等于零。

由此可见, 泥沙浓度升高时, 会使单位重量泥沙的吸附量降低, 但从总的效果上看, 总的泥沙吸附量却是增加的, 即水相重金属离子浓度会降低。

③当 $t \rightarrow \infty$ 时, 即吸附平衡时, 有
$$N_\infty = \frac{k}{1 + Sk'} C_0 \quad (13)$$

$$C_\infty = \frac{1}{1 + Sk'} C_0 \quad (14)$$

即单位重量泥沙的平衡吸附量 N_∞ 和水相平衡浓度 C_∞ 均与泥沙浓度、初始水相重金属离子浓度和泥沙吸附特性有关。而且

$$\partial N_\infty / \partial S = -\frac{k^2}{(1 + Sk')^2} \leq 0 \quad \text{及} \quad \partial C_\infty / \partial S = -\frac{k'}{(1 + Sk')^2} \leq 0$$

即均随泥沙浓度增加而减少。但是可以验证

$$N_\infty / C_\infty = \frac{k' C_0}{1 + Sk'} / \frac{C_0}{1 + Sk'} = k'$$

即
$$N_\infty = k' C_\infty = k_d C_\infty$$

上式表明, Henry 吸附等温式与泥沙浓度无关, 而 Henry 常数 $k_d = k' = k_1 / k_2$, 即吸附速率与解吸速率系数之比。

上面讨论的是以吸附为主的情形, 同样可以讨论解吸为主, 这里不再赘述。

3 理论分析(二)

对于更一般的情况, 可用下面的方程描述。

- (1) 兰格茂尔吸附动力学方程, 即式(4);
- (2) 反应器内质量守恒方程, 即式(6);
- (3) 初始条件, 即式(7)、式(8)。

各符号物理意义同上。

将式(6)引入式(4), 并简记 $p = Sk_1$, $q = -(Ak_1 + Sb k_1 + k_2)$, $R = Ab k_1$ 则得

$$dN/dt = pN^2 + qN + R \quad (15)$$

由于 $q^2 - 4pR = (k_1 A - k_1 S b)^2 + 2(A + S b)k_1 k_2 + k_2^2 > 0$

积分(15)式并引入初始条件, 化简可得

$$\left| \frac{2pN + q + \sqrt{q^2 - 4pR}}{2pN + q - \sqrt{q^2 - 4pR}} \right| = \left| \frac{2pN_0 + q + \sqrt{q^2 - 4pR}}{2pN_0 + q - \sqrt{q^2 - 4pR}} \right| e^{-\sqrt{q^2 - 4pR}t} \quad (16)$$

引入 $N = \frac{A - C}{S}$, 可得

$$\left| \frac{2p\frac{A-C}{S} + q + \sqrt{q^2 - 4pR}}{2p\frac{A-C}{S} + q - \sqrt{q^2 - 4pR}} \right| = \left| \frac{2pN_0 + q + \sqrt{q^2 - 4pR}}{2pN_0 + q - \sqrt{q^2 - 4pR}} \right| e^{-\sqrt{q^2 - 4pR}t} \quad (17)$$

仍讨论吸附为主的情形, 即 $N_0=0$ 、 $C_0 \neq 0$, 并由代数运算可知, 当分子、分母乘积大于零时, 可直接去掉绝对值符号, 于是式(16)、(17)简化成

$$N = \frac{A_1 - A_2 - (A_1 - A_2)e^{-SA_2k_1t}}{2 - 2\frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2}e^{-SA_2k_1t}} \quad (18)$$

$$C = C_0 - S \frac{A_1 - A_2 - (A_1 - A_2)e^{-SA_2k_1t}}{2 - 2\frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2}e^{-SA_2k_1t}} \quad (19)$$

式中 $A_1 = \frac{C_0}{S} + b + \frac{k}{S}$, $A_2 = \sqrt{(\frac{C_0}{S} - b)^2 + 2\frac{k}{S}(\frac{C_0}{S} + b) + (\frac{k}{S})^2}$ 及 $k = k_2/k_1$ 。

式(18)、(19)分别为反应器内各不同时刻泥沙吸附量和水相浓度的计算公式。本文将用此两式并结合试验在下节作进一步的讨论。

下面用方程(15)讨论吸附平衡的情况。当然, 若 $N_0=0$, 则用公式(18)可更快地得到结论。

当 $t \rightarrow \infty$, $dN/dt=0$ 即 $pN^2 + qN + R=0$, 可解得

$$\begin{aligned} N_{1,2} &= \frac{-q \pm \sqrt{q^2 - 4pR}}{2p} \\ &= \frac{A + Sb + k \pm \sqrt{(A - Sb)^2 + 2(A + Sb)k + k^2}}{2S} \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)中 $k = k_2/k_1$ 。通过简单的变换并考虑到 $N = \frac{A-C}{S} < \frac{A}{S}$ 及 $N < b$, 可知平衡吸附量为

$$N_\infty = N_2 = \frac{A + Sb + k - \sqrt{(A - Sb)^2 + 2(A + Sb)k + k^2}}{2S} \quad (21)$$

水相平衡浓度为

$$C_\infty = A - SN_\infty = \frac{A - Sb - k + \sqrt{(A - Sb)^2 + 2(A + Sb)k + k^2}}{2} \quad (22)$$

式(21)、(22)为反应器内吸附达到平衡时, 泥沙平衡吸附量和水相平衡浓度的计算公式。

对主要是吸附而言, $N_0=0$, 则

$$N_\infty = \frac{1}{2} \left[\frac{C_0}{S} + b + \frac{k}{S} - \sqrt{(\frac{C_0}{S} - b)^2 + 2\frac{k}{S}(\frac{C_0}{S} + b) + (\frac{k}{S})^2} \right] \quad (23)$$

$$C_\infty = \frac{1}{2} [C_0 - Sb - k + \sqrt{(C_0 - Sb)^2 + 2(C_0 + Sb)k + k^2}] \quad (24)$$

由式(23)、(24)很易验证 $\partial N_\infty / \partial S < 0$ 、 $\partial C_\infty / \partial S < 0$ 而 $\frac{\partial(SN_\infty)}{\partial S} > 0$, 即同样可得出, 平衡吸附量和水相平衡浓度随泥沙浓度增加而减少, 但泥沙总的吸附量随泥沙浓度增加而增加。

同样可验证 $b \frac{C_{\infty}}{k+C_{\infty}} = N_{\infty}$ 。即吸附平衡时, 单位重量泥沙平衡吸附量 N_{∞} 和水相平衡浓度 C_{∞} 与泥沙浓度有关, 但就平衡时 N_{∞} 与 C_{∞} 的关系而言, 若采用兰格茂尔吸附等温式 $N_{\infty} = b \frac{C_{\infty}}{k+C_{\infty}}$, 则可以消除泥沙浓度的影响。

目前研究中, 很关心平衡吸附量 N_{∞} 随泥沙浓度的变化。这里用式 (23) 作一点说明。由式 (23) 知, N_{∞} 只与 3 个因子 C_0/S 、 b 及 k/S 有关。 C_0/S 是水相重金属初始浓度与泥沙浓度之比, 完全是外部条件, 即为通常的“配给比”^[4]; b 是泥沙饱和吸附量, 反映泥沙内在的吸附性质; k/S 中, k 是泥沙解吸与吸附速率系数之比, 反映泥沙的吸附性质, 因此 k/S 是反映内、外条件对平衡吸附量的影响。根据该式能很好地解释一些试验现象。例如稀释反应系统, 保持配给比 C_0/S 不变, 试验中发现平衡吸附量会发生变化。这是因为稀释时 k/S 发生了变化, 因此平衡吸附量必然会发生变化。

上面的分析是假定泥沙吸附特性如饱和吸附量 b 、解吸与吸附速率系数之比 k 本身不随泥沙浓度变化的条件下导出的。关于此点下面将用试验资料予以证实。

4 试验研究

4.1 试验方法

试验用沙来源于黄河郑州水厂野外沉沙池的自然沉淀泥沙。沙样采集后即超低温冷冻干燥, 处理后沙样呈分散状。然后用 460 目尼龙筛干分得到小于 0.033mm 沙样作为试验用沙。

吸附试验中, 将所需重量的沙样在高纯水中配成悬浊液, 活化一夜, 加入所需浓度的镉重金属离子, 于恒温摇瓶机中振荡 2 h, 放置过夜, 然后用 0.45mm 微孔滤膜抽滤, 滤液测定镉浓度, 相应的空白液和悬浊液滤液的镉浓度差值即为镉的吸附量, 再计算出吸附值。试验溶液 pH 值 6~7。全过程平行操作。

4.2 泥沙浓度对吸附等温式参数的影响

泥沙浓度对平衡吸附量有很大影响。在其它条件相同时, 平衡吸附量随泥沙浓度增加而减小, 这已为众多的试验事实所证实。泥沙浓度对吸附等温式有何影响, 即对一定的吸附剂和一定的溶液, 在一定的温度下, 描述吸附等温式的参数是否受泥沙浓度的影响。此问题的研究具有重要的理论意义和实用价值。本文设计 3 组试验研究这一问题。

3 次试验的条件如表 1。

从表 1 可见, 试验设计有以下特点: 泥沙浓度跨度大, 一般是 5~50 kg/m³; 为使水相平衡浓度落在仪器较佳的检测范围, 对泥沙浓度进行分级, 分别设计不同的初始重金属离子浓度; 初始重金属离子浓度组变化处的泥沙浓度, 设计两次试验, 如第一次试验, 25 kg/m³ 泥沙浓度有两次试验, 分别对应不同的初始重金属离子浓度组, 以检查不同重金属离子初始浓度对试验误差的影响; 试验用沙粒径小于 0.033mm, 重金属为镉离子。

对每一个泥沙浓度的平衡吸附量和水相平衡浓度分别用兰格茂尔和弗林德利希吸附等温式, 采用最小二乘法, 拟合求解吸附等温式各参数 b 、 k 和 k_a 、 n 。表 2 给出了第一次试验结果。表中的误差是指平衡吸附量试验值与拟合公式计算值差除以吸附量试验值的上、下界。对每

次试验,不考虑泥沙浓度的差别,将这一次的全部试验数据分别用兰格茂尔和弗林德利希吸附等温式拟合求解相应的吸附等温式参数,这相当于该次试验各组拟合参数的平均值。

表 1 泥沙浓度影响吸附等温式试验设计

Table 1. Designing parameters of sediment concentration influencing on adsorption isotherms

组 次	泥沙浓度(kg/m ³)	设计重金属离子初始浓度(PPm)	附 注
1	S=5, 10, 15, 20, 25	C ₀ =2, 3, 4, 5, 6, 7	温度21℃~22℃ pH值6~7
	S=25, 30, 35, 40, 45, 50	C ₀ =4, 6, 8, 10, 12, 14	
2	S=5, 10, 15, 20, 25	C ₀ =2, 3, 4, 5, 6, 7	温度26~27℃ pH值6~7
	S=30, 35, 40, 45	C ₀ =4, 6, 8, 10, 12, 14	
3	S=5, 10, 15, 20	C ₀ =2, 3, 4, 5, 6, 7	温度27~28℃ pH值6~7
	S=20, 25, 30, 35, 40	C ₀ =3, 5, 7, 9, 11, 13	
	S=40, 45, 50, 55	C ₀ =6, 8, 10, 12, 14, 16	

表 2 吸附等温式拟合参数和误差(第一次试验)

Table 2. Fitting parameters of adsorption isotherms and errors

泥 沙 浓 度 (kg/m ³)	兰格茂尔吸附等温式				弗林德利希吸附等温式			
	分 开 计 算		一 起 计 算		分 开 计 算		一 起 计 算	
	b	k	误差(%)	误差(%)	k ₁	n	误差(%)	误差(%)
5	0.265	0.122	0.0~0.0	-10.7~-6.1	0.235	13.041	0.0~0.0	-19.7~5.2
10	0.293	0.196	0.0~0.0	-13.1~0.9	0.229	5.470	-2.7~6.9	-18.1~9.4
15	0.314	0.222	0.0~0.0	-9.8~11.2	0.241	3.513	-6.8~7.1	-10.4~11.5
20	0.270	0.112	0.0~0.0	-5.2~24.3	0.242	3.572	-13.3~8.9	-9.8~12.6
25	0.290	0.125	-4.7~9.9	5.8~31.6	0.313	2.451	-7.9~6.2	-22.2~18.5
25	0.327	0.292	0.0~0.0	-19.5~14.3	0.226	4.450	-13.1~14.0	-15.1~15.7
30	0.343	0.295	0.0~0.0	-13.2~19.6	0.237	3.449	-11.4~12.1	-11.7~12.8
35	0.316	0.282	0.0~0.0	-12.6~6.7	0.226	3.351	12.0~10.1	-19.8~7.2
40	0.336	0.271	0.0~0.0	-9.4~13.7	0.258	2.598	-9.5~10.0	-26.4~16.3
45	0.313	0.188	0.0~0.0	-4.1~7.8	0.272	2.604	-18.5~13.6	-32.5~19.0
50	0.288	0.171	0.0~0.0	-8.3~5.8	0.266	2.527	-11.9~9.8	-36.6~9.7
平均值	0.339	0.171			0.279	3.069		

图 1, 图 2 是第三次试验, 不考虑泥沙浓度的差别, 分别用兰格茂尔和弗林德利希吸附等温式拟合的结果。

从图 1、图 2 和表 2 可见, 无论是从某一组拟合的误差还是从每次试验拟合的误差看, 除个别组外, 兰格茂尔吸附等温式拟合计算的结果均比弗林德利希的结果好, 即用兰格茂尔吸附等温式所得计算结果与试验结果更吻合。由于这两个吸附等温式都有两个参数, 因此也说明, 兰格茂尔吸附等温式比弗林德利希吸附等温式有更好的结构形式。

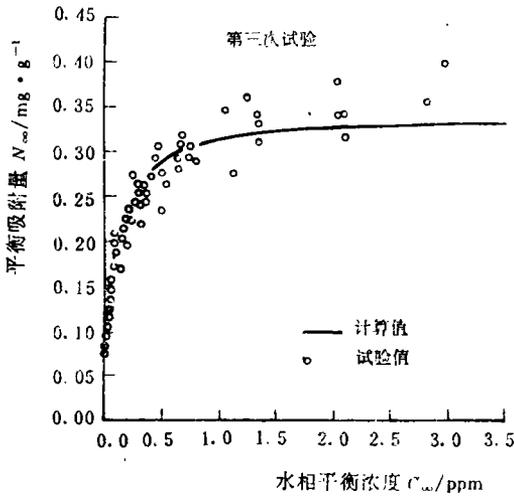


图1 兰格茂尔吸附等温线和实验值比较
Fig. 1. Comparison of Langmuir's formula and experiment

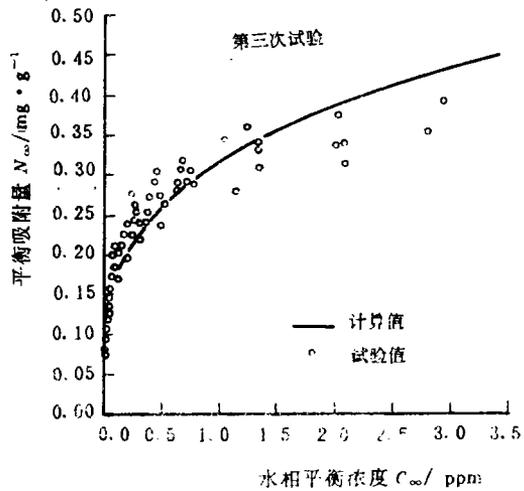


图2 弗林德利希吸附等温线和实验值比较
Fig. 2. Comparison of Freundlich's formula and experiment

各次试验, 不同泥沙浓度的吸附等温式拟合参数并不相等, 但拟合参数随泥沙浓度并不呈单向变化, 而是以某一平均值的上、下波动, 而且同一泥沙浓度, 用不同的重金属离子初始浓度进行试验, 拟合求解的参数也有差异, 与不同泥沙浓度的拟合参数的差别属同一量级。因此可认为是试验误差所致, 即从试验结果来看, 泥沙浓度不影响吸附等温式参数。实际上泥沙浓度的高低 (非高含沙) 并不影响泥沙的性质, 对水溶液的性质影响很小, 因此, 尽管泥沙浓度的变化会影响平衡吸附量和水相平衡浓度, 但若用合适的吸附等温式将两者联系起来, 如上节用兰格茂尔吸附模型方程推导的结果, 则可以消除泥沙浓度的影响。

从图中可直观地看到, 每次试验的结果用一条吸附等温线进行拟合, 即认为泥沙浓度不影响吸附等温线是可以接受的, 误差一般在±10%以内。

4.3 泥沙浓度对吸附过程的影响

目前静态试验研究泥沙对重金属污染物的吸附, 主要集中在吸附等温线上。相比之下, 对吸附动力学过程的研究无论是取得的成果, 还是试验进行的规模都显得不足。前节导得静态试验条件下, 泥沙吸附量随时间增加和水相浓度随时间减小的计算公式(18)和(19)。

由式(18) (或式(19))可见, 影响吸附量 (或水相浓度) 的因素有水相重金属离子初始浓度 C_0 , 悬浮泥沙浓度 S , 泥沙吸附特性如饱和吸附量 b 、吸附和解吸速率系数 k_1 、 k_2 及时间 t 。从该式可以明确以下几点: 由于是指悬浮泥沙浓度, 因此试验要保证泥沙能充分悬浮; 由固-液反应动力学理论可知, 吸附反应的速率主要取决于扩散速度, 因此试验要保证搅拌 (或振荡) 强度稳定, 特别是比较试验; 吸附和解吸速率系数 k_1 、 k_2 有相同的变化趋势。在上述几个因素中, 除时间外, 有两个因素即泥沙浓度和水相重金属离子初始浓度属外部因素。本文讨论水相重金属离子初始浓度和其它环境化学条件如温度、pH值等一定时, 泥沙浓度对镉重金属离子吸附过程的影响。

设计两组试验进行研究。试验用沙粒径小于0.033mm。采用电动搅拌机搅拌, 在试验过程中

保持搅拌桨位置和转动频率基本稳定不变。其它条件见表3。

表3 泥沙浓度影响吸附动力学过程试验条件

Table 3. Designing parameters of experiment of sediment concentration influencing on adsorption dynamics

第一组试验		$b=0.300\text{mg/g}$	$k=0.185\text{ppm}$
水相重金属离子初始浓度:	3ppm.	水温 $21\sim 22^\circ\text{C}$,	pH值 $6\sim 7$
悬浮泥沙浓度(kg/m^3)	1	5	10
吸附速率系数 k_1 ($1/\text{ppm}\cdot\text{s}$)	0.1988	0.0199	0.0205
第二组试验		$b=0.300\text{mg/g}$	$k=0.185\text{ppm}$
水相重金属离子初始浓度:	2ppm.	水温 $21\sim 22^\circ\text{C}$,	pH值 $6\sim 7$
悬浮泥沙浓度(kg/m^3)	1	5	10 25
吸附速率系数 k_1 ($1/\text{ppm}\cdot\text{s}$)	0.0180	0.0241	0.0259 0.0213

从公式(18)和(19)可看到,与时间 t 相乘的是 sA_2k_1 ,可见悬浮泥沙浓度对水相浓度(或吸附量)的变化有较大影响。但从已有的试验结果看,如图3、图4和表3所示,悬浮泥沙浓度对吸附速率系数 k_1 的影响很小,亦可认为悬浮泥沙浓度对吸附速率系数 k_1 (或解吸速率系数 k_2)无影响。

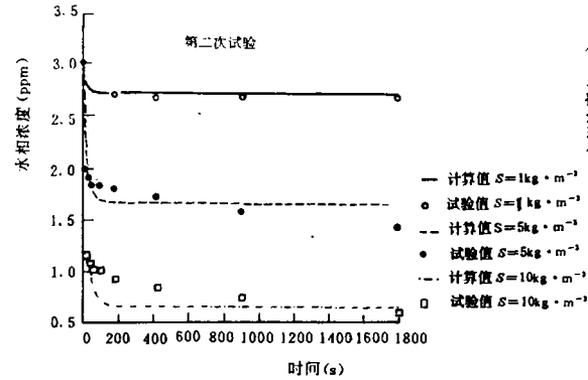


图3 不同泥沙浓度条件下水相浓度随时间的变化 ($C_0=3\text{ppm}$)

Fig. 3. Variation of concentration in water phase with time

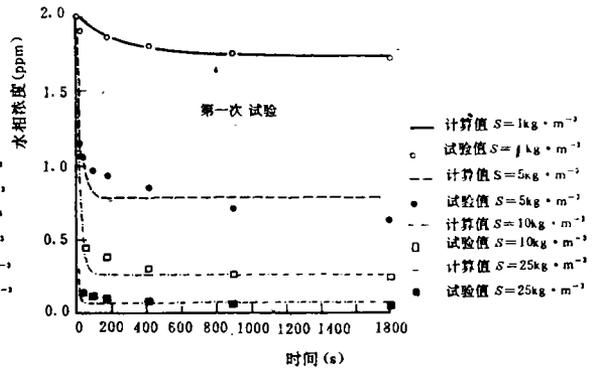


图4 不同泥沙浓度条件下水相浓度随时间的变化 ($C_0=2\text{ppm}$)

Fig. 4. Variation of concentration in water phase with time

图3和表3中的吸附速率系数 k_1 是用式(19)按最小二乘法拟合试验数据求得的。图3中计算曲线和试验数据吻合良好,说明计算公式是正确的。

5 结 论

(1)从吸附动力学方程和质量守恒方程出发,导得静态试验条件下吸附量和水相浓度随时间变化的计算公式,并进而导得泥沙平衡吸附量和水相平衡浓度的计算公式。由此展开的讨论

和试验结果吻合良好,表明导出的计算公式是正确的。这可以作为进一步广泛定量研究泥沙吸附性质的基础。

(2)理论分析和试验结果均说明,泥沙浓度对平衡吸附量和水相平衡浓度有很大影响,但吸附等温式本身不受泥沙浓度的影响,即若用合适的吸附等温式把两者联系起来,则可以消除泥沙浓度的影响。

(3)理论分析和试验结果表明,兰格茂尔吸附动力学方程中的吸附速率系数 k_1 和解吸速率系数 k_2 有相同的变化趋势,泥沙浓度不影响吸附速率系数和解吸速率系数。

参 考 文 献

- 1 傅献杉,沈文霞,姚天杨. 物理化学. 北京: 高等教育出版社, 1989, 700~987
- 2 高广生,陈静生. 我国主要河流悬浮物样品对镉离子的吸附作用. 环境化学. 1983, 2(4): 28~40
- 3 王晓蓉,章慧珠,周爱和等. 金沙江颗粒物对重金属的吸附. 环境化学. 1983, 2(1): 23~32
- 4 金相灿,王桂林. 关于重金属吸附的泥沙效应. 环境科学情报. 1986, 5(1): 6~11
- 5 汤鸿霄. 环境水质学的进展——颗粒物与表面络合. 环境科学进展. 1993, 1(1): 25~41

Studies on Heavy Metal Pollutant Adsorption by Sediment in the Laboratorial Static Experiments

Huang Suiliang, Wan Zhaohui

(*Institute of Water Consetvancy and Hydroelectric Power Research*)

Wang LanXiang

(*Institute of Chinese Environmental Scientific Research*)

Abstract: Based on adsorption dynamic equation and mass conservation equation, the variation of sediment adsorption of heavy metal ion with time and that of heavy metal ion concentration with time have been deduced. Furthermore, formulas for calculating the equilibrium sediment adsorption of heavy metal ion and the equilibrium concentration of heavy metal ion in water phase have been established too. And based on proceeding fact the following conclusion is deduced: sediment concentration does not effect sediment adsorption behaviours, namely, saturated adsorption content, coefficient of adsorption rate and coefficient of desorption rate.

Key words: sediment; adsorption; heavy metal; pollutant; static experment.