

胞外聚合物及其表面性质对活性污泥沉降性的影响^{*}

龙向宇, 龙腾锐, 唐然

(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:采用超声波法与阳离子交换树脂法提取活性污泥絮体中的 LEPS 与 TEPS, 考察两部分 EPS 及其表面性质对活性污泥沉降性能的影响。研究结果表明: 1) 污泥龄对 LEPS 与 TEPS 的总数量有不同的影响, LEPS 总数量随污泥龄的增大先降低后略微升高; 而 TEPS 总数量的变化不大, 平均值在 80 mg/g VSS 左右。2) LEPS 总数量的增加及其表面电荷与疏水性的降低, 引起 SVI 的升高与 ZSV 的降低; 其总数量、表面电荷与疏水性同 SVI 有强的相关性, 相关系数分别为 0.803、-0.761 与 -0.689。3) TEPS 的总数量同 SVI 与 ZSV 没有显著的相关性; 而 TEPS 的疏水性同 SVI 与 ZSV 有强的相关性, 其疏水性的增大对应着低的 SVI 与高的 ZSV。

关键词:胞外聚合物; 表面电荷; 疏水性; 沉降性

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: (K) 08088 (原 1002-1264) (2008) 03-0015-06

Influence of Extracellular Polymers and Their Surface Characters on Settleability of Activated Sludge

LONG Xiang-yu, LONG Teng-rui, TANG Ran

(Key Lab of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Loosely bound EPS (LEPS) and tightly bound EPS (TEPS) were extracted by ultrasonic and cation resin in turn, and the influence of two type EPS and their surface characters to the settleability of activated sludge were investigated. The results showed: SRT had different influence on the total amount of two type EPS. With the increase of SRT, the total amount of LEPS increased early and decreased late, while the total amount of TEPS was almost steady with the average about 80mg/g VSS. While the total amount of LEPS increased or their surface charge and hydrophobicity dropped, SVI would be enhanced and ZSV would be reduced. The total amount of TEPS was not significantly related to SVI and ZSV, while hydrophobicity of TEPS had strong effects on SVI and ZSV. That is to say, higher hydrophobicity of TEPS was corresponded to lower SVI and higher ZSV.

Key words: extracellular polymer; surface charge; hydrophobicity; settleability

固液分离是活性污泥工艺中最重要的操作过程, 污泥的沉降性能是影响整个系统性能与效率的关键。胞外聚合物 (extracellular polymers, 简称 EPS) 是污泥絮体的重要物质, 影响活性污泥的絮凝性、沉降性与脱水性^[1-6]。然而, EPS 对活性污泥絮凝性能影响的确切作用至今仍不清楚, 各研究者对 EPS 数量及其组分对活性污泥沉降性影响的相关结论不一致^[2-7], 甚至相互矛盾。本文认为, 产生上述现象的主要原因有 3 个方面: 首先, 污泥样品的来源与 EPS 的提取方法不同; 其次, 没有考虑 EPS 自身的表面电荷与疏水性对污泥沉降性的影响; 再次, 常将 EPS 作为一个整体来研究, 没有重视絮体

中内外层 EPS 组成与性质上的差异。

本文采用超声波提取法^[8]与阳离子交换树脂提取法^[9], 先后提取活性污泥絮体中同细菌或菌胶团疏松结合的 EPS (loosely bound EPS, 简称 LEPS) 与紧密结合的 EPS (tightly bound EPS, 简称 TEPS), 研究两部分 EPS 的组成与表面性质对活性污泥沉降性的影响, 为活性污泥系统的改进与稳定运行提供依据。

1 材料与方法

1.1 活性污泥的培养

以试验室 SBR 反应器的好氧活性污泥作为研

^{*} 基金项目: 国家十五科技攻关课题 (2004BA604A01)

收稿日期: 2008-04-06

研究对象。接种污泥来自重庆市唐家桥污水处理厂,采用 5 个 15 L 的 SBR 反应器进行培养,通过改变进水污染物浓度与混合液排泥量,将反应器的污泥龄分别控制在 3 d, 6 d, 10 d, 15 d 和 20 d 左右,同时将不同反应器中 MLSS 的浓度控制为 2 000~2 200 mg/L。人工合成废水的 $\rho(\text{COD}) : \rho(\text{N}) : \rho(\text{P})$ 为 100: 5: 1, 其中碳源为葡萄糖、蛋白胨与可溶性淀粉; 废水中微量元素采用相同的配比, 消除金属离子浓度对研究过程的影响。各反应器的运行条件均为: DO 1.0~6.0 mg/L, pH 7.0~7.6, 温度 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 。

1.2 EPS 提取与分离方法

在 SBR 系统曝气结束前, 取一定体积的活性污泥样品, 于 3 000 r/min (离心力为 1 800 g) 下离心 20 min, 弃除离心后的上清液, 补充 pH 平衡下的二次蒸馏水 (pH 值为 7.0) 至原取样污泥体积的 1/3 (将污泥浓缩 3 倍), 并搅拌均匀。量取 60 mL 该污泥样品, 于冰水浴中采用超声仪于 21 kHz, 40 W 下作用 2 min^[8]。然后在 6 000 r/min (离心力为 4 200 g) 下离心 30 min, 上清液经 0.22 μm 纤维素滤膜过滤, 所得溶液即为 LEPS 样品。用 pH 平衡下的二次蒸馏水将离心沉降的污泥重新悬浮, 并使其体积恢复为 60 mL。然后在冰水浴中用阳离子交换树脂提取紧密结合的 EPS; 在提取过程中, 树脂投加量为 80 mg/g VSS, 搅拌速率 550 r/min, 提取时间为 1.5 h^[9]。然后, 在真空泵抽吸作用下, 用孔径为 250 μm 的尼龙筛网滤除树脂颗粒。将过滤得到的污泥混合液于 6 000 r/min 下离心 30 min, 上清液经 0.22 μm 的滤膜过滤, 滤液即为 TEPS 样品。所有样品当天分析, 在化学分析前置于 4°C 下保存。EPS 的提取与分离的流程见图 1。

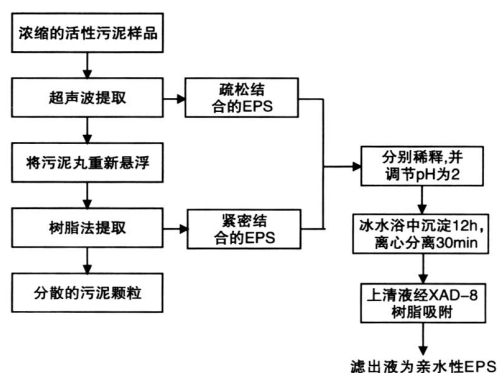


图 1 EPS 提取与分离步骤

将湿体积为 5 mL 的 XAD-8 树脂装入石英玻璃柱中, 使用前用 0.1 mol/L 的 HCl 与 NaOH 交替

清洗 3 次^[10, 11]。用 HCl 溶液将 LEPS 与 TEPS 的 pH 值调节到 2, 并分别进行 2 倍和 3 倍的稀释, 将稀释液于冰水浴中沉淀 12 h, 在 6 000 r/min (离心力为 4 200 g) 下分别离心 30 min, 取 80 mL 上清液用 XAD-8 树脂在 60 mL/h 的流速下分别进行吸附过滤。取过滤中期段的滤出液作为检测样品, 滤出液中的大分子物质为亲水性 EPS; 离心沉淀物与被 XAD-8 树脂吸附的大分子为疏水性 EPS^[11]。

1.3 EPS 表面性质的测量

EPS 疏水性由疏水性 EPS 占提取 EPS 的质量百分比来表征。表面电荷密度采用胶体滴定^[12]直接进行测量, 采用碱性苯甲胺蓝作为指示剂, 以 Cat-Fbc 作为正电荷聚合物, 以 PVSK 为负电荷聚合物, 以溴代十六烷基吡啶作为标准物质, 所有溶液采用 pH 平衡下的二次蒸馏水进行配置。具体测量方法参照文献^[12], 计算值用 meq/g EPS 表示。

1.4 污泥沉降性能的测量

采用污泥容积指数 (简称 SVI) 与区域沉降速率 (简称 ZSV) 分别描述压缩沉降与区域沉降。SVI 的测量采用 500 mL 的量筒; ZSV 的测量采用 2 000 mL 的量筒, 测量值用 m/h 表示。

1.5 其他指标的测量

EPS 中的多糖含量采用硫酸—蒽酮法测量, 采用葡萄糖作为标准物质; 蛋白质与腐殖质采用修正的 Folin 酚法测量, 分别采用牛蛋白血清与腐殖酸钠作为标准物质; DNA 采用二苯胺进行测量, 采用 2-脱氧-D 核糖作为标准物质。将多糖、蛋白质、腐殖质与 DNA 之和作为 EPS 总量。VSS 的测量方法为: 将 100 mL 污泥于 3 000 r/min 下离心 20 min 后置入坩埚中, 先在 105°C 下烘干至恒重, 然后在 600°C 高温灼烧后称重计算得到。本文中所有指标的测量均采用平行样测量。

2 结果与讨论

2.1 SVI 与 ZSV 的关系

在活性污泥处理系统中, 区域沉淀与压缩沉淀是二沉池中最主要的两个沉淀过程, 本文将 ZSV 与 SVI 分别视为反映区域沉淀与压缩沉淀的指标。从图 2 可以看出, 5 个 SBR 反应器的 SVI 在 40~105 之间; SRT 为 15 d 时, 系统有最低的 SVI 值, 平均值为 43.2。ZSV 随污泥龄的增大而增大; SRT 为 20 d 时, 活性污泥具有最大的 ZSV, 平均值为 10.0 m/h。两个指标之间表现出弱相关性, 说明两者受到絮体

中不同因素的影响,不是简单的线性关系。

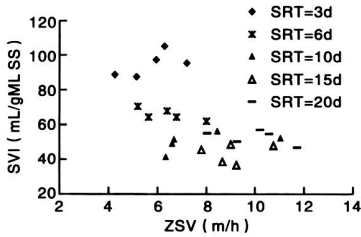


图 2 ZSV 与 SV 的关系 ($r_p = 0.588, P < 0.05$)

另一方面,通过电子显微观察到 (图片没有示出),低污泥龄 (SRT 为 3 d 与 6 d) 的活性污泥絮体上几乎没有丝状菌;高污泥龄 (SRT 为 15 d 与 20 d) 的活性污泥絮体上有少量的丝状菌。说明在本研究中污泥絮体的丝状菌数目很少,丝状菌对污泥沉降性能的影响可忽略。

2.2 LEPS对活性污泥沉降性的影响

胞外聚合物可分为紧密粘附的胞外聚合物 (TEPS) 和疏松附着的胞外聚合物 (LEPS) 两部分。本文首先采用低频率低功率的超声波,通过强烈振动、高加速度与搅拌等作用提取 LEPS^[8];然后采用阳离子交换树脂,通过离子交换作用,置换絮体中的高价阳离子,提取 TEPS^[9] (提取流程见图 1)。

2.2.1 不同污泥龄下 LEPS的组分与表面性质

由图 3 可知, SRT 为 15 d 时, LEPS 有最小的产量, 平均值为 25.6 mg/g VSS; 蛋白质、多糖与腐殖质是 LEPS 中最主要的成分。DNA 的含量很低, 平均含量低于 3.6 mg/g VSS, 占 LEPS 总含量的质量百分比不高于 8%。

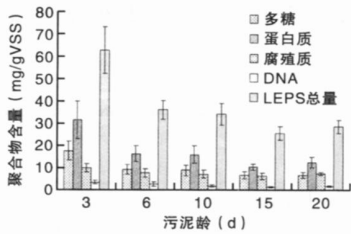


图 3 不同污泥龄下 LEPS的组分

LEPS 的疏水性与表面电荷随污泥龄的增大, 先逐渐增大后略微降低 (见图 4); SRT 为 15 d, 污泥有最大的疏水性与最低的表面负电荷数值, 其平均值分别为 28.1% 与 -0.77 meq/g EPS。LEPS 的疏水性与表面电荷表现出强的相关性 (见图 5), 相关系数为 0.672 ($P < 0.05$)。这是因为 LEPS 的表面负电荷与离子化的官能团有关, 如羧基、硫酸根与磷酸根^[4]; LEPS 表面负电荷增加, 其与水分子的极

化作用增强, 疏水性降低。这种相关性说明, LEPS 的表面电荷与疏水性相互之间可指示与推断对方变化的趋势。

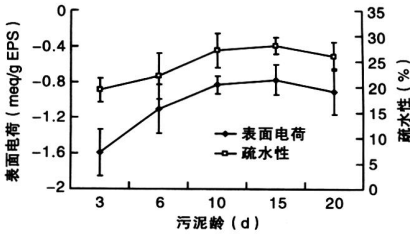


图 4 不同污泥龄下 LEPS的表面性质

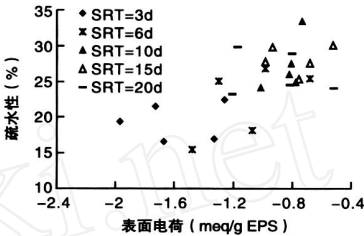


图 5 LEPS 的表面电荷与疏水性的关系 ($r_p = 0.672, P < 0.05$)

由图 6 可以看出, 多糖的疏水性随污泥龄的变化不大, 疏水性为 20% 左右; 蛋白质的疏水性随污泥龄的变化较大, 随污泥龄的增大表现出先增大后降低趋势, 平均疏水性在 17% 至 30% 之间; SRT 大于 10 d 时, 腐殖质的疏水性比较稳定, 平均值在 31% 至 35% 之间。

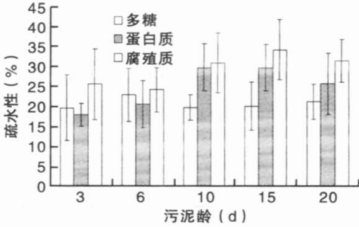


图 6 LEPS主要成份的疏水性

一般认为, 胞外聚合物的多糖含有丰乳糖、海藻糖、甘露糖、鼠李糖、糖醛酸等成分, 具有羟基、醛基与羧基等亲水性官能团, 为亲水性物质^[4]; 本文试验结果表明多糖仍具有 20% 左右的疏水性, 这说明 LEPS 中含有多糖异聚物, 如糖蛋白与脂多糖等, 部分多糖异聚物表现出疏水性。蛋白质的疏水性与丙氨酸、半胱氨酸、缬氨酸、异亮氨酸等疏水性氨基酸的含量有关^[14]; LEPS 中蛋白质疏水性随污泥龄改变而变化, 说明蛋白质中疏水性氨基酸的含量是变化的。腐殖质可分为富里酸、胡敏酸和胡敏素 3 类, 胡敏酸与富里酸是主要成分; 其中, 胡敏酸难溶于水与酸而表现出疏水性, 富里酸易溶于水与酸

而具有亲水性。LEPS中腐殖质疏水性随污泥龄的变化表明腐殖质的组成是变化的。此外,由 LEPS中腐殖酸的疏水性大于多糖和蛋白质的疏水性可以推断出,腐殖质的表面负电荷数值小于后两者。

2.2.2 LEPS对活性污泥沉降性能的影响

LEPS总数量及其组分对活性污泥沉降性能的影响见表 1。

表 1 LEPS组分同 SVI与 ZSV的相关系数 (r)^a

项目	SVI	ZSV ^b
多糖	0.759 ^b	-0.449 ^b
蛋白质	0.722 ^b	-0.559 ^b
腐殖质	0.548 ^b	-0.296
LEPS总量	0.803 ^b	-0.631 ^b

注:^a表示 25 批次测量;^b表示在 95%的置信区间内相关性是显著的。

从表 1可以看出,仅有腐殖质同 ZSV的相关性不显著($P > 0.05$),LEPS总数量及其蛋白质与腐殖质的含量同 SVI与 ZSV均为显著相关性。LEPS总数量及其蛋白质、多糖与腐殖质含量的增大,对应着 SVI的升高与 ZSV的降低,并且 LEPS及其主要成分的数量同 SVI的相关性大于同 ZSV的相关性。LEPS总数量同 SVI与 ZSV的相关系数分别为 0.803与 -0.631。LEPS表面性质对活性污泥沉降性能的影响见表 2,LEPS表面电荷与疏水性同 SVI与 ZSV均表现出显著相关性($P < 0.05$)。LEPS表面电荷与疏水性同 SVI表现出强相关性,相关系数分别为 -0.761与 -0.689;而它们同 ZSV的相关性较弱,相关系数分别为 0.576与 0.497。上述结果说明,LEPS的总数量、表面性质及其主要成分的含量是影响 SVI的重要因素;而它们对 ZSV的影响较弱。

表 2 LEPS表面性质同 SVI与 ZSV的相关系数 (r)^a

项目	SVI	ZSV
LEPS表面电荷	-0.761 ^b	0.576 ^b
LEPS疏水性	-0.689 ^b	0.497 ^b

注:同表 1注

在 5 种 SRT下,LEPS及其主要组分的疏水性平均值均小于 35% (见图 4与图 5),说明 LEPS中含有大量的带电或极性官能团。在氢键或取向力的作用下,LEPS能与水分子结合。LEPS能结合的水分子数量取决于 LEPS的总数量与表面性质:LEPS含量越大,则能与水分子结合的官能团的绝对数量越多;LEPS表面负电荷的数值越大或疏水性越低,则同水分子结合的官能团的相对数量越多。LEPS与大量的水分子结合,导致 LEPS的结构疏松,使污泥絮体压实性能变差,SVI值升高。因此,LEPS总数量与表面性质是影响 SVI的重要因

素。在 LEPS中,蛋白质与多糖的含量高于腐殖酸,且疏水性小于腐殖酸;因此,LEPS中多糖与蛋白质含量较腐殖酸含量同 SVI的相关性强。另一方面,LEPS结合水分子的数量越多,污泥絮体同水的密度差越小,泥水分离速度越慢,则 ZSV 值降低。LEPS的总数量与表面性质同 ZSV的相关性较弱,则说明除 LEPS外还有其它因素对 ZSV 有较大影响,如絮体颗粒的大小与形状的不规则性等^[5,6]。

2.3 TEPS对活性污泥沉降性的影响

2.3.1 不同污泥龄下 TEPS的组分与表面性质

由图 6看出,不同污泥龄下 TEPS总数量的变化不大,平均值均在 80 mg/g VSS左右。TEPS的组分随污泥龄的变化互不相同:蛋白质的平均含量由 3 d时的 47.7 mg/g VSS降低到 20 d时的 35.1 mg/g VSS;而多糖与腐殖质的含量则随污泥龄的增加逐渐增大,它们的平均含量由分别 3 d时的 16.6 与 11.3 mg/g VSS增大到 20 d时的 27.1 与 19.2 mg/g VSS。

由图 7可知,TEPS的疏水性随污泥龄的增大而迅速增大,平均值由 3 d时的 21.7%增大至 20 d时的 43.4%,大于相同 SRT下 LEPS的疏水性;而 TEPS的表面电荷随污泥龄的变化较小,平均值由 3 d时的 -1.26 meq/g EPS增大至 15 d时的 -1.02 meq/g EPS。对于 SRT为 6 d、10 d、15 d与 20 d的污泥絮体 (见图 3与图 7),TEPS的表面负电荷数值大于 LEPS。这是因为,两种 EPS的提取方法不一样,TEPS采用阳离子交换树脂提取,离子交换过程导致 TEPS大分子的负电荷官能团直接裸露或结合易电离的 Na^+ 离子,使其较 LEPS表现出带有更多的负电荷。

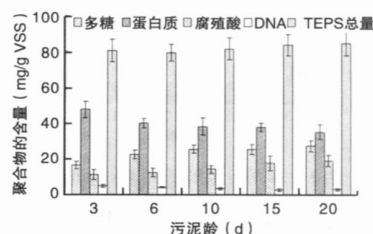


图 7 不同污泥龄下 TEPS的组分

TEPS的表面电荷与疏水性表现出弱相关性($r_p = 0.505$, $P < 0.05$),见图 8。SRT为 20d的 TEPS出现了高表面负电荷与高疏水性的两个异常点,即图 8中左上角两点;当不考虑这两点时,TEPS的表面电荷与疏水性有强相关性,相关系数为 0.729 ($P < 0.05$)。由图 9可以看出,在 TEPS的 3种主要

成分中,多糖的疏水性随污泥龄的变化不大,疏水性为 24%左右;蛋白质与腐殖质的疏水性随污泥龄的增大而逐渐增强,当 SRT 为 20d 时,蛋白质与腐殖质的平均疏水性分别为 50.6%与 53.7%。

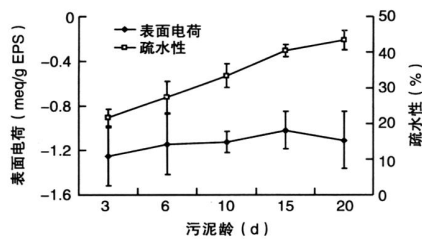


图 8 不同污泥龄下 TEPS 的表面性质

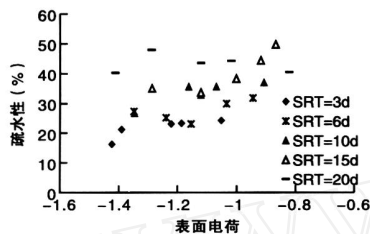


图 9 TEPS 的表面电荷与疏水性的关系 ($r_p=0.505, P<0.05$)

2.3.2 TEPS对活性污泥沉降性能的影响

TEPS总数量与组分对活性污泥沉降性能的影响见表 3。从试验结果可以看出,TEPS总数量同 SV I 与 ZSV 的相关性不显著 ($P>0.05$),说明 TEPS 总数量的变化不是引起 SV I 与 ZSV 改变的重要因素。除多糖与 ZSV 表现出强的正相关性外,TEPS 主要成分的数量同 SV I 与 ZSV 的相关性不显著或为弱相关性,说明 LEPS 主要成分的数量较 TEPS 主要成分的数量对 SV I 与 ZSV 的影响弱。

表 3 TEPS组分同 SV I 与 ZSV 的相关系数 (r)^a

项目	SV I	ZSV
多糖	-0.297	0.728 ^b
蛋白质	0.598 ^b	-0.359
腐殖质	-0.523 ^b	0.459 ^b
LEPS 总量	-0.109	0.088

注:同表 1 注。

TEPS表面性质对活性污泥沉降性能的影响见表 4。由表 4 可知,TEPS 的表面电荷同 SV I 与 ZSV 的相关性不显著 ($P>0.05$);而 TEPS 的疏水性同 SV I 表现出强相关性,相关系数分别为 -0.768 与 0.637。TEPS 主要成分较 LEPS 主要成份表现出更强的疏水性 (见图 10),说明 TEPS 的大分子含有较少的带电官能团或极性基团,通过氢键或取向力所结合的水分子数目较少,大分子之间或大分子与细菌细胞之间的结合更为紧凑。随着污泥龄的增大,TEPS 疏水性迅速增大,所结合的水分子减少,絮体

内部结构密实促进活性污泥沉降,对应着低的 SV I 与高的 ZSV;TEPS 疏水性同 SV I 的相关性大于同 ZSV 的相关性,进一步说明 EPS 对 SV I 的影响大于对 ZSV 的影响。

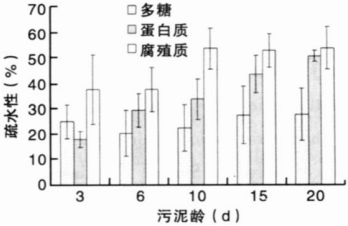


图 10 TEPS 主要成份的疏水性

表 4 TEPS 表面性质同 SV I 与 ZSV 的相关系数 (r)^a

项目	SV I	ZSV
TEPS 表面电荷	0.365	-0.107
TEPS 疏水性	-0.768 ^b	0.637 ^b

注:同表 1 注。

3 结论

本文采用超声波提取法与阳离子交换树脂提取法分别提取 LEPS 与 TEPS,考察两部分 EPS 的组分与表面性质对活性污泥沉降性能的影响。在本试验条件下,得到以下结论:

1)污泥龄对 LEPS 与 TEPS 的总数量的影响不同。SRT 为 15 d 时,LEPS 的产量最小,该值为 25.6 mg/g VSS;而不同污泥龄下 TEPS 总数量的变化不大,平均值均在 80mg/g VSS 左右。

2)LEPS 与 TEPS 的表面电荷与疏水性随污泥龄的增大逐渐增大,在同一 SRT 下,TEPS 的疏水性大于 LEPS 的疏水性。

3)LEPS 的组分及其表面性质是影响活性污泥沉降性能的重要因素,LEPS 的总数量增加及其表面电荷与疏水性的降低,对应着 SV I 的升高与 ZSV 的降低。

4)TEPS 的总数量同 SV I 与 ZSV 没有显著的相关性;而 TEPS 的疏水性同 SV I 与 ZSV 有强的相关性,其疏水性的增大对应着低的 SV I 与高的 ZSV。

参考文献

[1] Bo Jin, Britt-Marie Wilén, Paul Lant Impacts of Morphological, Physical and Chemical Properties of Sludge Flocs on Dewaterability of Activated Sludge[J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 98 (1): 115-126.

[2] Urbain, V., Block, J. C., Manem, J. Biofloculation in Activated Sludge: An Analytic Approach [J]. Water Research, 1993, 27 (5): 829-838.

[3] Liao B, Q, Allen D G, Droppo, I G et al Surface Properties of

- Sludge and Their Role in Bioflocculation and Settability [J]. Water Res, 2001, 35 (2): 339-350.
- [4] Benetti, Antonio Domingues Composition, Fate and Transformation of Extracellular Polymers in Wastewater and Sludge Treatment Processes [M]. USA: PHD Dissertation, 2002: 4-32.
- [5] Britt-Marie Wilén, Bo Jin, Paul Lant The Influence of Key Chemical Constituents in Activated Sludge on Surface and flocculating properties [J]. Water Research, 2003, 37 (9): 2127-2139.
- [6] Bo Jin, Britt-Marie Wilén, Paul Lant A Comprehensive Insight into Floc Characteristics and Their Impact on Compressibility and Settability of Activated Sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 95 (1): 221-234.
- [7] Beccari, M., Mappelli, P., Stuckey, D. C. A Review of Soluble Microbial Product (SMP) in Wastewater Treatment Systems [J]. Water Research, 1999, 33 (14): 3063-3082.
- [8] 龙腾锐, 罗太忠, 龙向宇, 等. 超声波-阳离子交换树脂法提取污泥胞外聚合物的研究 [J]. 给水排水, 2008, 27 (5): 34-37.
- [9] 龙向宇, 龙腾锐, 唐然, 等. 阳离子交换树脂提取活性污泥中胞外聚合物的研究 [J]. 中国给排水, 2008, 24 (3): 29-33.
- [10] Akio Inai, Takehiko Fukushima, Kazuo Matsushige Fractionation and Characterization of Dissolved Organic Matter in a Shallow Eutrophic Lake, Its Inflowing Rivers, and Other Organic Matter Sources [J]. Water Res, 2001, 35 (7): 4019-4028.
- [11] F. Jorand, F. Boué-Bigne, J. C. Block *et al* Hydrophobic/hydrophilic Properties of Activated Sludge Exopolymers Substances [J]. Wat Sci Tech, 1998, 37 (4): 307-315.
- [12] Lene Haugaard Mikkelsen Applications and Limitations of the Colloid Titration Method for Measuring Activated Sludge Surface charges [J]. Water Research, 2003, 37 (10): 2458-2466.
- [13] Sutherland I W. Biosynthesis and Composition of Gram Negative Bacterial Extracellular and Wall Polysaccharides [J]. Annual Review of Microbiology, 1985, 39 (2): 243-270.
- [14] M.-F. Dignac, V. Urbain, D. Rybacki, *et al* Chemical Description of Extracellular Polymers: Implication on Activated Sludge Floc Structure [J]. Wat Sci Tech, 1998, 38 (1): 45-53.

作者简介: 龙向宇 (1979-), 男, 湖南人, 重庆大学博士研究生, 研究方向为水污染控制与规划, 发表论文 8 篇。

(上接第 14 页)

4 结论

1) 灰霾天气具有很强的局地性。天津东丽区、市区与津南区为天津灰霾的多发区, 处于天津的上风方武清区、北辰区等地为灰霾的少发区, 年灰霾日数与多发区相差 3 倍以上。

2) 我国北方城市冬、夏两季燃煤量的差异造成大气环境质量变化很大, 气溶胶谱分布随季节的变化原因在于冬季取暖燃煤增加所致^[8]。天津的灰霾天气也呈现出明显的季节变化, 冬季偏多, 春季和夏季灰霾较少, 这除了与冬季取暖的燃煤污染密切相关外, 还与气象因素有关。天津冬季降水稀少, 空气干燥, 空气中污染物易于滞留于近地面层, 致使空气污染明显加重^[9]。而春季多大风天气, 污染物容易扩散, 夏季的多雨, 多对流天气, 利于污染物的冲刷与扩散。

3) 从灰霾日数的年际变化规律可以看出, 灰霾天气与经济发展具有密切的关系。20 世纪 90 年代以来天津经济快速发展, 市区和塘沽区灰霾日数处于较高的水平, 特别是 2001 年以后, 灰霾日数快速增加, 已经超过了 80 年代初期。近几年武清区的灰霾日数也快速增加, 2006 年达到历史最高值。

4) 灰霾日数与风速、绝对湿度 (水汽压)、降水量、气压等气象要素具有密切的关系。与风速、绝

对湿度 (水汽压)、降水量等呈负相关, 与气压呈正相关。也就是说, 在高气压控制时, 通常是晴朗的天气, 日照较强烈、湿度较低, 如果遇到风速较小或静风时, 容易出现灰霾天气。

参考文献

- [1] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲气溶胶云造成的严重灰霾天气 [J]. 自然灾害学报, 2006, 15 (6): 77-83.
- [2] The Asian Brown Cloud: Climate and Other Environmental Impacts: Part I: The South Asian Haze: Air Pollution, Ozone and Aerosols UNEP Assessment Report, 2002.
- [3] 徐祥德, 施晓晖, 张胜军, 等. 北京及周边城市群气溶胶影响域及其相关气候效应 [J]. 科学通报, 2005, 50 (22): 2522-2530.
- [4] 张保安, 钱公望. 中国灰霾历史渊源和现状分析 [J]. 环境与可持续发展, 2007, 1: 56-58.
- [5] 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降 [J]. 热带气象学报, 2007, 23 (1): 1-6.
- [6] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究 [J]. 气象学报, 2006, 64 (4): 510-517.
- [7] 吴兑. 霾与雾的区别和灰霾天气预警建议 [J]. 广东气象, 2004, 4: 1-4.
- [8] 徐祥德, 汤绪. 城市化环境气象学引论 [M]. 北京: 气象出版社, 2002: 139-170.
- [9] 解辉. 天津市大气污染现状及对策研究 [J]. 灾害学, 2001, 16 (4): 13-17.

作者简介: 郭军 (1966-), 男, 河北省沧州人, 学士, 高级工程师, 主要从事气候变化与短期气候预测研究, 发表论文 20 余篇。