

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓,刘峻峰,陶玮,陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪,孔少飞,王伟,严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾,廖晓农,王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮,李云婷,张大伟,陈添,魏强,孙彤卉,王步英,富佳明,何乐为,程兵芬,皮帅,马立光,崔继宪,孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博,李治国,路娜,徐曼,杨鹏,高康宁,王建国,靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕,贺光艳,罗彬,陈建文,王斌,杜云松,杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟,王红磊,李莉,吕升,袁婧,张孝寒,章国骏,王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍,胡恭任,于瑞莲,刘贤荣,胡起超,王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险:以贵阳市为例	李晓燕,汪浪,张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思,于爽,黎泳珊,孙平安,何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH ₃ 和N ₂ O)减排效果比较:以夏玉米季为例	范会,姜姗姗,魏茨,蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国,周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 分压特征分析	张军伟,雷丹,肖尚斌,张成,穆晓辉,刘佳,李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨,刘汉安,高学平,张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应:以兰陵溪小流域为例	
吴东,黄志霖,肖文发,曾立雄,韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究:以洱海北部流域为例	项颂,庞燕,储昭升,胡小贞,孙莉,薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响:以草堂河为例	王晓彤,罗光富,操满,王雨春,汪福顺,邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠,黄青飞,钱靖,殷晓曦,韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤,胡亚伟,宋常吉,彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思,雷利国,江长胜,黄哲,范志伟,郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静,郑丙辉,刘录三,马迎群,林岗璇,汪星,夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇,张鸿,罗骥,张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价	卫亚宁,潘佳钊,宋玉梅,郭鹏然,王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟,胡玮璇,庞树江,王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁,曹磊 (3026)
甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱,孙玉川,王尊波,梁作兵,张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征	昌盛,赵兴茹,刘琰,耿梦娇,肖晋翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚,孙玉川,谢正兰,余琴,赵瑞一,梁作兵 (3049)
Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌,黄华玲,郭露,陈巧珍,阮聪颖,冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥,迟惠中,宋阳,罗从伟,江进,马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川,向星光,曾晓岚,厉晓宇,梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪,周泽宇,王洪涛 (3079)
单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制	阳海,魏宏庆,胡乐天,胡倩,阳立平,刘华杰,易翔,易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航,朱强,朱亮,李祥,黄勇,魏凡凯,杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春,于长富,张静,陈晓轩,张磊,杨景亮 (3101)
ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良,张婷 (3108)
活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探	李祥,林兴,杨朋兵,黄勇,刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动	顾书军,方芳,李凯,刘勇,郭劲松,陈猷鹏,蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能	马娟,宋璐,俞小军,李璐,孙雷军,孙洪伟,李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江,赵媛,张源凯,王洪臣,齐鲁,尹训飞,张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲,吴泉源,吕建树,董玉龙,曹文涛,康日斐,曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理,傅伟军,叶正钱,戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳,李哲,者渝芸,黄杰,梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫,杨军,饶伟,王代长,杜光辉,化党领,刘世亮,刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健,雷明婧,王平,张伟丽,陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东,刘荟,张银婷,杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩,李正魁,张一品,韩华杨,王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性	
张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,王芳,王代长,蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新,苏志忠,邢红恩,王发园,石兆勇,刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南,闫振广,余若祯,王婉华,陈丽红,刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳,陈胜,万堃,王春明,林惠荣,于鑫 (3224)
不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉,周龙,龙光强,汤利 (3229)
《环境科学》征订启事(3025) 《环境科学》征稿简则(3057) 信息(3072, 3085, 3143)	

活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响

何志江¹, 赵媛², 张源凯¹, 王洪臣^{1*}, 齐鲁¹, 尹训飞¹, 张晓军¹

(1. 中国人民大学环境学院, 北京 100872; 2. 北京市通州区水务局, 北京 101100)

摘要: 为了研究污水处理厂活性污泥表面性质对絮凝性能(flocculation ability, FA)和出水悬浮物(effluent suspend solid, ESS)的影响,测定了北京市 7 个不同污水处理厂活性污泥的表面性质,包括污泥容积指数(sludge volume index, SVI)和胞外聚合物(extracellular polymeric substance, EPS)中的蛋白质/多糖(protein/carbohydrate, P/C)比例、Zeta 电位以及二维分形维数(two-dimensional fractal dimension, D_{2f}),并且通过相关性分析和拟合,探讨了这几个参数与活性污泥的 FA 和 ESS 的关系。结果表明,SVI 与活性污泥的 FA 和 ESS 并不存在明显的相关关系,但 FA 和 ESS 存在明显的负线性相关关系($R^2 = 0.787$);当 EPS 中的 P/C 从 1.28 增加到 25.34 时,FA 可从 0.19 增加到 0.73,ESS 从 $14.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $6.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,蛋白质中的氨基带有正电荷能够中和絮体表面的负电荷,其在 EPS 中所占的比例越大,有利于降低表面 Zeta 电位的绝对值和形成更稳定的絮体结构,进而提高絮凝能力。而且,Zeta 电位与活性污泥的 FA 和 ESS 分别存在负线性相关($R^2 = 0.883$)和正线性相关($R^2 = 0.902$),当 Zeta 电位的绝对值每减小 1 mV,FA 提高 0.059,ESS 减少 $0.934 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。此外,活性污泥的 D_{2f} 与 FA 基本上呈现指数关系($R^2 = 0.935$, $P < 0.01$),当 D_{2f} 从 1.10 增加到 1.45,FA 提高了 4.3 倍,而同时 D_{2f} 与 ESS 具有较好的负线性相关($R^2 = 0.868$)。

关键词: 絮凝能力; 出水悬浮物; 污泥容积指数(SVI); 胞外聚合物; Zeta 电位; 分形维数

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3135-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.08.040

Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid

HE Zhi-jiang¹, ZHAO Yuan², ZHANG Yuan-kai¹, WANG Hong-chen^{1*}, QI Lu¹, YIN Xun-fei¹, ZHANG Xiao-jun¹

(1. School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. Tongzhou Water Authority of Beijing, Beijing 101100, China)

Abstract: In this paper, the influence of the surface properties of the activated sludge on flocculating settling and ESS was studied in seven different sewage treatment plants in Beijing, such as the sludge volume index (SVI), the protein/carbohydrate (P/C) ratio in extracellular polymeric substance, Zeta potential, two-dimensional fractal dimension (D_{2f}). The relationships between the surface properties of the activated sludge and flocculation ability (FA) or effluent suspend solid (ESS) were also analyzed. The results showed that no obvious correlation was obtained between SVI and FA or ESS, but obvious negative correlation between the FA and ESS ($R^2 = 0.787$) was observed. When the P/C increased from 1.28 to 25.34, the FA could increase from 0.19 to 0.73 correspondingly, but the ESS decreased from $14.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $6.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. This was because the amino acids in protein with positive charge could neutralize the negative charge on the surface of floc, the increase of protein ratio in EPS could decrease the absolute value of Zeta potential, which made a contribution to form more stable floc structure, and improved the ability of flocculation. Moreover, the Zeta potential had a positive correlation with FA but a negative correlation with ESS. The absolute value of Zeta potential decreased by 1 mV, FA increased by 0.059 and ESS decreased by $0.934 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ correspondingly. In addition, there was an obvious index correlation ($R^2 = 0.935$, $P < 0.01$) between D_{2f} and FA; While D_{2f} increased from 1.10 to 1.45, FA could increase by 4.3 times and ESS decreased linearly ($R^2 = 0.868$).

Key words: flocculating ability; effluent suspended solids; sludge volume index (SVI); extracellular polymeric substances; Zeta potential; fractal dimension

在传统的活性污泥污水生物处理系统中,活性污泥的成层沉降和浓缩过程对二沉池的设计和运行中起着至关重要的作用,描述其两种过程的模型包括线性、指数、幂函数和多项式等^[1~5]。然而却往往忽略了与成层沉降和浓缩同等重要的絮凝澄清过程,由于污泥的絮凝澄清发生在污泥层以上部分,如果二沉池的絮凝澄清过程效果不佳,将会导致出水悬浮物 (effluent suspend solid, ESS) 超标,因为 1

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 ESS 相当于 $0.08 \sim 0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的总氮 (TN) 和 $0.02 \sim 0.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的总磷 (TP), $0.3 \sim 1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 BOD_5 和 $0.8 \sim 1.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 COD,一旦

收稿日期: 2015-09-01; 修订日期: 2015-10-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2013ZX07314-001)

作者简介: 何志江 (1991 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制治理, E-mail: 18046043293@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wetrlruc@hotmail.com

ESS 不达标,不仅会导致出水 TP 的不达标^[6],而且会造成污泥的流失,导致的回流污泥量的减少,进而影响生物反应池对污染物的降解. 根据大量的数据统计,大部分的市政污水处理厂都有超过 20% 的运行时间是处于这种不达标状态^[7].

国内外关于活性污泥的絮凝澄清研究鲜见报道,文献[8]研究了 20 个瑞典污水处理厂活性污泥在平流式二沉池的澄清过程,他们采用一个直径 140 mm,高度为 1500 mm 的圆形沉降管进行污泥澄清试验,测定污泥层以上部分清水区的浊度,发现清水区的浊度随着污泥容积比(sludge volume, SV)的增大而减小,当 $SV > 200 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 的时候,清水区的浊度有显著的减少. 二沉池中污泥层上清液的浊度或者 ESS 主要是受到池子结构、运行工况和活性污泥本身性质的影响,在池子结构和运行工况不变的情况下,污泥本身性质会通过影响其絮凝沉降性能成为制约出水的浊度和 ESS 的关键因素^[9].

关于活性污泥絮凝机理的动力学研究,有学者提出活性污泥絮凝的两种机制:①聚合物的架桥理论^[10];②双电层理论^[11],强调了表面性质在活性污泥絮体絮凝过程中的重要性. 但是,至今仍然不清楚活性污泥絮体在絮凝过程中由哪种机制占据主导,有可能两种作用同时发生,也有可能是一前一后,造成这种差异是由于絮体的表面性质的不同. 聚合物的架桥理论认为:污泥絮体细胞表面的胞外聚合物(extracellular polymeric substance, EPS)带有负电荷,通过与二价或三价阳离子的相互吸引作用而形成聚合物^[12],这个理论已被学者所证实,在去除污泥表面的二价和三价离子之后,活性污泥絮体就会发生破裂^[13],然而前人的研究对 EPS 在污泥絮体絮凝过程中的作用还未形成一致的结论^[14,15];污泥絮体之间的相互作用可以用双电层理论来描述^[16],由于电子层引起的范德华力和静电排斥力可以描述污泥絮体之间的相互作用,而 Zeta 电位代表表面扩散双电层的电势差,可用其来定量表征;根据调研^[17],污泥絮体的形态结构也是絮凝的关键影响因素,然而分形维数对活性污泥 FA 的研究仍然较少. Liao 等^[18]认为污泥的表面性质在污泥的絮凝中发挥巨大作用,因此该文就是为了深入探讨污泥表面性质对其絮凝沉降性能(用絮凝能力表征, flocculating ability, FA)的影响,进而影响 ESS,主要包括以下宏观和微观的角度:①探讨表征活性污泥综合性质的污泥容积指数(sludge volume index, SVI)对 FA 和 ESS 的影响;②从细胞层面探讨絮体

表面的 EPS 中蛋白质/多糖比例(protein/carbohydrate, P/C)对 FA 和 ESS 的影响;③从活性污泥的物理特性探讨 Zeta 电位对 FA 和 ESS 的影响;④从活性污泥的形态特征探讨污泥絮体的二维分形维数(two-dimensional fractal dimension, D_{2f})对 FA 和 ESS 的影响. 通过系统全面地分析活性污泥 FA 和 ESS 的影响因素,以期污水处理厂 ESS 的稳定达标排放提供有价值的参考.

1 材料与方法

1.1 污泥来源

活性污泥样品取自北京的 7 个城市污水处理厂(主要是处理生活污水),活性污泥样品取自曝气池末端,并将其放在塑料容器中运回实验室检测,污泥表面性质的分析都有 3 个平行样,且都在 12 h 之内完成.

采用各自的上清液将所有的污泥样品稀释至 $3\ 000 \sim 3\ 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.2 分析方法

1.2.1 SVI 的测定

(1) 污泥沉降比的测定

量取充分混合均匀的污泥混合液 100 mL 于 100 mL 的量筒中,待沉降 30 min 后,记录污泥体积 V_1 ,沉降体积比即为: $V\%$.

(2) 污泥浓度的测定,参考国标法(CJ/T 221-2005)测定,记为 MLSS,单位 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

(3) 结果表示

$$\text{SVI}(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}) = (V\% \times 10^6) / \text{MLSS}$$

1.2.2 EPS 的提取与测定

污泥表面 EPS 的提取方法有很多,常见的物理方法包括高速离心^[19]、超声波^[20]和热提取^[21]. 虽然对 EPS 的提取方法已有很多的探讨,但是由于试验对象和试验条件的差异,各种方法的提取结果还缺乏可靠性的验证,而且每个方法都有各自的优缺点,而热提取法也是目前报道最多,操作简便且效果较好的一种方法,因此该试验选用热提取法提取污泥中的 EPS^[22]. EPS 中的蛋白质和多糖中的带电基团对絮凝的影响较大^[23],因此该试验只测定蛋白质和多糖含量,蛋白质的测定采用 Lowry 法^[24],多糖的测定采用苯酚-硫酸法^[25].

1.2.3 Zeta 电位的测定^[26]

采用 DelsaNano C/Solid Surface 固体表面 Zeta 电位分析仪测量 Zeta 电位,活性污泥样品适宜采用自然沉淀后的上层溶液测量 Zeta 电位. 取上清液

注入样品池,进行 3 次测定,结果取平均值。

1.2.4 D_{2f} 的测定^[27]

根据分形理论,具有分形结构的物体表面面积 A 与其特征长度 R 之间具有如下关系:

$$A \propto R^{D_{2f}}$$

式中, D_{2f} 为二维分形维数,表征分形体的不规则性或空间密实程度,特征长度 R 一般取周长。

将活性污泥絮体稀释分散至装有去离子水的载

玻片中,由电脑型透反偏光显微镜(XPV-600E)进行拍摄图像(放大 100 倍);应用图像处理软件 Image-Pro Plus 6.0 对图像进行二值化处理,并计算絮体的面积 A 、周长 P ;基于分形理论,絮体的 D_{2f} 可由 $\lg(A)$ - $\lg(P)$ 拟合得到。 $\ln A$ - $\ln P$ 拟合得到的两种活性污泥的 D_{2f} 分别为 1.197 和 1.278(图 1),且拟合的线性相关系数均大于 0.97,说明该试验选取的活性污泥絮体都具有较明显的分形结构。

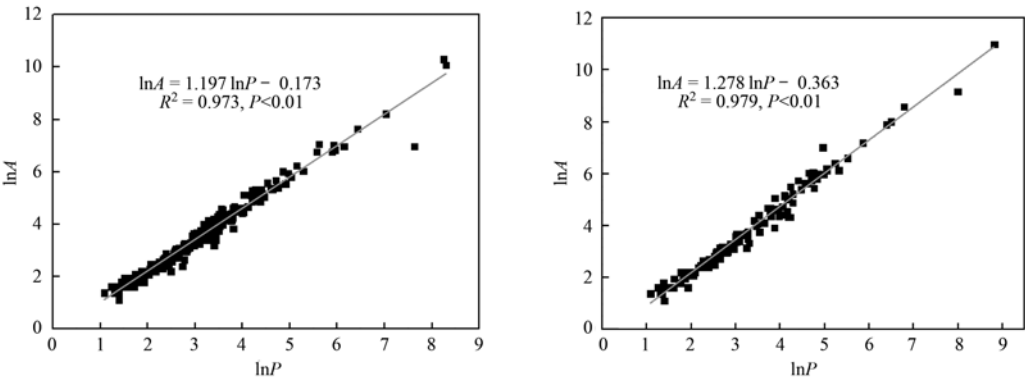


图 1 活性污泥絮体二维分形维数的拟合
Fig. 1 Fitting of two-dimensional fractal dimension of activated sludge flocs

1.2.5 FA 的测定

取 80 mL 污泥样品置入冰水浴中在 48 W 的超声波下(超声强度 $0.6\text{ W}\cdot\text{mL}^{-1}$)处理 30 s,将 10 mL 悬浮液在 $1\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心分离 2 min,550 nm 下测量上清液吸光度(A);将其他悬浮液于室温下 $60\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 磁力搅拌 15 min,取 10 mL 悬浮液在 $1\,200\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 下离心分离 2 min,测量上清液吸光度(B)^[17]。计算公式为:

$$FA = \frac{A - B}{A} \quad (1)$$

1.2.6 ESS 的测定

取活性污泥混合液 1 000 mL,经 10 min 慢速搅

拌($60\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)后置于 1 000 mL 量筒中沉降 30 min,慢速抽取 600 mL 上清液采用 AquaSensors AquaSol 在线悬浮物浓度计测量悬浮物固体浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[28],在线测定 3 min,然后取其平均值。

2 结果与分析

2.1 活性污泥表面性质的测定结果

7 个城市污水处理厂的运行参数和活性污泥的表面性质的测定结果如表 1 所示,SRT 在 11 ~ 35 d 之间,在典型污水厂的泥龄范围之内,不同水厂的活性污泥的 EPS 含量、FA、Zeta 电位等具有较大的差异。

表 1 不同水厂污泥的指标参数

Table 1 Characteristic parameters of activated sludge from different WWTPs						
水厂	SRT/d	MLSS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	MLVSS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	VSS/SS/%	SV/mL	SVI/ $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$
A	22	$3\,835 \pm 21$	$2\,693 \pm 20$	70.222	237 ± 7	61.799 ± 1.734
B	35	$13\,340 \pm 55$	$10\,126 \pm 29$	75.907	999 ± 9	74.890 ± 2.546
C	12	$4\,223 \pm 33$	$2\,880 \pm 18$	68.198	938 ± 5	222.120 ± 2.895
D	11	$4\,567 \pm 36$	$3\,604 \pm 25$	78.914	708 ± 4	155.000 ± 4.367
E	25	$5\,117 \pm 27$	$3\,973 \pm 45$	77.643	846 ± 3	165.347 ± 2.773
F	13	$3\,485 \pm 17$	$2\,591 \pm 40$	74.347	340 ± 5	97.575 ± 3.214
G	15	$5\,143 \pm 40$	$2\,486 \pm 32$	48.338	939 ± 3	90.070 ± 1.835
水厂	FA	EPS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	P/C	Zeta 电位/mV	D_{2f}	ESS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
A	0.455 ± 0.031	110.726 ± 5.627	5.075	-9.041 ± 0.123	1.142 ± 0.106	13.199 ± 1.012
B	0.502 ± 0.042	178.459 ± 7.265	9.369	-8.027 ± 0.312	1.190 ± 0.093	12.370 ± 0.713
C	0.290 ± 0.023	105.441 ± 5.129	3.764	-9.523 ± 0.097	1.133 ± 0.085	14.736 ± 0.722
D	0.190 ± 0.040	97.645 ± 5.013	1.290	-12.690 ± 0.278	1.122 ± 0.113	14.888 ± 0.906
E	0.660 ± 0.051	325.823 ± 9.376	21.329	-4.715 ± 0.185	1.351 ± 0.076	10.210 ± 0.504
F	0.730 ± 0.022	366.219 ± 7.589	25.342	-2.222 ± 0.124	1.410 ± 0.109	6.080 ± 0.501
G	0.576 ± 0.052	252.297 ± 10.258	10.316	-7.191 ± 0.236	1.198 ± 0.122	11.726 ± 0.810

2.2 活性污泥表面性质的相关性分析

通过对 7 个不同污水处理厂的活性污泥的表面

性质和絮凝能力与 ESS 进行线性或者非线性拟合分析,结果如表 2 所示.

表 2 各个指标之间的相关性系数统计

Table 2 Coefficient of correlation between the surface properties and FA or ESS

项目	相关性系数	SVI	EPS 总量	蛋白质含量	多糖含量	P/C	Zeta 电位	D_{2f}
FA	R^2	— ¹⁾	0.867	0.881	0.664	0.848	0.883	0.935
ESS	R^2	—	0.829	0.876	0.404	0.884	0.902	0.868

1) 表示相关性系数小于 0.300

SVI 与 FA 和 ESS 的相关性系数小于 0.03,多糖含量与 FA 和 ESS 的相关性较弱,其他的污泥表面性质的指标与 FA 和 ESS 的相关性系数都在 0.800 以上,具有较好的相关性.

3 讨论

3.1 SVI 对 FA 和 ESS 的影响

前人的研究大都集中在絮体结构与 SVI 的关系

上^[29,30],而活性污泥处理厂的 ESS 往往被忽略,因此本文探讨了 SVI 与 FA 和 ESS 的关系.

从试验结果可以看出,SVI 与 FA 和 ESS 并不存在明显的相关性,随着 SVI 值得增大,FA 和 ESS 的随机波动较大(图 2),而 FA 与 ESS 呈现明显的负相关关系(图 3),FA 的增强有利于降低 ESS,直接证明了 Li 等^[9]认为污泥的絮凝澄清效率对 ESS 起到关键作用的观点.

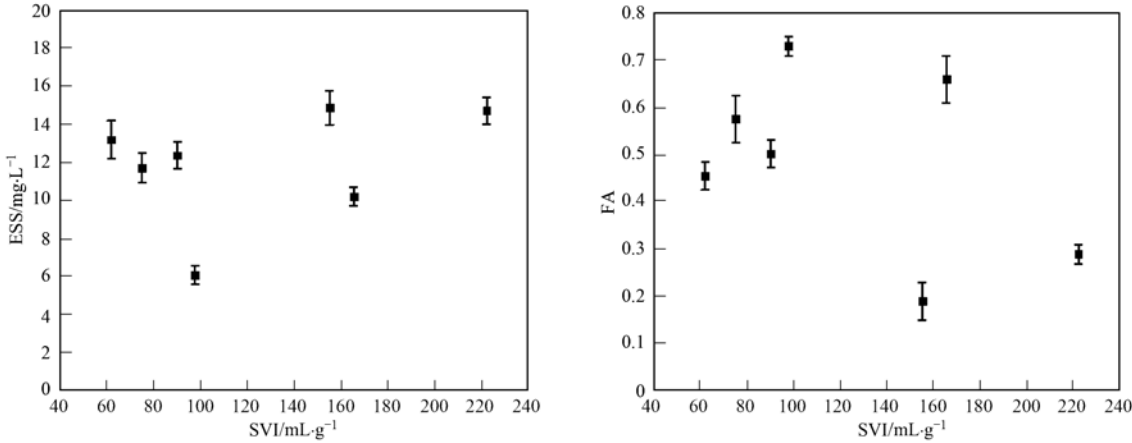


图 2 SVI 对 FA 和 ESS 的影响
Fig. 2 Influence of SVI on FA and ESS

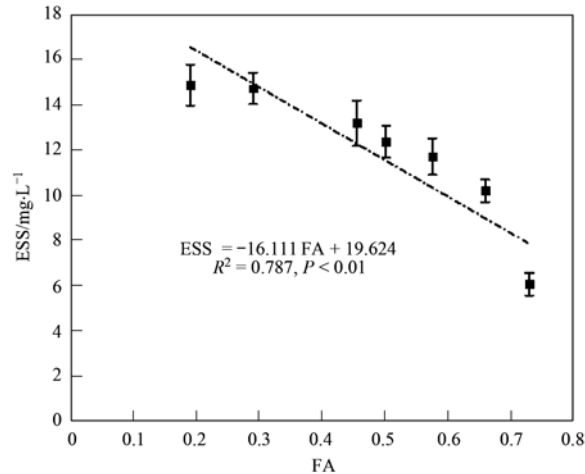


图 3 絮凝能力 (FA) 与 ESS 的关系
Fig. 3 Relationship between FA and ESS

根据文献[31]报道,SVI 是反映污泥的成层与压缩沉降性能综合性质的一个指标,该试验基于试验数据的基础上说明了 SVI 在表征污泥的澄清性能方面仍有缺陷,SVI 不能用来预警 ESS 超标的问题,Koivuranta 等^[32]研究表明 SVI 虽然能预警污泥膨胀的问题,但是发生膨胀的污泥的 ESS 仍然较低,ESS 与污泥的絮凝能力更为紧密相关.有的研究表明具有良好絮凝能力的污泥有利于降低 ESS^[18,33],但是具有较强絮凝能力污泥的成层沉降性能并不是很好,说明了泥水分离中污泥沉降性能和絮凝能力虽然存在着交叉地带,但确是两种不同的现象,应该更细致地区分污泥的絮凝澄清和沉降浓缩过程,结合前人的研究结果和该试验发现,在实际的工程中可建议用 SVI 来调控二沉池污泥的沉降浓缩过程,而用污泥的絮凝能力调控污泥的澄清过程,从而有效

地控制二沉池的 ESS.

3.2 EPS 对 FA 与 ESS 的影响

活性污泥表面带有负电荷,与 EPS 中蛋白质和多糖含有的功能基团有关,比如氨基、羧基和磷酸盐等发生电离作用^[23],根据经典的双电层理论,表面负电荷的增加将会提高絮体表面之间的静电排斥力,进而阻碍絮体之间的絮凝^[11],蛋白质中的氨基一般带正电荷,多糖中的羧基一般带负电荷,若 EPS 的蛋白质含量越高,就能够降低污泥表面的负电荷,使得絮体之间的排斥力降低,有利于污泥絮体的絮凝,而多糖的作用正好与蛋白质相反.如图 4 和图 5 所示,FA 随着 EPS 总量和蛋白质含量的增大而增

加,进而降低 ESS,两者对于活性污泥 FA 的影响呈现出较好的一致性,Govoreanu^[34]也认为 EPS 总量与污泥的絮凝沉降性能呈正相关性,相反地,多糖含量与 FA 呈现一定的负相关性,相关的研究结果也有类似的结论^[35,36].此外,P/C 在 1~25 的范围内,随着 P/C 比例的增加,一方面蛋白质所带有的正电荷能够中和污泥絮体表面的一部分负电荷,使得絮体之间的排斥力减小,另一方面污泥的疏水性随着 EPS 中蛋白质含量的升高而升高^[37],进而增大污泥絮体的絮凝能力,且两者具有较好正线性相关($R^2=0.848$),P/C 的比例增加 1 个单位,FA 就能提高 0.021,若 P/C 从 1 增加到 10,FA 可增加 72%,足以说明蛋白质在活性污泥絮凝过程中的重要性,这与 Higgins 等^[13]的研究结论一致,他们去除活性污泥絮体表面的蛋白质之后 FA 大大降低. Murthy 等^[38]认为由于 EPS 的架桥作用连接了由于静电斥力形成的空隙,使微生物形成了絮凝早期的较松散的结构,当 EPS 合成量继续增加且蛋白质含量的比例增大时,就会使微生物之间紧密结合,降低絮体之间的静电排斥力,从而促进絮凝.该试验的研究结果与之相似,可以推测 EPS 的吸附架桥机制是重要的活性污泥絮凝机制之一.

从图 5 可以看出,P/C 比例的增加也能降低 ESS 值,可能是由于 FA 的提高,使得絮体的澄清分离效果变好,P/C 比例与 ESS 也存在着较好的负相关关系($R^2=0.884$),如 P/C 从 1 增加到 10,ESS 可减少 19%.

3.3 Zeta 电位对 FA 和 ESS 的影响

微生物细胞、EPS 和活性污泥絮体由于阴离子基团的离子化作用都带有负电荷,可以通过 Zeta 电位来表征^[39],Zeta 电位代表表面扩散双电层的电势差,Boyette 等^[40]认为污泥絮体表面的 Zeta 电位可以表征絮体边界的电势差.

Zeta 电位对于活性污泥絮体的形成和稳定性非常重要,活性污泥絮体中的 Zeta 电位都是负值,絮体中相邻的细胞都是通过架桥作用紧密结合.然而,前人的研究结果没有形成一致的结论,备受争议. McKinney^[41]发现 Zeta 电位绝对值的减少对絮体的形成没有直接的影响; Liao 等^[18]报道在活性污泥中带有表面负电荷越少越有利于降低出水的浊度.有研究表明大部分污泥絮体表面的 Zeta 电位都在 $-10 \sim -30$ mV 之间^[42],但是该研究的 Zeta 电位在 $-2 \sim -13$ mV 之间,这种差异的存在可能是由于不同的泥源和性质所致.从图 6 可以看出,Zeta

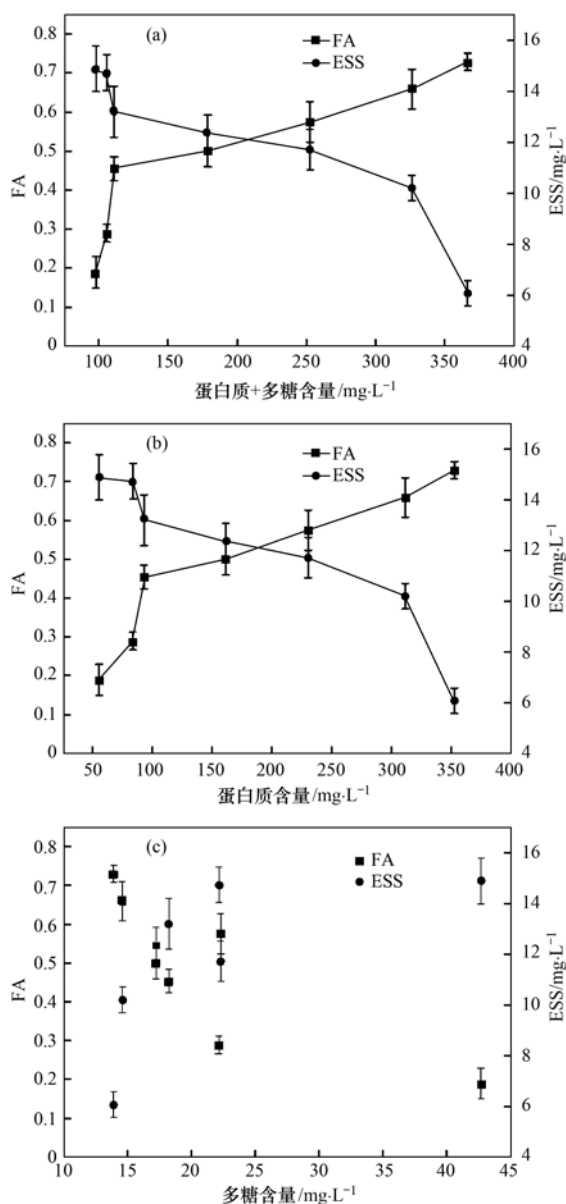


图 4 EPS 总量、蛋白质含量和多糖含量对 FA 和 ESS 的影响

Fig. 4 Influence of quantities of EPS, protein, carbohydrate on FA and ESS

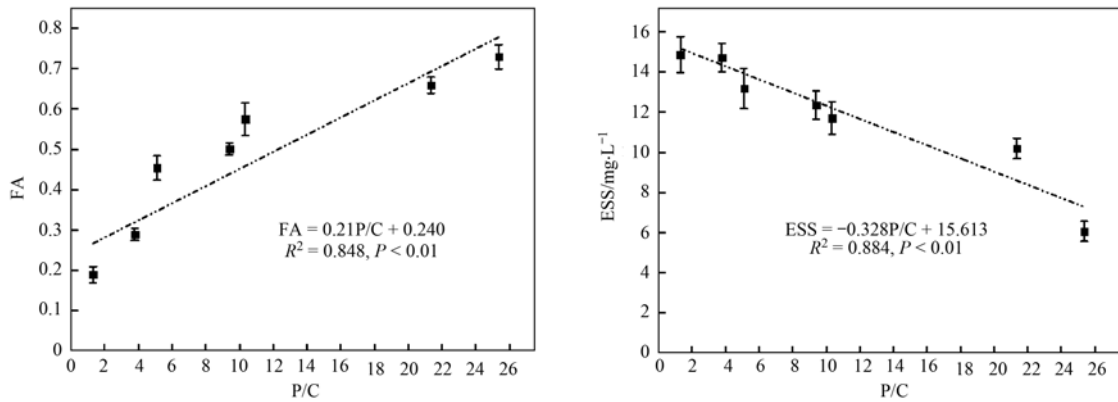


图5 EPS 中的 P/C 比例对 FA 和 ESS 的影响

Fig. 5 Influence of P/C ratio in EPS on FA and ESS

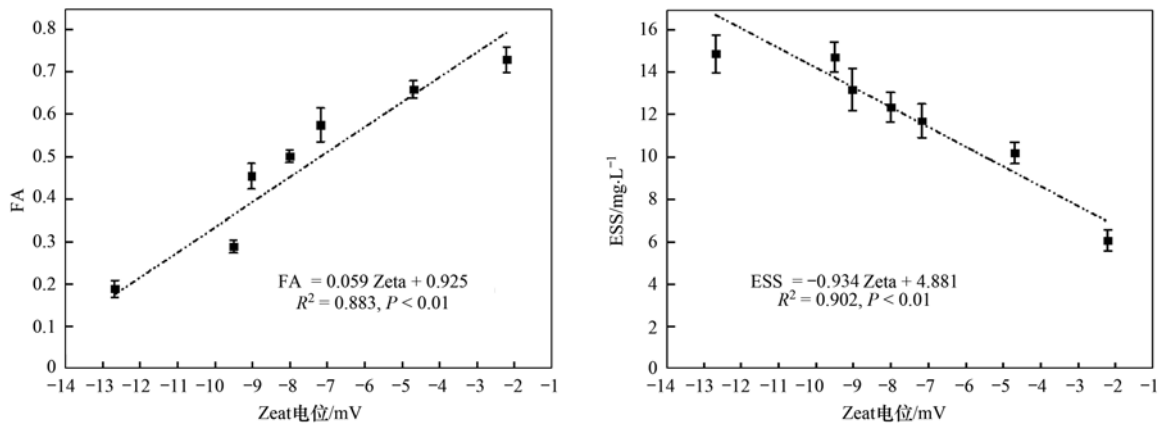


图6 Zeta 电位对 FA 和 ESS 的影响

Fig. 6 Influence of Zeta Potential on the FA and ESS

电位在 $-2 \sim -13$ mV 的范围内,活性污泥的 FA 随着 Zeta 电位绝对值的减小而增大,主要是由于 Zeta 电位绝对值的减小,活性污泥絮体表面的电势减小,絮体之间的相互排斥力也因此减弱,而絮体之间存在着范德华吸引力和疏水作用力大于静电排斥力时,就能促进活性污泥絮体的聚集,进而提高污泥的 FA,且两者具有负相关关系 ($R^2 = 0.883$),比如 Zeta 电位绝对值每减小一个单位,FA 可提高 0.059, Zeta 电位从 -13 mV 减小到 -2 mV, FA 能提高 4.1 倍,且随着 Zeta 电位绝对值的降低,ESS 也逐渐减小(图 6). Zeta 电位和 P/C 比例与絮凝能力的关系相比,Zeta 电位对 FA 的影响要大于 P/C 比例,因为 Zeta 电位绝对值每减小一个单位,FA 能提高 0.059,而 P/C 每增加一个单位,FA 只能增加 0.021, P/C 比例对 FA 的贡献仅仅是 Zeta 电位的 1/3,且前者与 FA 的相关性要大于后者,可在一定程度上说明在絮凝的过程中,污泥物理特性比生物化学特性更能发挥直接的作用. Zeta 电位和 P/C 比例对 FA 的共同影响如图 7 所示.

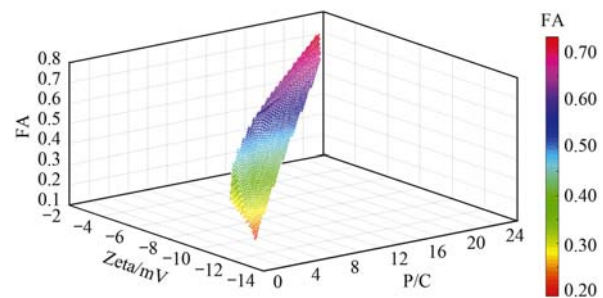


图7 P/C 比例和 Zeta 电位对 FA 的综合影响

Fig. 7 Influence of P/C ratio and Zeta Potential on FA

3.4 污泥的 D_{2f} 对 FA 和 ESS 的影响

分形结构是活性污泥絮体的重要特征之一^[43]. 活性污泥絮体具有不同的结构层次,不同层次结构的絮体具有不同的分形维数^[20], Jin 等^[44] 研究发现分形维数与 SVI 存在着很好的非线性负相关,尤其对于丝状菌含量较少的污泥,这些充分证明了分形维数对活性污泥絮体絮凝沉降的重要性. 因此可用分形维数来表征活性污泥絮体的形态结构特征,其与絮体的絮凝能力紧密相关.

从图 8 可以看出,絮体的 FA 随着 D_{2f} 的增大而增大, D_{2f} 在 1.10 ~ 1.45 的范围内, FA 与 D_{2f} 基本上呈现指数关系,通常认为,结构相对密实的活性污泥絮体有着较高的分形维数值,结构相对疏松且多空洞多分枝的絮体的分形维数较低。分形维数降低,絮体的 FA 也就随之降低,主要是由于分形维数较低的活性污泥絮体的结构松散导致其孔隙率较大,

流体会渗入到絮体中甚至从絮体中流出,在絮体内部形成一种流体通道导致其密度降低,而且流体的扰动会严重阻碍絮体之间的絮凝。根据该试验结果,若 D_{2f} 从 1.10 增加到 1.45, FA 可增加 4.3 倍;而 ESS 也是随着 D_{2f} 的提高而逐渐降低(图 8),两者具有较好的负线性相关($R^2 = 0.868$), D_{2f} 从 1.10 增加到 1.45, ESS 可降低 60%。

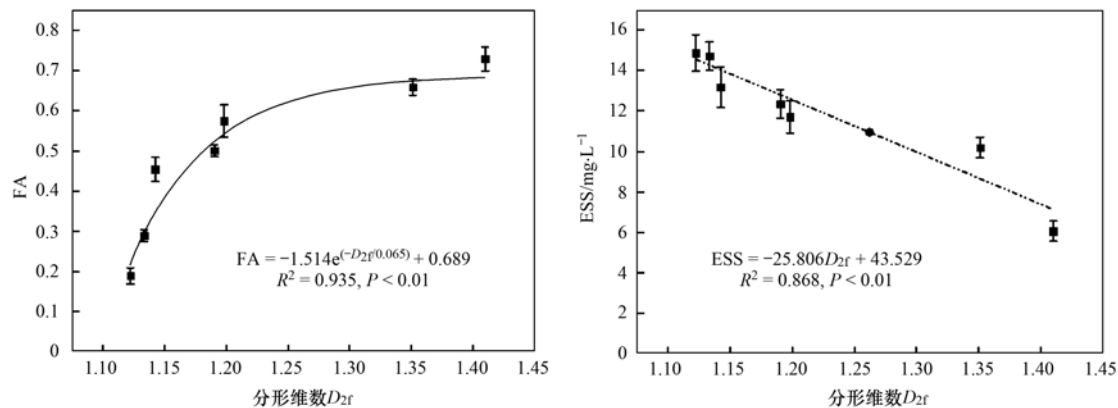


图 8 二维分形维数 D_{2f} 对絮凝能力和 ESS 的影响

Fig. 8 Influence of D_{2f} on FA and ESS

4 结论

(1) 北京市 7 个不同污水厂的污泥, SVI 在 65 ~ 230 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 的范围内, SVI 与污泥的 FA 和 ESS 并不存在明显的相关关系, 而 FA 和 ESS 存在明显的负相关关系($R^2 = 0.787$), FA 从 0.19 增加到 0.73 时, ESS 可从 14.89 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 6.08 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明 SVI 不能准确有效地表征污泥的澄清性能, ESS 与污泥的 FA 更为紧密相关。

(2) EPS 中的 P/C 比例与 FA 和 ESS 分别存在明显的正线性相关($R^2 = 0.848$)和负线性相关($R^2 = 0.884$), P/C 从 1.28 增加到 25.34 时, FA 可从 0.19 增加到 0.73, 提高了 2.8 倍, 而 ESS 从 14.89 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 6.08 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 因为蛋白质比例的提高能中和掉絮体表面的一部分负电荷, 减小絮体之间的排斥力进而促进絮凝。

(3) Zeta 电位大小($-2 \sim -13 \text{ mV}$)与 FA 和 ESS 分别存在明显的负线性相关($R^2 = 0.883$)和正线性相关($R^2 = 0.902$), Zeta 电位绝对值每减小 1 mV , FA 可提高 0.059, ESS 可减少 0.934 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

(4) D_{2f} 在 1.10 ~ 1.45 的范围内, FA 与 D_{2f} 基本上呈现指数关系, 若 D_{2f} 从 1.10 增加到 1.45, FA 可增加 4.3 倍, 而 D_{2f} 与 ESS 具有较好的负线性相关($R^2 = 0.868$), D_{2f} 从 1.10 增加到 1.45, ESS 可降低

60%。

参考文献:

- [1] Ekama G A, Barnard J L, Gunthert F W, *et al.* Secondary settling tanks: theory, modelling, design and operation [M]. London: International Association on Water Quality, 1997.
- [2] Ramina E, Wágnera D S, Yde L, *et al.* A new settling velocity model to describe secondary sedimentation[J]. Water Research, 2014, **66**: 447-458.
- [3] Ramin E, Sin G, Mikkelsen P S, *et al.* Significance of settling model structures and parameter subsets in modelling WWTPs under wet-weather flow and filamentous bulking conditions[J]. Water Research, 2014, **63**: 209-221.
- [4] Ramina E, Flores-Alsinab X, Sinb G, *et al.* Influence of selecting secondary settling tank sub-models on the calibration of WWTP models-a global sensitivity analysis using BSM2 [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, **241**: 28-34.
- [5] Li B, Stenstrom M K. Dynamic one-dimensional modeling of secondary settling tanks and design impacts of sizing decisions [J]. Water Research, 2014, **50**: 160-170.
- [6] Wanner J. Activated sludge bulking and foaming control [M]. Lancaster, Pa: Technomic Publishing, 1994. 327.
- [7] Van Limbergen H, Top E M, Versteaete W. Bioaugmentation in activated sludge: current features and future perspectives [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998, **50** (1): 16-23.
- [8] Fischerstrom C N H, Isgard E, Larsen I. Settling of activated sludge in horizontal tanks [J]. Journal of the Sanitary Engineering Division, 1967, **93**(3): 73-84.
- [9] Li B, Stenstrom M K. Research advances and challenges in one-

- dimensional modeling of secondary settling Tanks-A critical review[J]. *Water Research*, 2014, **65**: 40-63.
- [10] Eriksson L, Steen I, Tendaj M. Evaluation of sludge properties at an activated sludge plant[J]. *Water Science and Technology*, 1992, **25**(6): 251-265.
- [11] Zita A, Hermansson M. Effects of ionic strength on bacterial adhesion and stability of flocs in a wastewater activated sludge system[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1994, **60**(9): 3041-3048.
- [12] Nielsen P H, Keiding K. Disintegration of activated sludge flocs in the presence of sulfide[J]. *Water Research*, 1998, **32**(2): 13-20.
- [13] Higgins M J, Novak J T. Characterization of exocellular protein and its role in bioflocculation [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, **123**(5): 479-485.
- [14] Azeredo J, Oliveira R, Lazarova V. A new method for extraction of exopolymers from activated sludges [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(4-5): 367-370.
- [15] Bura R, Cheung M, Liao B, *et al.* Composition of extracellular polymeric substances in the activated sludge floc matrix [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(4-5): 325-333.
- [16] Mikkelsen L H, Gotfredsen A K, Agerbæk M L, *et al.* Effects of colloidal stability on clarification and dewatering of activated sludge[J]. *Water Science and Technology*, 1996, **34**(3-4): 449-457.
- [17] Wilén B M, Jin B, Lant P. The influence of key chemical constituents in activated sludge on surface and flocculating properties[J]. *Water Research*, 2003, **37**(9): 2127-2139.
- [18] Liao B Q, Allen D G, Droppo I G. Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability [J]. *Water Research*, 2001, **35**(2): 339-350.
- [19] Murthy S N, Novak J T. Factors affecting floc properties during aerobic digestion; implications for dewatering [J]. *Water Environment Research*, 1999, **71**(2): 197-202.
- [20] Jorand F, Zartarian F, Thomas F, *et al.* Chemical and structural (2D) linkage between bacteria within a within activated sludge flocs[J]. *Water Research*, 1995, **29**(7): 1639-1647.
- [21] 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.
- [22] Yu H G, Wang Z W, Wang Q Y, *et al.* Disintegration and acidification of MBR sludge under alkaline conditions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **231**: 206-213.
- [23] Sutherland I W. Exopolysaccharides in biofilms flocs and related structures[J]. *Water Science and Technology*, 2001, **43**(6): 77-86.
- [24] Lowry O H, Rosebrough N J, Farr A L, *et al.* Randall, Protein measurement with the Folin phenol reagent [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1951, **193**(1): 265-275.
- [25] DuBois M, Gilles K A, Hamilton J K, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. *Analytical Chemistry*, 1956, **28**(3): 350-356.
- [26] 李振亮, 张代钧, 卢培利, 等. 活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3975-3980.
- [27] Yu W Z, Gregory J, Yang Y L, *et al.* The effect of coagulation and applied breakage shear on the re-growth of kaolin flocs[J]. *Environmental Engineering Science*, 2010, **27**(6): 483-492.
- [28] Urbain V, Block J C, Manem J. Bioflocculation in activated sludge: an analytic approach [J]. *Water Research*, 1993, **27**(5): 829-838.
- [29] Van Dierdonck J, Van den Broeck R, Vervoort E, *et al.* Does a change in reactor loading rate affect activated sludge bioflocculation? [J]. *Process Biochemistry* 2012, **47**(12): 2227-2233.
- [30] Brault J M, Whalen P, Stuart P. Early warning signs of bulking in an activated sludge system through interpretation of ATP data in a systems analysis context [J]. *Environmental Technology*, 2011, **32**(14): 1649-1660.
- [31] Giokas D L, Daigger G T, *et al.* Comparison and evaluation of empirical zone settling velocity parameters based on sludge volume index using a unified settling characteristics database[J]. *Water Research*, 2003, **37**(16): 3821-3836.
- [32] Koivuranta E, Keskitalo J, Stoor T, *et al.* A comparison between floc morphology and the effluent clarity at a full-scale activated sludge plant using optical monitoring [J]. *Environmental Technology*, 2014, **35**(13): 1605-1610.
- [33] Zita A, Hermansson M. Effects of bacterial cell surface structures and hydrophobicity on attachment to activated sludge flocs[J]. *Applied Environmental Microbiology*, 1997, **63**(3): 1168-1170.
- [34] Govoreanu R. Activated sludge flocculation dynamics; on-line measurement methodology and modelling [D]. Belgium; Ghent University, 2004.
- [35] 朱哲, 李涛, 王东升, 等. 不同泥龄下活性污泥絮体性状的研究[J]. *环境化学*, 2009, **28**(1): 10-15.
- [36] 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.
- [37] Jorand F P A, Boué-Bigne F, Block J C, *et al.* Hydrophobic/hydrophilic properties of activated sludge exopolymeric substances [J]. *Water Science & Technology*, 1998, **37**(4-5): 307-315.
- [38] Murthy S N, Novak J T, De Haas R D. Monitoring cations to predict and improve activated sludge settling and dewatering properties of industrial wastewaters [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **38**(3): 119-126.
- [39] Forster C F. The surface of activated sludge particles in relation to their settling characteristics[J]. *Water Research*, 1968, **2**(11): 767-776.
- [40] Boyette S M, Lovett J M, Gaboda W G, *et al.* Cell surface and exopolymer characterization of laboratory stabilized activated sludge from a beverage bottling plant [J]. *Water Science and*

- Technology, 1973, **43**(6): 175-184.
- [41] McKinney R E. Biological flocculation [A]. In: McCabe J, Eckenfelder W W (Eds.). Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes[M]. New York: Rheinhold Publishing, 1956. 82-84.
- [42] Morfesis A, Jacobson A M, Frollini R, *et al.* Role of Zeta (ζ) potential in the optimization of water treatment facility operations [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, **48**(5): 2305-2308.
- [43] Mietta F, Chassagne C, Verney R, *et al.* On the behavior of mud floc size distribution; model calibration and model behavior [J]. Ocean Dynamics, 2011, **61**(2-3): 257-271.
- [44] Jin B, Wilén, B M, Lant P. A comprehensive insight into floc characteristics and their impact on compressibility and settleability of activated sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2003, **95**(1-3): 221-234.
-

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjcx.ac.cn>)。该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用。目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行。作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可。如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系。

邮政地址:北京市海淀区双清路18号《环境科学》编辑部

邮 编:100085

电 话:010-62941102,010-62849343

传 真:010-62849343

E-mail:hjcx@rcees.ac.cn

网 址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行