

污泥内层和外层胞外聚合物的三维荧光光谱特性研究

欧阳二明^{1,2}, 王伟¹, 龙能³, 李怀⁴

1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084
2. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031
3. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083
4. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054

摘要 运用三维荧光光谱技术对污泥 LB-EPS 和 TB-EPS 的荧光特性进行了研究。实验结果表明, 在污泥 LB-EPS 和 TB-EPS 中都有三个明显的荧光峰, 分别为 Peak B($\lambda_{ex}/\lambda_{em} = 270 \sim 280 \text{ nm}/345 \sim 360 \text{ nm}$), Peak C ($\lambda_{ex}/\lambda_{em} = 330 \sim 340 \text{ nm}/410 \sim 430 \text{ nm}$) 和 Peak D ($\lambda_{ex}/\lambda_{em} = 390 \text{ nm}/450 \sim 470 \text{ nm}$)。其中 Peak B 为类蛋白荧光(Protein-like)、Peak C 为可见区类富里酸荧光(Visible fulvic-like)、Peak D 为类腐殖酸荧光(Humic-like)。从各荧光峰的荧光强度来分析, LB-EPS 和 TB-EPS 中的主要成分都为类蛋白, 然后依次为富里酸和腐殖酸。浓度和 pH 值对污泥 LB-EPS 和 TB-EPS 的三维荧光特性都有很大的影响, 但影响程度略有区别, 表明作为外层的胞外聚合物, LB-EPS 表现出与 TB-EPS 不全相同的化学结构。

关键词 外层胞外聚合物; 内层胞外聚合物; 污泥; 三维荧光光谱

中图分类号: O657.3 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)05-1313-06

引言

胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)是微生物在一定环境条件下, 在其代谢过程中分泌的包围在微生物细胞壁外的大分子有机多聚物, 其有机部分主要由蛋白质、多聚糖以及腐殖酸、DNA 和脂类组成^[1]。EPS 能作为抵抗外界环境的保护层和营养吸收层, 是微生物饥饿期间重要的碳源和能源储备。通过连接细胞和其他物质, EPS 可以稳定污泥的絮体结构, 为微生物提供最基本的生长条件; 同时从废水中吸收新陈代谢所需的营养, 并形成保护屏障, 抵抗苛刻的外界环境^[2]。此外, EPS 能改变污泥的表面特性、生物絮凝、沉降性能及脱水性能等性质, 从而影响污泥处理的工艺和费用^[3, 4]。污泥胞外聚合物可分为紧密粘附的胞外聚合物(tightly bound EPS, TB-EPS)和松散附着的胞外聚合物(loosely bound EPS, LB-EPS)两部分。TB-EPS 位于细胞体表面, 与细胞壁结合牢固; LB-EPS 在 TB-EPS 外层, 结构松散, 密度较小, 具有流变特性。近来的研究表明^[5, 6], 虽然 TB-EPS 的各组分含量要大于 LB-EPS, 但对污泥沉降、絮凝和脱水性能起着决定性作用是 LB-EPS, 而 TB-EPS 对污泥这些性能的影响相对要弱一些。

由于污泥胞外聚合物在废水生物处理中的重要作用, 越来越多的研究者^[5-8]采用各种技术方法对它们的化学组成和物理化学性质开展了深入的研究。Esparza-Soto 和 Westerhoff^[8]采用荧光光谱技术对污泥胞外聚合物的特性进行了研究, 主要是基于污泥胞外聚合物中含有大量带有各种官能团的芳香环结构以及未饱和脂肪链, 其内含有多种不同的荧光基团, 这些荧光基团的荧光特性能表达胞外聚合物结构、官能团、构型、非均质等信息^[9, 10]。三维荧光光谱(three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy; 3DEEM)能够获得激发波长和发射波长同时变化时的荧光强度信息, 能识别和表征复杂体系中荧光光谱重叠的对象, 是非常有用的光谱指纹技术^[11-14], 具有高灵敏度、高选择性、高信息量、且不破坏样品结构等优点^[15-18]。本文主要运用三维荧光光谱技术研究表征污泥外层胞外聚合物(LB-EPS)和内层胞外聚合物(TB-EPS)的荧光光谱特性及其浓度、pH 值效应。

1 材料与方法

1.1 污泥样品

试验污泥取自正常运转的北京市某城市污水处理厂的活

收稿日期: 2008-03-02, 修订日期: 2008-06-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划“863”项目(2006AA06Z384)资助

作者简介: 欧阳二明, 1976年生, 清华大学环境科学与工程系博士研究生

e-mail: oyem02@mails.tsinghua.edu.cn; youmer@sina.com

性回流池,该厂采用普通活性污泥法处理城市污水,所取好氧活性污泥的 VS/TS 值为 72.7%, VSS/SS 值为 76.0%。为保证污泥性状不发生变化,从现场取回至实验室后,立即对污泥进行 LB-EPS 和 TB-EPS 的提取。

1.2 污泥 LB-EPS 和 TB-EPS 提取方法

采用改进的热提取法(Modified heat extraction method)提取 LB-EPS 和 TB-EPS^[6]。用 TOC 表征 LB-EPS 和 TB-EPS 的总量,TOC 测定采用 SHMADZU TOC Analyzer 5000A。提取到的 LB-EPS 和 TB-EPS 的 TOC 值分别为 46 和 199.4 mg · L⁻¹。为研究 LB-EPS 和 TB-EPS 的荧光光谱特征及其浓度效应,采用超纯水稀释配置 4 种浓度(46, 23, 11.5, 5.75 mg C · L⁻¹)的 LB-EPS 和 4 种浓度(199.4, 99.7, 49.85, 24.93 mg C · L⁻¹)的 TB-EPS,分别测定它们的三维荧光光谱图。为研究 LB-EPS 和 TB-EPS 的荧光光谱特征的 pH 值效应,分别对浓度为 23 mg C · L⁻¹ 的 LB-EPS 和浓度为 99.7 mg C · L⁻¹ 的 TB-EPS 测定其在 pH 值为 3~12(间隔为 1 个单位)时的三维荧光光谱图。样品 pH 值均使用 0.1, 1 mol · L⁻¹ 的 NaOH 和 0.1, 1 mol · L⁻¹ 的 HCl 溶液,并采用 10 μL 的色谱进样器调节。为减少浓度稀释效应,总共 10 mL 的样品中加入酸碱的量不超过 50 μL。

1.3 三维荧光光谱分析方法

三维荧光光谱图的测定在 Luminescence Spectrometer LS-55 荧光光度计(美国 Perkin-Elmer 公司)上完成,提取到的污泥 LB-EPS 和 TB-EPS 直接进行三维荧光扫描。Luminescence Spectrometer LS-55 荧光光度计使用氙弧灯为激发光源;激发波长 λ_{ex} = 230~400 nm,发射扫描波长 λ_{em} = 300~550 nm;激发和发射狭缝宽度为 5 nm;激发波长扫描间隔为 10 nm;扫描速度为 1 200 nm · min⁻¹;响应时间为自动方

式;扫描光谱进行仪器自动校正。采用 FL Winlab 软件进行数据分析。

2 实验结果与讨论

2.1 LB-EPS 和 TB-EPS 的 3DEEMs

三维荧光光谱可以检测到胞外聚合物中不同类型的荧光峰,如类腐殖酸荧光(Humic-like),类富里酸荧光(Fulvic-like)和类蛋白荧光(Protein-like)等^[14, 19, 20]。

图 1 所示为 LB-EPS 和 TB-EPS 的三维荧光光谱。由图可知,污泥 LB-EPS 和 TB-EPS 具有 3 个相同的荧光峰类型,其中荧光峰 B(Peak B: $\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ = 270~280 nm/345~360 nm)为类蛋白荧光,与胞外聚合物中的芳环氨基酸结构有关^[11, 18];荧光峰 C(Peak C: $\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ = 330~340 nm/410~430 nm)为可见区类富里酸荧光(Visible fulvic-like),与胞外聚合物中的羧基和羰基结构有关;荧光峰 D(Peak D: $\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ = 390 nm/450~470 nm)为类腐殖酸荧光(Humic-like)^[20-22]。这说明 LB-EPS 和 TB-EPS 虽然是分别位于污泥外层和内层的胞外聚合物,但其组分和物质结构是基本相同的。从各荧光峰的荧光强度来看, LB-EPS 和 TB-EPS 中的主要成分都为类蛋白,然后依次是富里酸、腐殖酸。由表 1 可知,污泥 LB-EPS 和 TB-EPS 三个相同荧光峰所对应的荧光强度是不同的,例如对于原始的胞外聚合物浓度而言(LB-EPS 浓度为 46 mg C · L⁻¹, TB-EPS 浓度 199.4 mg C · L⁻¹ 时),TB-EPS 的荧光峰 B、荧光峰 C、荧光峰 D 的荧光强度分别是 LB-EPS 的 2.50, 1.83, 2.28 倍,说明位于内层的胞外聚合物具有更高的物质浓度,这也与它们的 TOC 浓度相一致。

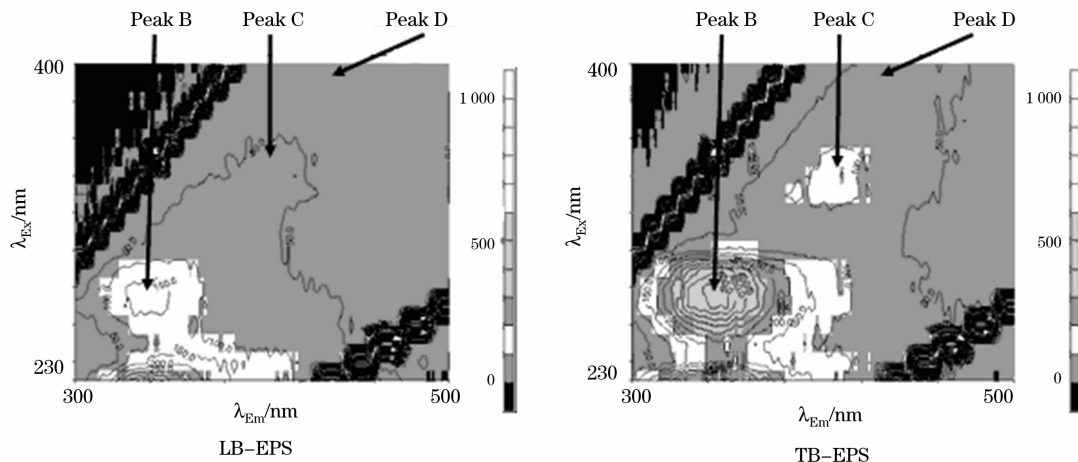


Fig. 1 3DEEMs of the sludge EPS and LB-EPS

表 1 和表 2 分别列出了不同浓度和不同 pH 条件下污泥 LB-EPS 和 TB-EPS 的三维荧光分析结果,包括各荧光峰位置 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ 、相应荧光峰的荧光强度以及各荧光峰之间的荧光强度比值。结果表明,虽然不同浓度、不同 pH 条件下 LB-EPS 和 TB-EPS 的荧光峰位置 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ 会出现细微的红移或蓝移现象,但表现出的荧光峰类型是基本相同的,说明浓度和

pH 值的影响不会从根本上改变 LB-EPS 和 TB-EPS 的物质组分和化学结构。从各荧光峰荧光强度的比值来看,可以发现一个很有意思的现象:同样的 pH 条件下, TB-EPS 的 B/C 值、B/D 值都要大于 LB-EPS 相应的 B/C 值、B/D 值;而 TB-EPS 的 C/D 值却都要小于 LB-EPS 相应的 C/D 值。LB-EPS 并不表现出与 TB-EPS 完全相同的荧光特性,位于外层

Table 1 Fluorescence parameters of the sludge TB-EPS and LB-EPS at various concentrations

	浓度 /(mg C · L ⁻¹)	Peak B		Peak C		Peak D		B/C	B/D	C/D
		$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ /nm	荧光强度 /a. u.	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ /nm	荧光强度 /a. u.	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ /nm	荧光强度 /a. u.			
LB-EPS	46	270/359.5	271.7	330/424.0	109.1	390/457.0	70.6	2.49	3.85	1.55
	23	270/352.0	143.3	330/420.0	50.3	390/453.5	38.1	2.85	3.76	1.32
	11.5	270/355.5	73.7	330/436.5	23.8	390/454.0	21.1	3.09	3.49	1.13
	5.75	270/354.0	33.4	340/429.5	13.2	390/455.5	13.5	2.53	2.47	0.98
TB-EPS	199.4	280/355.5	680.0	330/425.0	199.7	390/461.5	161.2	3.40	4.22	1.24
	99.7	280/357.0	611.4	330/416.5	138.7	390/465.0	95.4	4.41	6.41	1.45
	49.85	280/353.0	496.5	330/409.5	87.3	390/464.5	60.1	5.69	8.26	1.45
	24.93	280/356.5	328.2	330/417.0	45.2	390/456.0	31.6	7.25	10.40	1.43

Table 2 Fluorescence parameters of the sludge EPS and LB-EPS at various pH values

pH	Peak B		Peak C		Peak D		B/C	B/D	C/D		
	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ /nm	荧光强度/a. u.	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ /nm	荧光强度/a. u.	$\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ /nm	荧光强度/a. u.					
LB-EPS	3	270/353.0	114.1	330/420	60.4	390/457	27.2	1.89	4.19	2.22	
	4	270/352.0	127.9	330/417.0	67.4	390/457.0	30.9	1.90	4.14	2.18	
	5	280/351.5	140.2	330/429.5	71.4	390/456.5	34.3	1.96	4.09	2.08	
	6	270/345.0	148.2	330/410.5	68.6	390/453.5	34.2	2.16	4.33	2.00	
	7	280/347.5	172.4	330/429.0	74.1	390/453.0	43.1	2.33	4.00	1.72	
	8	270/351.5	147.3	330/417.5	70.2	390/454.5	40.8	2.10	3.61	1.72	
	9	270/355.5	161.1	330/414.0	71.9	390/455.0	44.2	2.24	3.64	1.63	
	10	280/347.5	165.6	330/416.5	70.9	390/455.0	44.6	2.34	3.72	1.59	
	11	270/356.0	178.6	330/417.5	72.5	390/460.5	45.9	2.46	3.89	1.58	
	12	270/354.0	131.9	330/413.0	67.5	390/456.0	44.2	1.95	2.98	1.53	
	TB-EPS	3	270/355.5	330.5	330/414.5	130.8	390/450.0	76.8	2.53	4.3	1.7
		4	280/354.5	365.0	330/426.5	132	390/454.5	83.1	2.76	4.39	1.59
5		280/353.0	444.7	330/415.5	121	390/456.0	77.7	3.68	5.72	1.56	
6		280/355.5	614.1	330/427.0	120.9	390/461.0	90.6	5.08	6.78	1.33	
7		280/359.0	562.9	330/430.5	122.4	390/457.0	83.6	4.6	6.74	1.46	
8		280/354.5	655.7	330/426.5	127.4	390/463.5	84.2	5.15	7.79	1.51	
9		280/358.0	694.2	330/426.5	125.4	390/459.0	95.6	5.54	7.26	1.31	
10		280/353.0	795.7	330/423.5	155.7	390/472.0	107.5	5.49	7.4	1.35	
11		280/353.5	739.7	330/431.5	145	390/472.5	104.7	4.75	7.07	1.49	
12		280/357.0	611.4	330/416.5	138.7	390/465.0	95.4	4.41	6.41	1.45	

的 LB-EPS 与位于内层的 TB-EPS 具有一定的特性差异。

3.2 LB-EPS 和 TB-EPS 荧光特性的浓度效应

表 1 统计了 LB-EPS 和 TB-EPS 的三维荧光特性随浓度变化的情况。结果表明,各荧光峰出现的位置与它们的浓度基本没有关系,但荧光强度与它们的浓度有着直接明显的对应关系(如图 2 所示)。分析结果显示,对于 LB-EPS,其三种荧光峰 Peak B, Peak C, Peak D 的荧光强度与相应的 LB-EPS 浓度(以 TOC 计, mg C · L⁻¹)都表现出很强的线性关系,相关系数 R^2 分别高达 0.995 0, 0.998 5, 0.997 8, 0.999 9。对于 TB-EPS,其两种荧光峰 Peak C 和 Peak D 的荧光强度与 TB-EPS 的浓度(以 TOC 计, mg C · L⁻¹)也表现出很强的线性关系,相关系数 R^2 分别为 0.958 2 和 0.991 8;而 TB-EPS 的另外一种荧光峰 Peak B,其荧光强度与 TB-EPS 的浓度则表现出更强的对数关系。

由表 1 也可以看出,浓度对 LB-EPS 和 TB-EPS 各荧光峰强度间比值的影响是不一样的:对于 B/C 值,在 TB-EPS 中其大小基本与 LB-EPS 浓度呈负线性相关关系,而 LB-

EPS 的 B/C 值受其浓度的影响不大;对于 B/D 值,在 LB-EPS 中其大小随 LB-EPS 浓度的增加而增加,但在 TB-EPS 中其大小却随 TB-EPS 浓度的增加而减小;对与 C/D 值,在 LB-EPS 中其大小基本与 LB-EPS 浓度呈正线性相关关系,而在 TB-EPS 中其大小基本不受 TB-EPS 浓度的影响。

3.3 pH 对 LB-EPS 和 TB-EPS 荧光特性的影响

不同 pH 条件下污泥 LB-EPS 和 TB-EPS 的三维荧光图分别如图 3 和图 4 所示,它们的三维荧光光谱分析汇总结果见表 2。实验结果显示, pH 值对 LB-EPS 和 TB-EPS 的三维荧光特性都有重要的影响。不同的 pH 条件下, LB-EPS 和 TB-EPS 各荧光峰的具体出现位置 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ 都存在一定的细微偏移。例如对于污泥 TB-EPS,与 pH 7 时相比,其在 pH 12 时 Peak B, Peak C, Peak D 的 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ 分别偏移了 2, 14, 8 nm;而对于污泥 LB-EPS,与 pH 7 相比,其在 pH 12 时 Peak B, Peak C, Peak D 的 $\lambda_{ex}/\lambda_{em}$ 分别偏移了 6, 16, 3 nm。这样偏移现象在前人的研究报道^[21]中也出现过,说明 LB-EPS 和 TB-EPS 中各组分的结构形态会随 pH 的不同而发生

一定的细微变化。

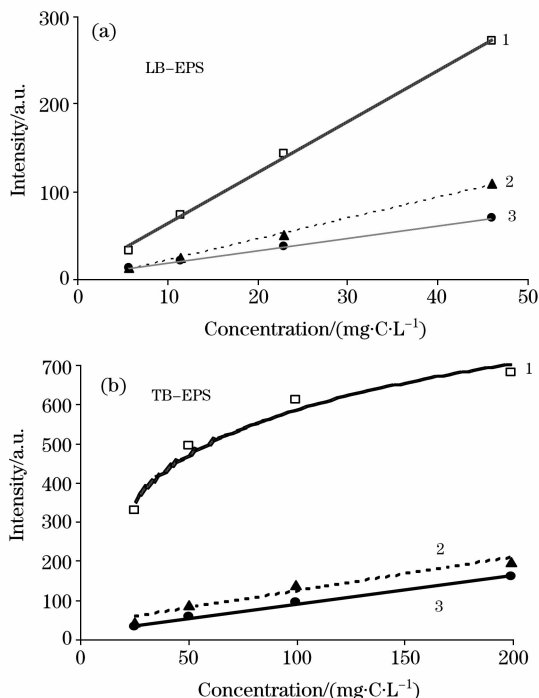


Fig. 2 Correlation between the intensity and concentration

1: Peak B; 2: Peak C; 3: Peak D

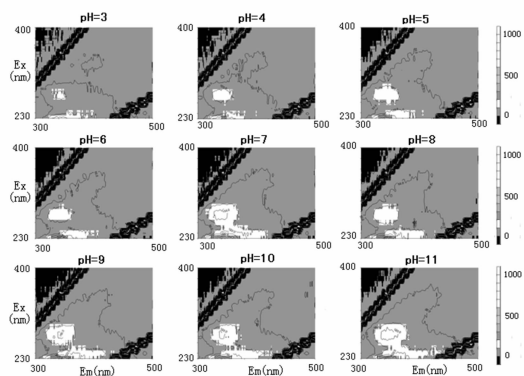


Fig. 3 3DEEMs of the sludge LB-EPS at various pH at a LB-EPS concentration of 23 mg C · L⁻¹

污泥 LB-EPS 和 TB-EPS 中 Peak B, Peak C, Peak D 的荧光强度随着 pH 的变化都相应地产生了一定的变化(如图 3 ~图 5 所示)。在 LB-EPS 中, pH 3~7 时, Peak B 的荧光强度随 pH 值的增加而增加, 在 pH 增加到 8 时, Peak B 的荧光强度降回到 pH 6 时的水平, 随后在 pH 8~11 之间, Peak B 的荧光强度又随 pH 值的增加而增加, 但在 pH 增加到 12 时, Peak B 的荧光强度降回到了 pH 4 的水平, 整个 pH 区间中, Peak B 荧光强度的最大值出现 pH 11 时, 其值为 178.6。而在 TB-EPS 中, pH 3~6 时, Peak B 的荧光强度随 pH 值的增加而增加, 在 pH 7 时略有降低后, 在 pH 7~10 之间 Peak B 的荧光强度又随 pH 值的增加而增加, 然后在 pH 10~12 之间时 Peak B 的荧光强度随之减少, 最大值出现

在 pH 10 时, 其值为 795.7。对于 LB-EPS, 在 pH 3~12 之间, Peak B 和 Peak D 的最大值都出现在 pH 11 时; 而 Peak C 的最大值出现在 pH 7 时。对于 TB-EPS, 在 pH 3~12 之间, Peak B 和 Peak D 的最大值都出现在 pH 10 时; 而 Peak C 的最大值出现在 pH 11 时。这说明 LB-EPS 和 TB-EPS 中各结构和官能团特征受 pH 的影响方式是不尽相同的, LB-EPS 表现出与 TB-EPS 不全相同的荧光特性。

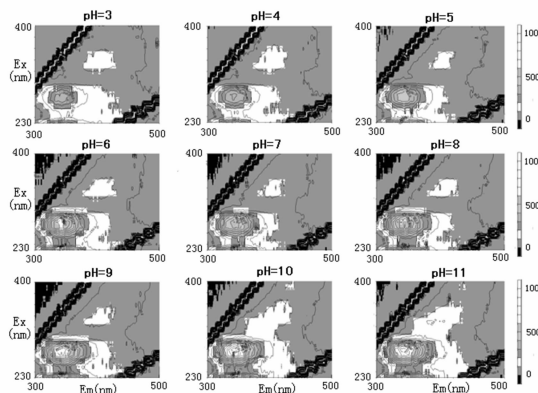


Fig. 4 3DEEMs of the sludge EPS at various pH at a TB-EPS concentration of 99.7 mg C · L⁻¹

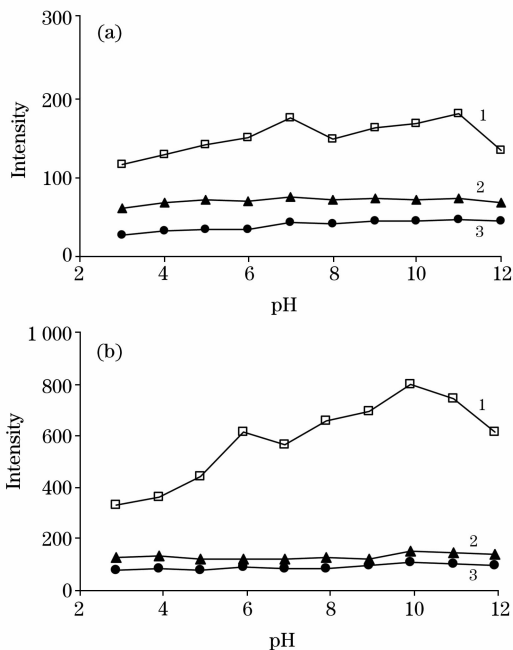


Fig. 5 Correlation between the intensity and pH of LB-EPS and TB-EPS

(a): LB-EPS; (b): TB-EPS;

1: Peak B; 2: Peak C; 3: Peak D

4 结 论

本研究结果显示, 在污泥 LB-EPS 和 TB-EPS 中都有 3 个明显的荧光峰: Peak B($\lambda_{ex}/\lambda_{em} = 270 \sim 280 \text{ nm}/345 \sim 360 \text{ nm}$), Peak C($\lambda_{ex}/\lambda_{em} = 330 \sim 340 \text{ nm}/410 \sim 430 \text{ nm}$) 和 Peak

$D(\lambda_{\text{ex}}/\lambda_{\text{em}} = 390 \text{ nm}/450 \sim 470 \text{ nm})$ 。其中 Peak B 为类蛋白荧光, 与胞外聚合物中的芳环氨基酸结构有关; Peak C 为可见区类富里酸荧光(Visible fulvic-like), 与胞外聚合物中的羧基和羰基结构有关; Peak D 为类腐殖酸荧光(Humic-like)。浓度和 pH 值对污泥 LB-EPS 和 TB-EPS 的三维荧光特性都

有重大影响, 但影响程度略有区别, 表明作为外层的胞外聚合物, LB-EPS 表现出与 TB-EPS 不全相同的化学结构。三维荧光光谱作为一种快速、高灵敏度、高选择性的分析手段, 在表征 LB-EPS 和 TB-EPS 的光谱特性方面表现出独特的优越性。

参 考 文 献

- [1] Houghton J I, Stephenson T. *Water Research*, 2002, 36(14): 3620.
- [2] Frolund B, Palmgren R, Keiding K, et al. *Water Research*, 1996, 30(8): 1749.
- [3] Wang Zhiping, Liu Lili, Yao Jie, et al. *Chemosphere*, 2006, 63(10): 1728.
- [4] Liu H, Fang H H P. *Journal of Biotechnology*, 2002, 95(3): 249.
- [5] WANG Hong-wu, LI Xiao-yan, ZHAO Qing-xiang(王红武, 李晓岩, 赵庆祥). *China Safety Science Journal(中国安全科学学报)*, 2003, 13(9): 31.
- [6] Li X Y, Yang S F. *Water Research*, 2007, 41(5): 1022.
- [7] Wilen B M, Jin B, Lant P. *Water Research*, 2003, 37(9): 2127.
- [8] Esparza-Soto M, Westerhoff P K. *Water Science & Technology*, 2001, 43(6): 87.
- [9] SONG Ji-mei, TANG Bi-lian(宋继梅, 唐碧莲). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2000, 20(1): 115.
- [10] ZHANG Qian-qian, LEI Shu-he, WANG Xiu-lin, et al(张前前, 类淑河, 王修林, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2004, 24(10): 1227.
- [11] FU Ping-qing, LIU Cong-qiang, WU Feng-chang(傅平青, 刘丛强, 吴丰昌). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2005, 25(12): 2024.
- [12] FU Ping-qing, WU Feng-chang, LIU Cong-qiang, et al(傅平青, 吴丰昌, 刘丛强, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2006, 26(3): 471.
- [13] OUYANG Er-ming, ZHANG Xi-hui, WANG Wei(欧阳二明, 张锡辉, 王伟). *Water Resources Protection(水资源保护)*, 2007, 23(3): 56.
- [14] OUYANG Er-ming, ZHANG Xi-hui, WANG Wei(欧阳二明, 张锡辉, 王伟). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2007, 27(7): 1373.
- [15] Patel-Sorrentino N, Mounier S, Benaim J Y. *Water Research*, 2002, 36(10): 2571.
- [16] Baker A. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(7): 1377.
- [17] Wolfe A P, Kausal S S, Fulton J R, et al. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(15): 3217.
- [18] Leenheer J A, Croue J P. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(1): 19A.
- [19] Baker A. *Water Research*, 2002, 36(1): 189.
- [20] Wu F C, Tanoue E. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(18): 3646.
- [21] Mobed J J, Hemmingsen S L, Autry J L, et al. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30(10): 3061.
- [22] Baker A. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(5): 948.

Three-Dimensional Excitation Emission Matrix Fluorescence Spectroscopic Characterization of Loosely Bound and Tightly Bound Extracellular Polymeric Substances of Sludge

OUYANG Er-ming^{1, 2}, WANG Wei¹, LONG Neng³, LI Huai⁴

1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China

3. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

4. Department of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy (3DEEM) was applied to characterize the loosely bound extracellular polymeric substances (LB-EPS) and tightly bound extracellular polymeric substances (TB-EPS) extracted from aerobic sludge in wastewater treatment. The results showed that three fluorescence peaks were identified in three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectra of the LB-EPS and TB-EPS: peak B ($\lambda_{ex}/\lambda_{em} = 270\text{-}280\text{ nm}/345\text{-}360\text{ nm}$), peak C ($\lambda_{ex}/\lambda_{em} = 330\text{-}340\text{ nm}/410\text{-}430\text{ nm}$) and peak D ($\lambda_{ex}/\lambda_{em} = 390\text{ nm}/450\text{-}470\text{ nm}$). The peak B was attributed to the protein-like fluorophores, peak C to the visible fulvic-like fluorophore and peak D to the humic-like fluorophore. Results of the peak intensity showed that the major component of the LB-EPS and TB-EPS is protein-like organic matter, then followed by (from high to low): fulvic-like organic matter and humic-like organic matter. The effects of both pH and concentration were significant to the 3DEEMs of LB-EPS and TB-EPS, but the degree is not the same. LB-EPS has the particular chemical structures which are different from the TB-EPS.

Keywords Loosely bound extracellular polymeric substances (LB-EPS); Tightly bound extracellular polymeric substances (TB-EPS); Sludge; Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy

(Received Mar. 2, 2008; accepted Jun. 6, 2008)