

生物污泥对染料的吸附及胞外聚合物的作用

孔旺盛, 刘燕*

(复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

摘要: 对比研究了 4 种生物污泥(包括活性污泥、厌氧污泥、干活性污泥、干厌氧污泥)对染料酸性湖蓝 A 的吸附, 并考察了胞外聚合物(EPS)以及外层溶解性胞外聚合物(SEPS)和内层固着性胞外聚合物(BEPS)在此过程中所起的作用. 结果表明, 4 种污泥吸附量与染料平衡浓度之间均既符合 Freundlich 模型(R^2 为 0.921 ~ 0.995), 又符合 Langmuir 模型(R^2 为 0.958 ~ 0.993), 但不符合 BET 模型(R^2 为 0.07 ~ 0.863). 干厌氧污泥对染料酸性湖蓝 A 的吸附性能最好, 干活性污泥的吸附性能最差. 从 Langmuir 等温方程来看, 干厌氧污泥的最大吸附量最高, 为 104 mg/g, 其次为厌氧污泥的吸附(86 mg/g)、活性污泥(65 mg/g), 干活性污泥的最大吸附量最低, 仅为 20 mg/g. EPS 的吸附量占整个活性污泥和厌氧污泥的吸附量的比例均大于 50%, 活性污泥和厌氧污泥对染料酸性湖蓝 A 的吸附主要是 EPS 的吸附所贡献. 厌氧污泥吸附染料酸性湖蓝 A 时, BEPS 起主要作用; 而活性污泥吸附时, SEPS 起主要作用. 对 2 种污泥而言, SEPS 的单位质量吸附量均远大于 BEPS 的单位质量吸附量, 活性污泥平均为 52 倍, 厌氧污泥为 10 倍. 厌氧污泥 BEPS 的吸附用 Langmuir 模型拟合, 效果最好(R^2 为 0.998 6).

关键词: 吸附; 污泥; 胞外聚合物(EPS); 染料; 外层溶解性胞外聚合物(SEPS); 内层固着性胞外聚合物(BEPS)

中图分类号: X788 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)12-2716-06

Adsorption of a Dye by Sludges and the Roles of Extracellular Polymeric Substances

KONG Wang-sheng, LIU Yan

(Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: This paper investigated the adsorption of a dye, acid turquoise blue A, by four kinds of sludges including activated sludge, anaerobic sludge, dried activated sludge, and dried anaerobic sludge, respectively. The roles of extracellular polymeric substances (EPS) including the soluble EPS (SEPS) and bound EPS (BEPS) for the biosorption of activated sludge and anaerobic sludge were further studied. Results show that the relation between four kinds of sludge adsorption amount and remained concentration of the dye fitted well both Freundlich model (R^2 : 0.921 ~ 0.995) and Langmuir model (R^2 : 0.958 ~ 0.993), but not quite fitted BET model (R^2 : 0.07 ~ 0.863). The adsorption capability of dried anaerobic sludge ranked the highest, and dried activated sludge was the lowest. According to Langmuir isotherm, the maximum adsorption amount of dried anaerobic, anaerobic, activated, and dried activated sludge was 104 mg/g, 86 mg/g, 65 mg/g, 20 mg/g, respectively. The amount of the dye found in EPS for both activated sludge and anaerobic sludge were over 50%, illustrating that EPS adsorption was predominant in adsorption of the dye by sludge. The amount of adsorbed dye by BEPS was greater than that by SEPS for anaerobic sludge, but for activated sludge the result was quite opposite. The amount of adsorbed dye by unit mass SEPS was much higher than the corresponding values of BEPS for both sludges. The average amount of adsorbed dye by unit mass SEPS was 52 times of the corresponding value of BEPS for activated sludge, and 10 times for anaerobic sludge. The relation between adsorption amount of dye by BEPS from anaerobic sludge and remained concentration of the dye in mixed liquor was best fitted to Langmuir model (R^2 : 0.998 6).

Key words: adsorption; sludge; extracellular polymeric substances (EPS); dye; soluble EPS (SEPS); bound EPS (BEPS)

近年来纺织染料行业快速发展, 共有超过 10 万种染料在工业上应用, 其每年产生的废水约有 70 亿 t, 约占全国工业污水排放量的 18%^[1]. 染料工业废水因为高 COD、BOD、SS 和有毒物质已经成为近年来废水处理的难点和热点. 目前, 对部分难生物降解的染料废水的主要处理方法^[2]有: ①物理法: 吸附法、膜分离、萃取法; ②化学法: 混凝法、Fenton 试剂氧化法、光催化氧化法、电化学氧化法、臭氧氧化法、超声波降解. 这些方法在处理过程中各有优缺点, 各研究者也在不断寻找费用更低, 处理能力更强的方法. 生物污泥具有巨大的表面积和吸附位点, 对染料去除率高, 且来源广, 成本低. 同时进入废水生物处

理反应器的染料污染物如果浓度较低, 经常能从水中得到有效地去除, 但它们也许不是被生物污泥所降解, 只是被生物污泥所吸附.

一般认为生物吸附是生物污泥中微生物细胞(活的或死的)的表面物质, 如细胞膜和细胞膜外的胞外聚合物等与水中污染物通过分子力、静电力、离子交换、络合、螯合、微沉淀等物理、化学过程将污染

收稿日期: 2006-12-15; 修订日期: 2007-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(20377010); 同济大学污染控制与资源化国家重点实验室开放课题项目(PCRRP06003)

作者简介: 孔旺盛(1982 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: 042047022@fudan.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: liuyan@fudan.edu.cn

物累积或浓集在微生物细胞表面的现象^[3].而细胞膜主要成分为多糖、蛋白质、脂类等,它们以及细胞膜表面的胞外聚合物含有很多官能团,如:羧基、羟基、硫酸基、磷酸基、氨基等,可以为吸附提供吸附位点^[4].生物污泥主要是活性污泥、厌氧污泥、干活性污泥、干厌氧污泥等,它们的特征不同,对同一种染料的吸附效果也不同.目前国内外学者通常考察其中 1 种或 2 种污泥对某种染料废水的吸附,但同时比较 4 种污泥对某种染料废水的吸附作用研究尚鲜见报道.

胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)是微生物细胞外的高分子聚合物,它主要包括多糖、蛋白质等,它的存在对生物污泥特别是活性污泥和厌氧污泥对污染物的吸附去除有重要作用. EPS 在细胞表面主要有以下作用:吸附外界有机物和无机离子,保护细胞,形成污泥凝体等.根据胞外聚合物在细胞外分布位置的不同,可将 EPS 分为 2 个层面:外层溶解性胞外聚合物(SEPS),内层固着性胞外聚合物(BEPS)^[5].目前,有研究者进行了 EPS 对金属离子的吸附研究. Liu 等发现从活性污泥中提取出来的 EPS 对重金属 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cd^{2+} 、 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 和 CrO_4^{2-} 等都能进行有效的吸附去除^[6]. Comte 等将 SEPS 和 BEPS 分别提取出来,然后对金属 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ni^{2+} 吸附,发现单位质量的 SEPS 对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附能力要大于 BEPS^[7].而生物污泥吸附染料过程中 EPS 所起的作用,特别是其中 SEPS 和 BEPS 所起的作用鲜见报道.

酸性湖蓝 A 属于酸性染料,广泛应用于羊毛、丝绸和锦纶织物的染色,易溶于水,呈蓝色.在浓硫酸中呈棕黄色;在浓硝酸中呈暗黄色;在氢氧化钠溶液中呈蓝色,沸腾时呈紫色.与重铬酸钾不反应,属难降解类有机物.可以忽略生物污泥对酸性湖蓝 A 的降解能力.因此,本实验选用酸性湖蓝 A 作为被吸附染料.

本实验对比研究了活性污泥、干活性污泥、厌氧污泥、干厌氧污泥对染料酸性湖蓝 A 的吸附,并对生物吸附过程中 EPS 以及 SEPS 和 BEPS 的吸附进行研究,以期进一步揭示生物污泥中 EPS 对吸附的贡献以及 SEPS 和 BEPS 在吸附过程中所起的作用,为实际生物吸附提供理论依据.

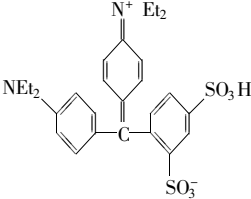
1 材料与方法

1.1 试验材料

活性污泥取自上海曲阳污水处理厂,污泥浓度为

3.2 g/L.厌氧污泥取自上海竹园污水处理厂国家“863”中试基地膨胀厌氧颗粒化污泥床反应器,污泥浓度为 45.2 g/L.取得的活性污泥和厌氧污泥分别经过 110℃ 烘干后,碾碎,过筛,即为干活性污泥和干厌氧污泥.酸性湖蓝 A(商业品)分子结构列于表 1 中.

表 1 染料酸性湖蓝 A 的特性
Table 1 Characteristics of acid turquoise blue A

分子结构	最大吸收波长/nm
	548

1.2 试验方法

在室温 $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 条件下,向 6 只装有某一种污泥的锥形瓶中按一定浓度梯度准确加入染料酸性湖蓝 A,加蒸馏水补至 200 mL,使最终污泥浓度为 1.74 g/L,锥形瓶中染料酸性湖蓝 A 初始浓度依次为 63、126、189、252 mg/L.然后放在恒温振荡器上振荡,振荡速度为 120 r/min.分别在 5、10、30、60、90、120 min 时取 5 mL 样品于离心管中,4 000 r/min,离心 5 min,取上清液稀释测定剩余染料酸性湖蓝 A 浓度.

活性污泥和厌氧污泥取得后,部分进行 EPS 提取和组分测定,部分进行吸附试验.吸附平衡后测定 SEPS 和 BEPS 中吸附的染料酸性湖蓝 A 的量.

1.3 测定与分析

染料酸性湖蓝 A 的测定采用分光光度法(731 分光光度计).

SEPS 采用高速离心法^[5].取 5 mL 污泥于 7 mL 离心管中,低速 4 000 r/min 离心 5 min,弃去上清液,加蒸馏水补齐 5 mL,再 12 000 r/min 高速离心 20 min,上清液用 0.22 μm 滤膜过滤,滤液即为 SEPS.吸附染料酸性湖蓝 A 后的污泥经上述步骤离心后,上清液中染料酸性湖蓝 A 的浓度即为 SEPS 吸附的染料酸性湖蓝 A 的量.

BEPS 的提取采用加热高速离心法^[6,8,9].污泥经过上述高速离心取出上清液后,再加蒸馏水使离心管中混合液至 5 mL,然后在 80℃ 水浴中加热 30 min,取出再 12 000 r/min 高速离心 20 min,上清液用 0.22 μm 微滤膜过滤,滤液即为 BEPS.而加热高速离心后的上清液中染料酸性湖蓝 A 的浓度即为 BEPS 吸附的染料酸性湖蓝 A 的量.

SEPS 和 BEPS 的量相加即为 EPS.

EPS 的组分主要包括多糖、蛋白质、腐殖酸、DNA 等^[10],多糖采用蒽酮比色法^[11],用葡萄糖作为标准;蛋白质和腐殖酸采用改进 Lowry 法^[12],用牛血清蛋白作为标准;DNA 测定采用二苯胺法^[13],用脱氧核糖核酸作为标准.

2 结果与讨论

2.1 吸附等温线

吸附等温方程表示吸附量 q (mg/g, 以干污泥计)与平衡时溶液中被吸附物浓度 c_e (mg/L) 的关系.常用的吸附等温式有: Freundlich 等温式、Langmuir 等温式、BET 等温式. Freundlich 等温式是经验公式; Langmuir 等温式是理论研究模型,适用于单分子层吸附; BET 等温式是适用于多分子层吸附的理论模型(表 2).

活性污泥在 60 min 对染料酸性湖蓝 A 即达吸

附平衡,对厌氧污泥、干活性污泥和干厌氧污泥吸附都在 90 min 达吸附平衡,因此,取 90 min 时的吸附量为吸附平衡量.对活性污泥、厌氧污泥、干活性污泥和干厌氧污泥吸附不同浓度染料酸性湖蓝 A 的平衡吸附量与平衡浓度分别用 Freundlich 模型、Langmuir 模型,结果见表 3 和图 1.由图 1 可看出,干活性污泥的吸附性能最差,其余 3 种污泥的吸附能力接近.就这 3 种污泥而言,干厌氧污泥的吸附性能略高于活性污泥和厌氧污泥,活性污泥和厌氧污泥的吸附能力相当.如在平衡浓度为 60 mg/L 时,干厌氧污泥、活性污泥、厌氧污泥的染料吸附量分别为 30、25、26 mg/g,是干活性污泥吸附量(5 mg/g)的 6.1、5.2、5.4 倍;而当平衡浓度为 148 mg/L 时,干厌氧污泥、活性污泥、厌氧污泥的染料吸附量分别为 52、38、34 mg/g,是干活性污泥吸附量(8 mg/g)的 6.2、4.5、4.0 倍.

表 2 吸附模型

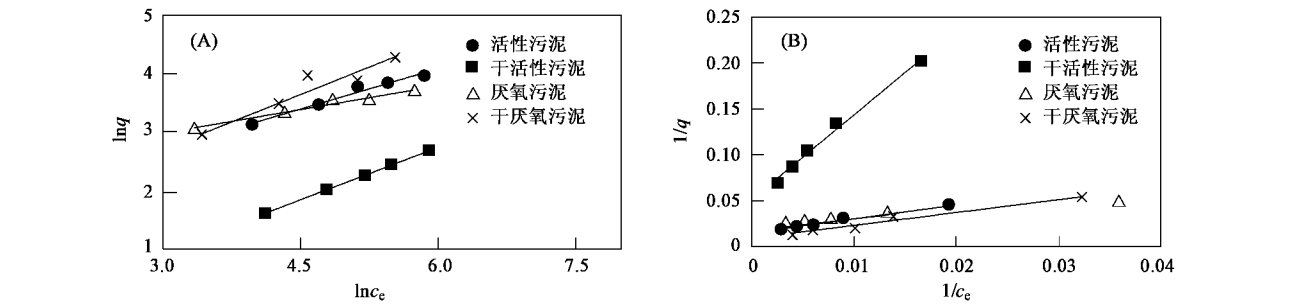
Table 2 Isotherm models of adsorption		
模型	公式	参数意义
Freundlich	$q = K_f c_e^{\frac{1}{n}}$	K_f, n 分别为与吸附容量和强度相关的常数
Langmuir	$q = \frac{Q_0 b c_e}{1 + b c_e}$	Q_0, b 分别为与最大吸附量和吸附能量有关的常数; Q_0 , mg/g; b , L/mg
BET	$q = \frac{B q_0 c_e}{(c_a - c_e)[1 + (B - 1)(c_e/c_a)]}$	q_0 饱和吸附量, mg/g; c_a, c_e 分别为饱和浓度和平衡浓度, mg/L; B , 常数

表 3 4 种污泥吸附染料酸性湖蓝 A 的 Freundlich 和 Langmuir 等温式拟合结果(温度: 25℃ ± 2℃)
Table 3 Isotherm parameters of Freundlich and Langmuir model for biosorption of Acid Turquoise Blue A by four kinds of sludges (Temperature: 25℃ ± 2℃)

污泥种类	Freundlich 等温式			Langmuir 等温式		
	K_f	$1/n$	R^2	$Q_0/\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	$b \times 10^2/\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$	R^2
活性污泥	4.2	0.44	0.939	65	1.05	0.958
厌氧污泥	16.5	0.28	0.960	86	3.20	0.993
干活性污泥	0.4	0.61	0.995	20	0.54	0.977
干厌氧污泥	2.2	0.63	0.921	105	0.69	0.962

4 种生物污泥的吸附关系既符合 Freundlich 模型(R^2 为 0.921 ~ 0.995),又符合 Langmuir 等温式(R^2 为 0.958 ~ 0.993).但用 BET 模型进行拟合,结

果较差(R^2 为 0.07 ~ 0.863),说明 4 种生物污泥对染料酸性湖蓝 A 的吸附是单分子层吸附,而不是多分子层吸附.



(A) Freundlich 等温线拟合结果, (B) Langmuir 等温线拟合结果(温度: 25℃ ± 2℃)

图 1 4 种生物污泥吸附染料酸性湖蓝 A

Fig. 1 Biosorption results of acid turquoise blue A by four kinds of sludges

Freundlich 模型是经验模型,4 种污泥的 $1/n$ 在 0.28 ~ 0.63 之间.活性污泥和厌氧污泥的 K_f 值分别大于对应的干活性污泥和干厌氧污泥的吸附 K_f 值.厌氧污泥的 K_f 值最大,可达 16.5,干活性污泥的 K_f 值最小,只有 0.4.

从 Langmuir 等温式来看,干厌氧污泥的最大吸附量较高,为 104 mg/g,其次为厌氧污泥的吸附(86 mg/g)、活性污泥(65 mg/g),干活性污泥的最大吸附量最低,仅为 20 mg/g.

2.2 EPS 组分

本实验所提取的活性污泥和厌氧污泥 EPS 组成和含量如表 4 所示.活性污泥 EPS 和厌氧污泥 EPS 中,DNA 含量均较低,活性污泥 EPS 的 DNA 占 EPS 总量的 7.5%,而厌氧污泥 EPS 的 DNA 只占 0.4%,说明厌氧污泥在提取过程中细胞破坏较少.厌氧污泥 EPS 总量为 137 mg/g(以 VSS 计),大于活性污泥 EPS 含量 102 mg/g.活性污泥和厌氧污泥组分中,蛋白质含量都为最高,其次为多糖和腐殖酸,这也是多数人研究的结果.Liu 等对 75 个已发表的废水处理中污泥 EPS 的组分含量进行统计,发现有 92% 的结果表明蛋白质含量高于多糖和腐殖酸含量^[14].

2 种污泥的 BEPS 含量都远大于 SEPS 含量,活性污泥 BEPS 量是 SEPS 量的 35 倍,厌氧污泥的

BEPS 量是 SEPS 的 29 倍.活性污泥的 SEPS 和 BEPS 都要比厌氧污泥的低.

表 4 活性污泥和厌氧污泥 EPS 组分/mg·g⁻¹
Table 4 Composition of EPS from activated sludge and anaerobic sludge/mg·g⁻¹

组分	活性污泥			厌氧污泥		
	SEPS	BEPS	EPS	SEPS	BEPS	EPS
多糖	1.25	8.45	9.69	0.72	6.80	7.52
蛋白质	0.76	75.98	76.74	ND	117.55	117.55
腐殖酸	ND	8.32	8.32	3.28	7.64	10.92
DNA	0.84	6.85	7.69	0.55	ND	0.55
总量	2.84	99.60	102	4.55	131.99	137

2.3 SEPS 和 BEPS 的吸附

活性污泥和厌氧污泥单位重量含 SEPS 和 BEPS 的量相差几十倍,其对染料酸性湖蓝 A 的吸附可划分为相对吸附量和绝对吸附量.SEPS 和 BEPS 的相对吸附量是指 SEPS 和 BEPS 各自吸附的染料酸性湖蓝 A 的量占污泥吸附的染料酸性湖蓝 A 的量的比例;绝对吸附量指单位质量 EPS 所吸附的染料酸性湖蓝 A 的量.表 5 是活性污泥和厌氧污泥吸附染料酸性湖蓝 A 时,其 SEPS、BEPS 和 EPS 的相对吸附量和绝对吸附量的结果.

表 5 活性污泥和厌氧污泥吸附染料酸性湖蓝 A 的 SEPS、BEPS 和 EPS 吸附量
Table 5 Adsorption amount of SEPS, BEPS and EPS for acid turquoise blue A

初始浓度 /mg·L ⁻¹	活性污泥						厌氧污泥					
	相对吸附量/%			绝对吸附量/mg·g ⁻¹			相对吸附量/%			绝对吸附量/mg·g ⁻¹		
	SEPS	BEPS	EPS	SEPS	BEPS	EPS	SEPS	BEPS	EPS	SEPS	BEPS	EPS
63	25	28	53	730	23	43	18	35	54	1 493	98	193
126	38	31	69	1 483	34	74	22	52	74	2 518	210	383
189	49	30	79	2 783	49	125	19	62	81	2 638	296	499
252	56	26	81	3 289	44	133	18	82	99.6	2 498	401	628

从相对吸附量来讲(表 5),活性污泥对染料酸性湖蓝 A 的吸附中,EPS(包括 SEPS 和 BEPS 之和)相对吸附量均大于 50%,且随着染料酸性湖蓝 A 初始浓度的增加而增加,最高可达 81%.同样,厌氧污泥的吸附中,EPS 相对吸附量均大于 50%,随初始浓度增加而增加,最高为 99.6%.这表明,活性污泥和厌氧污泥对染料酸性湖蓝 A 的吸附主要是由 EPS 的吸附引起的.EPS 处于细胞外部,染料需首先被 EPS 吸附后才能进入细胞内部,因此,EPS 是生物污泥吸附的主体.由表 5 还可看出,厌氧污泥的 EPS 相对吸附量大于活性污泥的 EPS 相对吸附量.说明相对于活性污泥,厌氧污泥吸附酸性湖蓝 A 时,EPS 所

起作用尤为突出.

活性污泥对染料酸性湖蓝 A 的吸附中,除初始浓度为 63 mg/L 时,SEPS 的相对吸附量小于 BEPS 相对吸附量外,其余初始浓度下,SEPS 的相对吸附量均大于 BEPS 的相对吸附量,SEPS 的最大相对吸附量为 56%.而厌氧污泥的吸附中,SEPS 的相对吸附量都小于 BEPS 的相对吸附量,BEPS 的最大相对吸附量可达 82%.这可能是因为活性污泥的 SEPS 较厌氧污泥松散,EPS 吸附的染料酸性湖蓝 A 在 SEPS 和 BEPS 分配时,SEPS 层面分配较多.而厌氧污泥 SEPS 松散度较差,且 BEPS 含量较多,是活性污泥 BEPS 的 1.3 倍,因此,EPS 吸附的染料在 BEPS 分配

的多.这同时表明,在活性污泥吸附染料酸性湖蓝 A 时,SEPS 在吸附中起主要作用,而厌氧污泥吸附酸性湖蓝 A 时,BEPS 起主要作用.

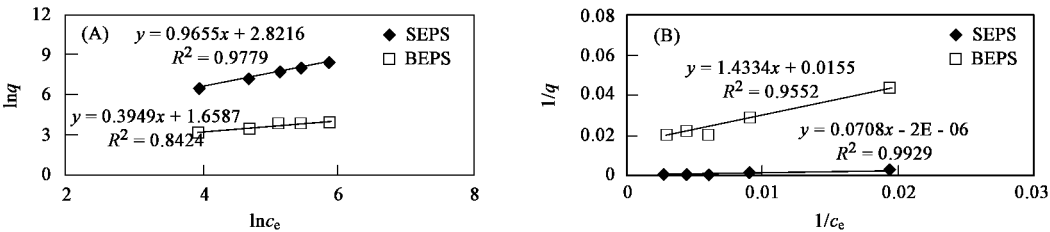
而对于绝对吸附量,从表 5 中可看出,2 种污泥的吸附中 SEPS 的吸附量均远大于 BEPS 的吸附量,活性污泥平均为 52 倍,厌氧污泥为 10 倍.当初始染料浓度为 252 mg/L 时,活性污泥 SEPS 吸附染料酸性湖蓝 A 的量最多,高达3 289 mg/g SEPS.这可能是因为在 EPS 组成结构上,BEPS 是处于内层,紧密包围在细胞周围的 EPS,而 SEPS 则松散在 BEPS 的外面,体积大,具有巨大的比表面积,可以与较多的染料分子相结合.另一方面,活性污泥中,SEPS 和 BEPS 含量(以 VSS 计)分别为 2.86、99.6 mg/g;厌氧污泥中,SEPS 和 BEPS 含量分别为 4.55、131.99 mg/g.SEPS 含量远小于 BEPS 的含量,且 SEPS 所吸

附染料酸性湖蓝 A 的量与 BEPS 所吸附的量差别相对于组分含量较小,因此 SEPS 表现出很大的绝对吸附量.Comte 等^[7]也发现 SEPS 对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Ni^{2+} 的吸附能力要大于 BEPS,与本实验结果类似.

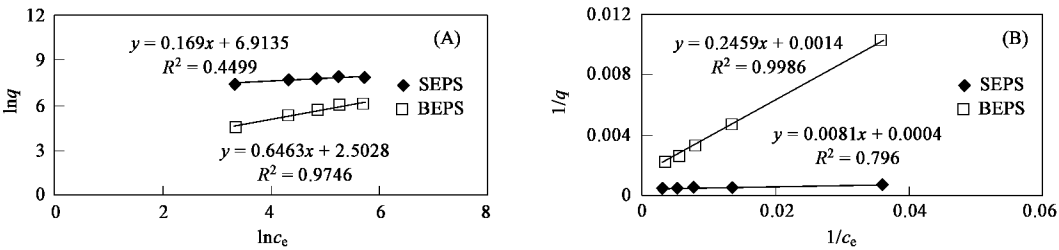
2.4 SEPS 和 BEPS 吸附染料酸性湖蓝 A 的吸附等温线

将吸附平衡时 SEPS 和 BEPS 的绝对吸附染料量与平衡时溶液中的染料浓度关系分别用 Freundlich 模型和 Langmuir 模型进行拟合,结果见图 2 和图 3.

活性污泥中,BEPS 对染料酸性湖蓝 A 的吸附符合 Langmuir 模型(R^2 为 0.955 2),而 SEPS 对染料酸性湖蓝的吸附 Freundlich 模型(R^2 为 0.977 9)和 Langmuir 模型都适用(R^2 为 0.992 9),更适用于 Langmuir 模型.



(A) Freundlich 等温式拟合结果, (B) Langmuir 等温式拟合结果(温度: 25℃ ± 2℃)
图 2 活性污泥 SEPS 和 BEPS 吸附染料酸性湖蓝 A
Fig.2 Biosorption results of acid turquoise blue A by SEPS and BEPS of activated sludge



(A) Freundlich 等温线拟合结果, (B) Langmuir 等温线拟合结果(温度: 25℃ ± 2℃)
图 3 厌氧污泥 SEPS 和 BEPS 吸附染料酸性湖蓝 A
Fig.3 Biosorption results of acid turquoise blue A by SEPS and BEPS of anaerobic sludge

厌氧污泥中,BEPS 对染料酸性湖蓝 A 的吸附符合 Langmuir 模型(R^2 为 0.998 6)和 Freundlich 模型(R^2 为 0.974 6),更适用于 Langmuir 模型.而 SEPS 用 Freundlich 模型和 Langmuir 模型拟合都较差, R^2 分别为 0.449 9 和 0.796.

活性污泥和厌氧污泥中的 SEPS 和 BEPS 对染料酸性湖蓝 A 的吸附用 BET 模型拟合,结果均较差(R^2 为 0.202 ~ 0.727).

厌氧污泥 BEPS 的吸附用 Langmuir 拟合,效果最好(R^2 为 0.998 6),其次为活性污泥 SEPS(R^2 为 0.992 9),表明此实验条件下,染料酸性湖蓝 A 呈单分子层在活性污泥 SEPS 和厌氧污泥 BEPS 上发生吸附.

3 结论

(1) 活性污泥、厌氧污泥、干活性污泥和干厌氧

污泥对染料酸性湖蓝 A 的吸附既符合 Freundlich 模型,又符合 Langmuir 等温式,基本都不适用 BET 等温式.干厌氧污泥对染料酸性湖蓝 A 的吸附性能最好,干活性污泥的吸附性能最差,活性污泥和厌氧污泥的吸附能力相当.从 Langmuir 等温式来看,干厌氧污泥的最大吸附量最高,为 104 mg/g,其次为厌氧污泥的吸附(86 mg/g)、活性污泥(65 mg/g),干活性污泥的最大吸附量最低,仅为 20 mg/g.

(2) 活性污泥和厌氧污泥的 BEPS 含量都远大于 SEPS 含量,活性污泥 BEPS 量是 SEPS 量的 35 倍,厌氧污泥的 BEPS 量是 SEPS 的 29 倍.活性污泥的 SEPS 和 BEPS 都要比厌氧污泥的低.活性污泥和厌氧污泥 EPS 组分中,蛋白质含量最多,其次为多糖和腐殖酸.

(3) EPS 的吸附量占整个活性污泥和厌氧污泥的吸附量的比例均大于 50%,活性污泥和厌氧污泥对染料酸性湖蓝 A 的吸附主要是 EPS 的吸附所贡献.活性污泥吸附染料酸性湖蓝 A 时,SEPS 起主要作用,而厌氧污泥吸附染料酸性湖蓝 A 时,BEPS 起主要作用.

(4) 活性污泥和厌氧污泥 SEPS 的单位质量吸附量均大于 BEPS 的单位质量吸附量,活性污泥平均为 52 倍,厌氧污泥为 10 倍.当初始染料浓度为 252 mg/L 时,活性污泥 SEPS 吸附染料酸性湖蓝 A 的量最多,高达 3 289 mg/g(以 SEPS 计).

(5) 厌氧污泥 BEPS 的吸附用 Langmuir 拟合,效果最好(R^2 为 0.998 6),其次为活性污泥 SEPS(R^2 为 0.992 9);活性污泥和厌氧污泥 SEPS、BEPS 所吸附的染料酸性湖蓝 A 用 BET 模型拟合,结果均较差(R^2 为 0.202 ~ 0.727).

参考文献:

[1] 黄川,刘元元,罗宇,等.印染工业废水的研究现状[J].重庆大学学报(自然科学版),2001,24(6):139~142.

[2] 汪学军,徐莉,汪培文.染料工业废水处理研究进展[J].化学工业与工程技术,2003,24(4):39~41.

[3] Aksu Z. Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review[J]. Process Biochemistry, 2005, 40: 997 ~ 1026.

[4] Veglio F, Beolchini F. Removal of metals by biosorption: a review[J]. Hydrometallurgy, 1997, 44: 301 ~ 316.

[5] Murthy S N, Novak J T. Effects of potassium ion on sludge settling, dewatering and effluent properties [J]. Water Science and Technology, 1998, 37(4-5): 317 ~ 324.

[6] Liu Y, Lam M C, Fang H H P. Adsorption of heavy metals by EPS of activated sludge[J]. Water Science and Technology, 2001, 43: 59 ~ 66.

[7] Comte S, Guibaud G, Baudu M. Biosorption properties of Extracellular polymeric substances (EPS) resulting from activated sludge according to their type: Soluble or Bound [J]. Process Biochemistry, 2006, 41: 815 ~ 823.

[8] Morgan J W, Forster C F, Evison L. A comparative study of the nature of biopolymers extracted from anaerobic and activated sludges [J]. Water Research, 1990, 24(6): 743 ~ 750.

[9] Frolund B, Palmgren R, Keiding K, et al. Extraction of Extracellular polymers from activated sludge using a cation ion exchange resin[J]. Water Research, 1996, 30(8): 1749 ~ 1758.

[10] Eriksson L, Alm B. Study of flocculation mechanisms by observing effects of a complexing agent on activated sludge properties[J]. Water Science and Technology, 1991, 24(7): 21 ~ 28.

[11] Brown M J, Lester J N. Comparison of bacterial extracellular polymer extraction methods [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1980, 40(2): 179 ~ 185.

[12] Frolund B, Griebe T, Nielsen P. Enzymatic activity in the activated sludge floc matrix [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1995, 43(4): 755 ~ 761.

[13] Burton K. A study of the conditions and mechanism of the diphenylamine reaction for the colorimetric estimation of deoxyribonucleic acid [J]. Biochemical Journal, 1956, 62: 315 ~ 323.

[14] Liu Y, Fang H H P. Influences of extracellular polymeric substances (EPS) on flocculation, settling and dewatering of activated sludge [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2003, 33(3): 237 ~ 273.