

漂白废水中有机氯在湿地土壤中的环境行为

丁成^{1,2}, 王世和¹, 杨春生²

(1. 东南大学市政工程系, 南京 210096; 2. 盐城工学院环境工程系, 盐城 224003)

摘要: 在实验室模拟条件下, 研究了漂白废水中有机氯在土壤中的吸附平衡规律和土柱中的迁移特性, 同时分析了某造纸废水长期灌溉湿地土壤的可提取有机氯分布特征。结果表明, 可吸附有机氯在土壤中的吸附规律符合 Freundlich 等温式, 且在未受灌溉土壤和已灌溉 2a 土壤中的吸附常数分别为 7.341 0 和 4.950 1, 非线性程度常数分别为 0.502 4 和 0.610 8; 经漂白废水淋溶的土柱渗滤液中有较多的可吸附有机氯(AOCl)检出, 废水中的有机氯被土壤大量的吸附, 且在表层中含量最高。经过造纸废水灌溉 1 2 和 3a 后的土壤表层可提取有机氯(EOCl)的平均含量分别为 4.48、10.35 和 10.07 $\mu\text{g/g}$, 与土壤背景值相比有明显的提高。

关键词: 漂白废水; 可吸附有机氯; 可提取有机氯; 土壤

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)07-1383-05

Environmental Behavior in Wetland Soil of Organic Chlorine from Pulp Bleaching Wastewater

DING Cheng^{1,2}, WANG Shihe¹, YANG Chunsheng²

(1. Department of Municipal Engineering of Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Department of Environment Engineering of Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224003, China)

Abstract: The adsorption equilibrium and leaching characteristics of organic chlorine on soils were studied by mean of soil column method using bleaching water in laboratory condition. Soil samples were also collected from the wetland that irrigated with pulp wastewater from one to three years, and analyzed for the distributing characteristics of organic chlorine in soils. The results showed that measured equilibrium isotherms for absorbable organic chlorine (AOCl) in the soils were of Freundlich type with the adsorption constant 7.341 0 in the soils without irrigated and 4.950 1 irrigated for 2 years. The nonlinear constants were 0.502 4 and 0.610 8, respectively. The AOCl was detected in the leachate, it was found that most of the AOCl was adsorbed by the soils, especially topsoil. The average contents of extractable organic chlorine (EOCl) were 4.48 $\mu\text{g/g}$, 10.35 $\mu\text{g/g}$ and 10.07 $\mu\text{g/g}$ in the topsoil irrigated for 1a, 2a and 3a respectively, which had increased distinctly compared with the background value.

Key words: pulp bleaching wastewater; absorbable organic chlorine(AOCl); extractable organic chlorine(EOCl); soil

随着化工、造纸、染料、农药和印染等工业的迅速发展,更多种类、数量的有机卤化物进入人类赖以生存的环境^[1~3]。这些有机卤化物由于具有致畸、致癌和致突变性以及对人类生殖性能和繁殖能力产生不良影响,严重危害人体健康,已越来越引起广泛关注^[4]。漂白废水中除了含固体粒子外,还含有大量高分子量物质组成,成分很复杂的有机氯化物,其数量多达 200 多种^[5~8]。制浆造纸企业利用芦苇湿地生态处理造纸综合废水,废水中有机氯化物在环境中的迁移行为直接关系到废水生态处理的安全。为了搞清楚造纸废水中所含的可吸附有机氯化物(absorbable organic chlorine, AOCl)在生态处理场土壤中的迁移转化规律及其对地下水是否会构成污染,本课题以漂白废水中所含的有机氯化物为研究对象,通过一定条件下废水在土壤中的静态吸附和土柱渗滤试验,探讨有机氯化物在土壤中迁移转化规律,旨在为土壤中有机卤族化合物污染防治提供

依据。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

主要仪器: ICS-90 离子色谱分析仪(美国戴安公司);管式炉(上海意丰电炉有限公司);N-3NW 型旋转蒸发浓缩仪(上海青浦仪器厂);SCQ-5-A 型超声波清洗仪(昆山市超声仪器有限公司);NeX Pure Power 1000 去离子水处理仪(韩国)。

主要试剂: 吸附用纯化活性炭;氧气,纯度 99.70%;氮气,纯度 99.99%;离子色谱淋洗使用液: Na_2CO_3 0.000 18 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 NaHCO_3 0.001 7 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$;其它试剂均为分析纯。

收稿日期: 2005-08-27; 修订日期: 2005-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(50278016), 江苏省科技厅社会发展基金项目(BS20050035)

作者简介: 丁成(1971~)男,博士研究生,主要研究方向为湿地生态与水处理技术, E-mail: ycding@163.com

1.2 废水、土壤来源及其理化性质

漂白废水采自江苏某草浆造纸企业造纸漂白工段,经测定,漂白废水的 AOC1 含量为 $74.35 \sim 156.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 含量为 $1800 \sim 2100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 悬浮物浓度为 $69 \sim 81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值为 $10 \sim 11$, 采集后加硝酸使其 pH 值小于 2, 低温保存。

实验用土壤采自该公司生态处理场的未受灌溉苇田和灌溉 2a 苇田的表层土, 生态处理场土壤为沼泽滨海盐土。未灌溉苇田土壤的有机质含量为 1.08% , pH 为 8.45 , 土壤容重为 $0.885 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。灌溉 2a 苇田土壤的有机质含量为 4.65% , pH 为 8.75 , 土壤容重为 $1.04 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.3 实验方法

1.3.1 漂白废水中有机氯在土壤中的吸附性能实验

(1) 吸附动力学实验 准确称取过 20 目筛土壤 20.0 g 置于 250 mL 锥形瓶中, 加漂白废水 75.0 mL , 加塞盖紧, 将锥形瓶放入恒温水浴振荡器中恒温 20°C 振荡, 分别于 $10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180 \text{ min}$ 取水样 1 mL , 加水稀释至 50 mL 按文献[9]方法测定其 AOC1 值。每一处理重复 3 次。由不同时段吸附前后的浓度变化计算土壤对有机氯的吸附速率。

(2) 土壤 AOC1 中的吸附等温线的测定 取 6 个 250 mL 锥形瓶, 分别加入过 20 目筛土壤 20.0 g , 其中 5 个瓶中分别加入经过稀释 $50, 20, 10, 7.5, 5$ 倍的漂白废水 75 mL , 另一个以加去离子水 75.0 mL 作对照。恒温振荡 24 h , 使吸附达到平衡, 静置 30 min , 各取上清液 10 mL 按文献[9]方法测定水中残存的 AOC1。每一处理重复 3 次。原水中的 AOC1 减去吸附后水中残存的 AOC1 的量即为土壤吸附的 AOC1 量, 即:

$$c_s = (c_0/D - c_{eq}) \times V/m \quad (1)$$

式(1)中: c_s 为土壤平衡吸附量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; c_0 为原漂白废水 AOC1 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; D 为稀释倍数, c_{eq} 为水相平衡深度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V 为加水体积, L ; m 为加入土的质量, kg 。

1.3.2 漂白废水土柱淋溶实验

取管径为 10 cm 、高 40 cm 的有机玻璃柱 2 根, 模拟现场土壤的状况, 分别在 2 根有机玻璃柱中装入土壤约 2.1 kg , 至土柱高 30 cm 处, 用清水自然连续淋洗 5 d , 流速 $20 \text{ mL} \cdot \text{h}^{-1}$ 再用 AOC1 浓度为 $74.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、COD 为 $1800 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的漂白废水连续自然淋溶, 每隔 48 h 取淋出水样测定其 COD 和可吸附

有机氯含量。淋溶 15 d 后, 拆卸土柱, 分别取表层($0 \sim 5 \text{ cm}$)、中层($12 \sim 15 \text{ cm}$)和底层土(30 cm)土样, 风干、研磨、过 20 目筛, 测定土壤中的 EOCl。结果取 2 根柱测定结果的平均值。

1.3.3 造纸废水湿地生态处理场土壤中 EOCl 的调查

分别取经过造纸废水灌溉 1.2 和 3a 的湿地表层土壤样品若干, 经风干、除杂、研磨、过 20 目筛后离子色谱法测定样品中的可提取有机氯(extractable organic chlorine, EOCl)并与未灌溉土壤的 EOCl 含量进行对比分析。

1.4 分析方法

1.4.1 水中可吸附有机氯(AOC1)的测定

水中可吸附有机氯的测定采用离子色谱法^[9]。

1.4.2 土壤中可提取有机氯(EOCl)的测定^[10]

选用 1:9 丙酮/正己烷混和溶剂作为提取剂, 称取样品 10.0 g 于超声玻璃管中, 分别对应加入 10 mL 有机提取溶剂, 加盖后于超声清洗仪中提取 2 h , 其间水温会上升, 应保持水温在 40°C 以下, 离心收集上清液, 再加 10 mL 有机提取溶剂提取 15 min , 离心浓缩, 反复操作 2 次。

调节燃烧炉外设氧气和氮气压力为 0.5 MPa ; 氧气和氮气混合流量为 $250 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 氧气流量为 $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 注射口温度为 500°C ; 氧化燃烧炉热解温度为 950°C ; 吸收液为 $0.0025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硼砂溶液, 视样品中 EOCl 的含量取样, 取样量范围为 $10 \sim 50 \mu \text{L}$, 吸收液定容后使用离子色谱测定其 Cl^- 含量。计算公式如下:

$$\text{EOCl} = X \times V_1 \times V_2 / (0.1 \times m) \quad (2)$$

式(2)中: X 为离子色谱测定 Cl^- 值, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V_1 为样品浓缩后体积, mL ; V_2 为吸收液体积, mL ; m 为土壤样品质量, kg ; 0.1 为燃烧时所抽取样品体积, mL 。

2 结果与讨论

2.1 AOC1 在土壤中的吸附动力学特征

图 1 为可吸附有机氯化物在土壤中随时间变化的吸附动态。可以看出, 加漂白废水 75 mL , 从 $0 \sim 60 \text{ min}$, 随时间延长, 土壤中 AOC1 的吸附量不断增加。在 60 min 时, 土壤中 AOC1 吸附量基本达到最大, 60 min 后, 土壤对 AOC1 的吸附量增加较小。结果表明, AOC1 在土壤中吸附速率较快, 实验浓度下, 150 min 后达到吸附平衡。根据上述土壤对 AOC1 的吸附速率大小分析, 可以将吸附过程分为 3 个阶

段: ①0~ 60min, 快速或高速吸附阶段; ②60~ 150min, 缓慢吸附阶段; ③150~ 180min, 平衡吸附阶段。

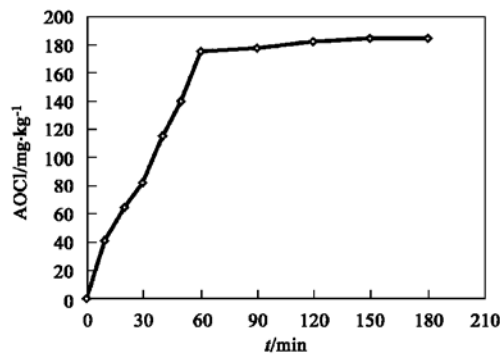


图 1 AOCl 在土壤中的吸附动力学曲线
Fig. 1 Adsorption kinetics curve of AOCl on soils

动力学是研究吸附过程中, 溶液中的吸附质到达吸附剂表面并发生吸附作用的速率问题, 吸附速率的大小对于吸附应用具有重要的现实意义. 运用 Lagergren 一级吸附动力学模型^[11]对吸附动力学进行分析:

$$\ln (c_{eq}-c_t)=\ln \left(c_{eq}\right)-k t \quad (3)$$

式(3)中 c_e 和 c_t 分别为平衡时和时间 t 时的吸附量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; k 为一级吸附速率常数.

动力学线性关系符合 $\ln \left(c_e-c_t\right)=-0.0447 t+5.641$, 曲线见图 2, 相关系数为 0.981, 接近于 1, 表明其越符合线性关系, 能够用于实际溶液中的吸附动力学行为表征.

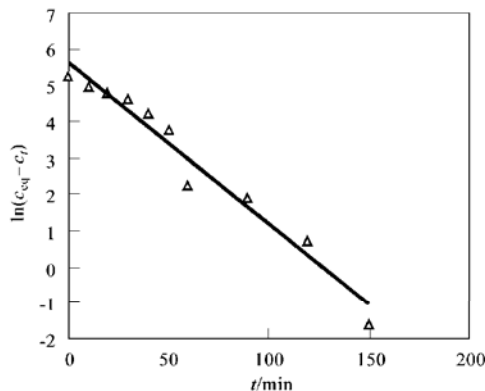


图 2 动力学模型
Fig. 2 Adsorption kinetics model

2.2 漂白废水中的 AOCl 在土壤中的吸附等温线
293K 条件下, AOCl 在土壤中的吸附等温实验结果如表 1.

表 1 AOCl 在土壤中的等温吸附实验结果
Table 1 Results of isotherm adsorption of AOCl on soils

项目		1 号	2 号	3 号	4 号	5 号
未灌溉土壤	$c_q/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.25	3.92	9.56	13.1	20.5
	$c_s/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	5.67	11.81	18.45	23.54	32.76
灌溉 2a 土壤	$c_q/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.835	3.45	8.76	12.3	19.8
	$c_s/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	6.92	13.21	20.85	25.94	34.65

描述土壤吸附过程主要有 2 类, 包括平衡吸附和动态吸附, 目前多采用平衡吸附. 平衡吸附最常采用的公式是 Freundlich 等温式, Langmuir 等温式和 BET 等温式^[12].

Freundlich 等温式一般表达式为:

$$c_s=K_d \times c_{eq}^{1/n} \quad (4)$$

式(4)中, K_d 为吸附常数, $1/n$ 表示吸附的非线性程度. 一般情况下, $1/n$ 等于或小于 1, 即通常 c_s 与 c_{eq} 呈非线性关系. 只有在水相化学物质浓度很低, $1/n$ 等于 1, 两相浓度呈线性关系.

Langmuir 等温式一般表达式为:

$$c_{eq}/c_s=1/K B+c_{eq}/B \quad (5)$$

式(5)中 B 为最大吸附量, K 为系数.

BET 等温式一般表示为:

$$c_{eq}/c_s\left(c_0-c_{eq}\right)=1/\left(X_m c_n\right)+\left(c_n-1\right) \times c_{eq} /\left(X_m c_0 c_n\right) \quad (6)$$

式(6)中 X_m 为单分子层容量, c_n 为系数.

按上述 3 种等方程和表 1 的实验结果计算出 AOCl 在土壤中的吸附常数和相关系数见表 2.

结果表明, Freundlich 等温式得到的相关系数最大, 最适合描述 AOCl 在土壤中的吸附行为. 而 Langmuir 等温式和 BET 等温式得到的相关系数均较差. 用 Langmuir 等温式描述土壤对 AOCl 的吸附存在较大误差的原因主要是土壤具有非均质表面的混合体, 表面上各个吸附位置的吸附能力不同, 以及最初的吸附总是发生在能量最有利的位置上等. BET 等温式主要描述的是多分子吸附, 所以也不适于描述 AOCl 在土壤中的吸附规律.

2.3 土柱渗滤液中的 AOCl 的浓度变化

土柱渗滤液中的 AOCl 浓度的变化如图 3 所示. 实验条件下, 渗滤液中 AOCl 的浓度变化可以分为 2 个阶段: 第 1 阶段为从开始到第 4d, AOCl 浓度增加较快; 其后为第 2 阶段, AOCl 浓度变化较为平缓. 非离子化合物在土壤中的吸附作用可描述为一个持续的相互作用过程. 初始时的吸附为固定吸附位上的主动吸附, 由于漂白废水中有机氯化物的成分较复杂, 分子摩尔质量较高, 在初始阶段吸附

表 2 不同等温式计算出的 AOCl 的吸附常数和相关系数

Table 2 Adsorption constants and correlateion coefficients by different isotherms

土壤	Freundlich 等温式			Langmuir 等温式			BET 等温式		
	K_d	$1/n$	r	$1/KB$	$1/B$	r	$1/(X_m c_n)$	$(\frac{c_n-1}{X_m c_0 c_n}) c_{eq}$	r
未灌溉土	7.341 0	0.502 4	0.998 8	0.163 0	0.022 9	0.959 6	0.058 4	- 0.000 3	0.409 5
灌溉 2a 土	4.950 1	0.610 8	0.998 0	0.248 4	0.020 9	0.947 4	0.109 3	- 0.002 6	0.908 7

较强, 吸附较充分, 渗滤液中的 AOCl 浓度较低. 经过一段时间的淋溶后, 土壤颗粒表面吸附了较多的有机氯化物, 在吸附-解吸的亚稳态中, 土壤吸附量减少, 有更多的有机氯化物随水流下渗. 另外, 在漂白废水中含有大量的木质素类有机化合物(漂白废水的 COD 为 1 800~ 2 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 在土柱中经过一段时间的吸附后, 各种有机物大量吸附在土壤表面, 也会影响到有机氯化物在土壤表面的吸附速率.

有学者^[13, 14]研究认为, 土壤对有机污染物的吸附实际上是土壤矿物组分和土壤有机质 2 部分共同作用的结果. 由于矿物表面具有极性, 在水环境中发生偶极作用, 极性水分子与矿物持表面结合, 占据矿物质表层的吸附位, 非极性的有机物较难与矿物质结合而易分配到水相中, 因此认为对吸附起主要作用的是有机质, 而不是矿物组分. 实验的结果表明, 经过造纸废水灌溉 2a 后, 土壤的有机质含量较未受灌溉的土壤要高, 其吸附有机氯的量也较高.

本实验中发现土柱渗滤液中有较高的可吸附有机氯存在, 不排除在实际的湿地生态处理工程运行过程中对地下水影响的可能, 对此需要对工程运行实践进行跟踪监测分析.

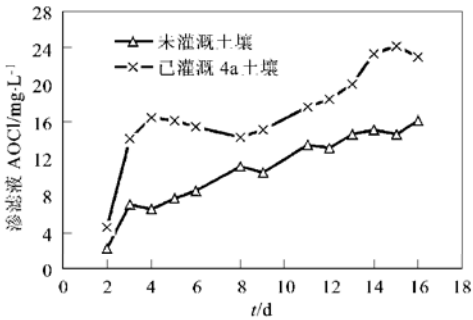


图 3 渗滤液中 AOCl 浓度变化
Fig. 3 Concentration of AOCl in leachate

2.4 AOCl 在土柱中的纵向迁移特征

图 4 给出了淋溶试验 15d 后, 土柱中不同深度的土壤中可提取有机氯 (EOCl) 含量的分布. 与土壤

的背景值相比, 用漂白废水淋溶 15d 后, 土柱各层土壤中的可提取有机氯含量都有所提高. 其中 0~ 5cm 表层土壤中 EOCl 含量最高, 中层较少, 下层最低. 这表明漂白废水中能够被土壤吸附的有机氯成分将主要集中在土壤表层, 并会在土壤中形成累积. 这与文献[15, 16]报道的持久性有机氯污染物在土壤中的垂直分布特征一致. 对于大多数有机氯污染物来说, 由于本身极低的水溶性和土壤对其具有强烈的吸附作用使淋溶作用很弱^[17]. 在实际的造纸废水人工湿地处理过程中, 应对有机氯在土壤中的积累引起重视. 当然在湿地生态处理系统中, 会有一部分有机氯在化学与生物作用下降解, 以及芦苇在生长的过程中也会吸收一部分有机氯, 对此还有待进一步深入研究.

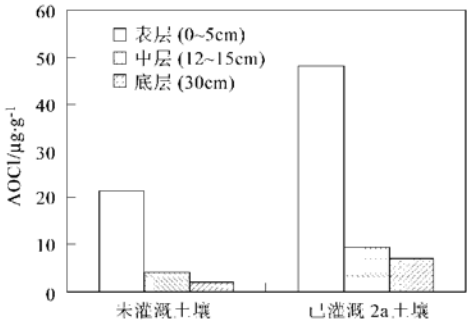


图 4 土柱中各层可提取有机氯含量
Fig. 4 Content of EOCl in the soil column

2.5 对生态场土壤中可提取有机氯 (EOCl) 的调查

表 3 为对造纸废水芦苇湿地生态处理场表层土壤进行取样的分析结果. 共计检测样品 29 个. 其中未灌溉滩涂土壤 10 个, 灌溉 1a 的土壤 7 个, 灌溉 2a 的土壤 6 个, 灌溉 3a 的土壤 6 个. 调查结果显示, 在 10 个未经废水灌溉的土壤中, 检出 EOCl 的样品有 6 个, 检出率为 60%, 平均值为 $1.56 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 经废水灌溉 1a 的 7 个土壤样品中, 有 6 个样品检出了 EOCl, 检出率 85.6%, 平均值为 $4.48 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 经废水灌溉 2a 和 3a 的各 6 个土壤样品中, EOCl 的检出率均为 100%, 平均值分别为 $10.35 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 10.07

$\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. 灌溉 1a、2a 和 3a 的芦苇湿地表层土壤中, EOC1 值较背景值分别增加了 2.87 倍、6.63 倍和 6.45 倍.

表 3 人工湿地土壤中的可提取有机氯含量调查结果(表层土壤)

Table 3 Survey of EOC1 in constructed wetland soils (topsoil)

项目	样品数 量/个	检出率 /%	平均值 / $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	比背景值 增加倍数
未灌溉滩涂土壤(背景)	10	60	1.56	
灌溉 1a	7	85.7	4.48	2.87
灌溉 2a	6	100	10.35	6.63
灌溉 3a	6	100	10.07	6.45

以上监测结果表明, 利用含有机氯的造纸废水灌溉芦苇湿地, 湿地土壤中的可提取有机氯含量有明显增加的趋势, 这与上述实验的结果较为一致, 但对其在湿地中的污染生态效应还有待深入研究.

3 结论

(1) 以实验室模拟方式研究漂白废水有机氯在土壤中的环境行为, 可吸附有机氯在土壤中的平衡时间为 120min, 土壤中的吸附规律符合 Freundlich 等温式, 且在未受灌溉土壤和已灌溉 2a 土壤中的吸附常数 K_d 分别为 7.341 0 和 4.950 1, 非线性程度常数 $1/n$ 分别为 0.502 4 和 0.610 8, 这主要受土壤中的有机质含量影响.

(2) 土柱实验结果显示, 漂白废水淋溶 15d 的土柱渗滤液中有较高浓度的可吸附有机氯检出; 土壤吸附了废水中大量的有机氯, 且在表层土中含量最高. 对生态场 29 个经过不同灌溉期的土壤样品的分析表明, 经造纸废水灌溉 1、2 和 3a 后的表层土壤 EOX 的平均含量分别为 4.48、10.35 和 10.07 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 灌溉区土壤中有机氯含量较未灌溉区有明显的增加. 结果表明, 用造纸废水灌溉湿地土壤, 可能会对地下水和湿地土壤造成污染, 但是对有机氯在湿地生态系统中的生态危害性还有待进一步深入分析研究.

参考文献:

- [1] 杨清书, 麦碧娴, 傅家谟, 等. 江干流河口水体有机氯农药的时空分布特征[J]. 环境科学, 2004, 25(2): 150~156.
- [2] 闫百兴, 汤洁, 何岩. 松嫩平原西部农田径流中有机氯农药的分布特征[J]. 环境科学, 2003, 24(2): 82~86.
- [3] 袁旭音, 王禹, 陈骏, 等. 太湖沉积物中有机氯农药的残留特征及风险评估[J]. 环境科学, 2003, 24(1): 121~125.
- [4] 张鸿, 孙慧斌, 柴之芳. 生态环境中有机卤素污染物的危害性及其分析[J]. 天津轻工业学院学报, 2003, 18(1): 5~6.
- [5] 杨春, 姚渭溪. 造纸漂白废水中多氯联苯的测定[J]. 环境科学, 1999, 15(6): 63~67.
- [6] Welker A, Schmitt T G. A basic investigation in origins of AOX-substances in paper sludge[J]. Wat. Res., 1997, 31(4): 805~815.
- [7] Vahala R, Langvik V A, Laukkanen R. Controlling absorbable organic halogens (AOX) and trihalomethanes (THM) formation by ozonation and two-step granule activated carbon (GAC) filtration[J]. Wat. Sci. Tech., 1999, 40(9): 249~256.
- [8] 疏明君, 李友明, 谢澄, 等. 浅谈造纸废水中 AOX 的去除方法[J]. 西南造纸, 2001, 5: 32~34.
- [9] HJ/T 83-2001 水质可吸附有机卤素(AOX)的测定 离子色谱法[S].
- [10] 任丽萍, 周启星, 宋玉芳, 等. 污染土壤和底泥中可提取态有机卤化物的分析方法研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(6): 701~702.
- [11] 杨宏伟, 郭博书, 嘎尔迪. 除草剂草甘膦在土壤中的吸附行为[J]. 环境科学, 2004, 25(5): 158~162.
- [12] 许保玖, 龙腾锐. 当代给水与废水处理原理[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2000. 126~128.
- [13] Chiou C T, Porter P E, Schmedding D W, et al. Partition equilibrium of nonionic organic compounds between soil organic matter and water[J]. Environ. Sci. Technol., 1983, 17(5): 227~231.
- [14] 胡焱, 胡永梅, 樊耀波, 等. 土壤中氯苯类化合物的迁移行为[J]. 环境科学, 2000, 21(6): 32~36.
- [15] 康跃惠, 盛国英, 傅家谟, 等. 珠江澳门河口沉积物柱样中有机氯农药的垂直分布特征[J]. 环境科学, 2001, 22(1): 81~85.
- [16] 黄圣彪, 王子健, 康跃惠, 等. 官厅水库沉积物柱状样中有机氯农药的垂直分布特征[J]. 环境科学研究, 2004, 17(6): 19~21.
- [17] 邢维芹, 骆永明, 李立平, 等. 持久性有机污染物的根际修复及其研究方法[J]. 土壤, 2004, 36(3): 258~263.