

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立 李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)

矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性 席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)

小波分析在湖泊常见浮游藻类荧光识别测定中的应用 张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)

湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析 张红, 黄勇, 李莹 (3323)

基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究 姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)

基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价 杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)

东海无机氮排海通量年际变化估算 吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)

海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响 于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)

北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布 孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)

湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究 余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)

降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析 杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)

三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较 张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)

三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)

山地城市地表径流源区水质特征监测研究 李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)

唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究 张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)

西藏地表水中砷的分布 王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)

锡林河流域地表水痕量元素的时空分布 薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)

天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险 卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)

松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价 裴海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)

长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征 李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)

烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征 杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)

黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义 姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)

含藻水中壬基酚的光降解转化研究 彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)

硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H₂O₂ 氧化橙黄 IV 张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)

Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究 还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)

曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究 李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)

以亲水化改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究 王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)

光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子质量变化特征 贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)

短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究 孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)

CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响 付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)

MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究 曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)

活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究 袁冬琴, 王毅力 (3522)

有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响 刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)

厌氧污泥降解动力学与生物多样性研究 曹新垵, 杨琦, 郝春博 (3535)

雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响 张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)

近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究 张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)

甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究 韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)

聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性 王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)

土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd 汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)

基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险: 以连霍高速郑州—商丘段为例 谷蕾, 仝致琦, 宋博, 马建华 (3577)

生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险 卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)

沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响 吴艳阳, 吴群河, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)

阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲑鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究 唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)

预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响 梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)

铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究 张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)

1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究 王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)

PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究 史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)

青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究 彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)

华北平原玉米-小麦轮作农田 N₂O 交换通量的研究 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)

影响南京地区的两次典型空气污染过程分析 王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)

济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究 刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)

活性炭分解臭氧机制研究 刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)

大气 O₃ 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响 王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)

铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响 王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)

锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染 郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)

《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)

活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究

袁冬琴, 王毅力*

(北京林业大学环境科学与工程学院, 北京市水体污染源控制技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对活性污泥的胞外聚合物(EPS), 采用阳离子交换树脂(CER)法和离心/超声波法对总 EPS 和分层 EPS(由外至内依次为 slime, LB-EPS, TB-EPS)分别进行提取, 测定 EPS 中多糖(PS)、蛋白质(PN)和 DNA 的含量, 并对各 EPS 溶液的理化特性随溶液条件的变化特征进行了探讨. 结果表明, EPS 的化学组分(PS、PN 和 DNA)在 TB-EPS 层中含量最高, 其亲水性组分的含量高于疏水性组分, 但 PN 的疏水比高于 PS. 各层 EPS 中 PS/PN 的值对其 Zeta 电位和等电点有重要的影响. 其中, PS/PN 越高, 各层 EPS 的 Zeta 电位越小, 分层 EPS 的等电点越高. 各种 EPS 溶液 pH 的增加导致其 Zeta 电位基本呈下降趋势, 对应的等电点分别为 $\text{pH}_{\text{总EPS}} = 2.9$ 、 $\text{pH}_{\text{slime}} = 2.2$ 、 $\text{pH}_{\text{LB-EPS}} = 2.3$ 、 $\text{pH}_{\text{TB-EPS}} = 1.3$. 离子强度的增加可以导致 EPS 溶液的电导率呈直线上升, 对应的 Zeta 电位却迅速增加然后趋于稳定, 但并未出现电位逆转现象. 此外, 升高温度 ($< 40^\circ\text{C}$) 可以降低各种 EPS 溶液的表现黏度, 并在 $40 \sim 60^\circ\text{C}$ 之间时逐渐趋于稳定.

关键词: 活性污泥; 胞外聚合物; 分层组分; 理化性质; 变化特征

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)10-3522-07

Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties

YUAN Dong-qin, WANG Yi-li

(Beijing Key Laboratory for Source Control Technology of Water Pollution, College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To study extracellular polymeric substances (EPS) in activated sludge, EPS were extracted by cation exchange resin (CER) method as the total EPS, and stratified through centrifugation and ultrasound into three fractions: slime, LB-EPS and TB-EPS from the outside to the inside. The contents of proteins (PN), polysaccharides (PS) and DNA were determined separately. Furthermore, their variation characteristics in physicochemical properties along with the solution conditions were also investigated. Results showed that the maximum contents of PN, PS and DNA were found in the TB-EPS fraction. The hydrophilic components of the total EPS and its fractions had a higher concentration than the hydrophobic components, and PN showed a higher hydrophobicity than PS. The PS/PN ratio had a great influence on Zeta potentials and isoelectric point values of EPS. That is to say, the greater PS/PN ratio of EPS was, the smaller Zeta potentials for the total EPS or its fractions and the higher isoelectric point values for EPS fractions were. All Zeta potentials of EPS solutions presented a general decrease trend with increasing pH. The corresponding isoelectric point values were 2.9 for the total EPS, 2.2 for the slime, 2.3 for the LB-EPS and 1.3 for the TB-EPS, respectively. The increase in ionic strength resulted in the tendency of straight climb with the increase in the conductivity of EPS solutions, while the corresponding Zeta potentials tended to reach stable negative values after a rapid increase. In addition, when temperature went up ($< 40^\circ\text{C}$), the apparent viscosity of EPS solutions decreased, then gradually kept unchanged in the range from 40°C to 60°C .

Key words: aerobic activated sludge; extracellular polymeric substances (EPS); stratification components; physicochemical properties; variation characteristics

在废水处理单元中, 胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 作为活性污泥中除细胞和水分之外的重要成分^[1-3], 其主要来源于微生物细胞代谢的分泌物、细胞自溶产生的聚合物、细胞脱落的表面物质及进水基质中的相关组分^[2,4,5]. 已有的研究表明, EPS 的组分、含量可以对活性污泥的絮凝、沉降与脱水等操作性能产生重要的影响^[6-10].

近年来, EPS 的分层组分及其性质的研究逐渐成为该领域的热点问题, 图 1 给出了污泥 EPS 分层

收稿日期: 2011-12-25; 修订日期: 2012-03-16

基金项目: 中央高校专项基金北京林业大学科技创新计划项目 (JC2011-1, TD2010-5); 国家自然科学基金项目 (51078035, 20977008); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20100014110004)

作者简介: 袁冬琴 (1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废水生物处理技术, E-mail: yuan_dongqin@126.com

* 通讯联系人, E-mail: wangyilimail@126.com

组分的认识历程. 从中可知, Nielsen 等^[11]将 EPS 分为结合型 EPS (bound EPS, BEPS) 和溶解型 EPS (soluble EPS, SEPS), 其中 BEPS 与细胞表面结合较紧密, 主要包括微生物细胞的荚膜、松散或紧密结合的聚合物及吸附的有机物等; SEPS 包含一些高分子物质、胶体及黏液物质, 不与细胞直接接触. Rosenberger 等^[12]将 EPS 分为可提取 EPS (extractable EPS) 和溶解性 EPS (soluble EPS), 其中前者与细胞表面结合紧密, 而后者可在污泥絮体和溶液环境间自由移动, 被称为 slime 聚合物. Lansky^[13]认为 EPS 包括黏液层 (slime) 和荚膜层 (sheath) 两部分, 其中离心分离后上清液中的聚合

物属于黏液层, 是松散结合的 EPS (loosely bound EPS, LB-EPS); 而黏附在细胞表面的即为荚膜聚合物, 属于紧密结合的 EPS (tightly bound EPS, TB-EPS). Ramesh^[14]和 Li^[15]等认为 Nielsen 等^[11]所划分出的 BEPS 具有双层结构: 松散附着 EPS (LB-EPS) 和紧密黏附 EPS (TB-EPS). 当 EPS 被逐层提取后, 残留的细胞形成了细胞相 (Pellet)^[16]. 通过对上述研究的总结和发展, Yu 等^[17]提出了更为细致的 EPS 分层组分划分: 黏液层 (slime)、松散附着 EPS (LB-EPS) 和紧密黏附 EPS (TB-EPS), 它们与细胞相 (Pellet) 共同构成了污泥絮体由外而内的层次结构.

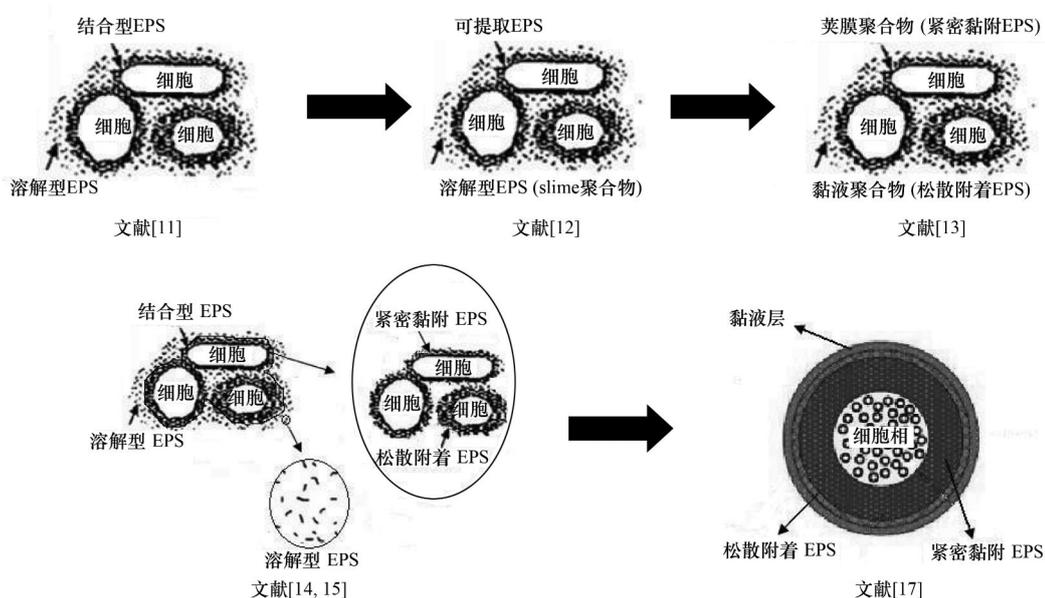


图1 EPS 分层组分的认识历程

Fig. 1 Cognition process of stratification components of EPS

然而污泥 EPS 的理化性质研究主要集中在不同单元操作条件下 EPS 化学组分、含量及表面性质的变化等方面^[10, 12~20], 而对 EPS 分层组分的性质在不同溶液条件下的变化涉及较少.

鉴于此, 本研究探讨了 pH、离子强度、温度等溶液条件对活性污泥的各层 EPS 理化性质的影响, 确定各层 EPS 的 Zeta 电位、电导率和表观黏度等性质的变化规律, 以期探讨 EPS 对活性污泥的操作性能的影响提供基础支撑.

1 材料与方法

1.1 试验材料

选用北京市某污水处理厂曝气池的剩余活性污泥作为研究对象. 采集的污泥样品均在 2 h 内运至

实验室, 过 1.2 mm 筛后, 置于 $(4 \pm 1)^\circ\text{C}$ 冰箱保存备用, 所有试验均在采集污泥样品后一周内完成. 活性污泥的基本性质如表 1, 可见不同时间采集的污泥组成有一定的变化, 但它们的 pH 和电导率比较稳定, 分别为 $(7.16 \pm 0.02) \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $(1.54 \pm 0.01) \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$.

表 1 活性污泥基本性质

Table 1 Characteristics of activated sludge samples

样品编号	TSS / $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	VSS / $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	VSS/TSS /%
1	6.95 ± 0.11	4.81 ± 0.16	69.24 ± 0.10
2	7.02 ± 0.02	4.78 ± 0.12	68.08 ± 0.23
3	5.92 ± 0.32	3.58 ± 0.33	60.49 ± 0.22
4	6.83 ± 0.21	4.53 ± 0.11	66.42 ± 0.21
5	9.34 ± 0.10	5.55 ± 0.39	59.46 ± 0.50

1.2 试验方法

1.2.1 EPS 的提取

活性污泥总 EPS 的提取采用阳离子交换树脂 (CER) 法^[21], EPS 的分层提取采用离心/超声波法^[10], 各自的提取过程如图 2 所示. 提取之后, 总 EPS 溶解于 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 溶液中, 低速离心提

取的上清液中的有机物为 slime, LB-EPS 和 TB-EPS 溶解在缓冲液中, 对应的缓冲液为 Na_3PO_4 ($2 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)、 NaH_2PO_4 ($4 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)、 NaCl ($9 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)、 KCl ($1 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 按照一定配比组成的溶液 ($\text{pH} = 7$), 在使用前, 调节该缓冲液的电导率与污泥的电导率一致.

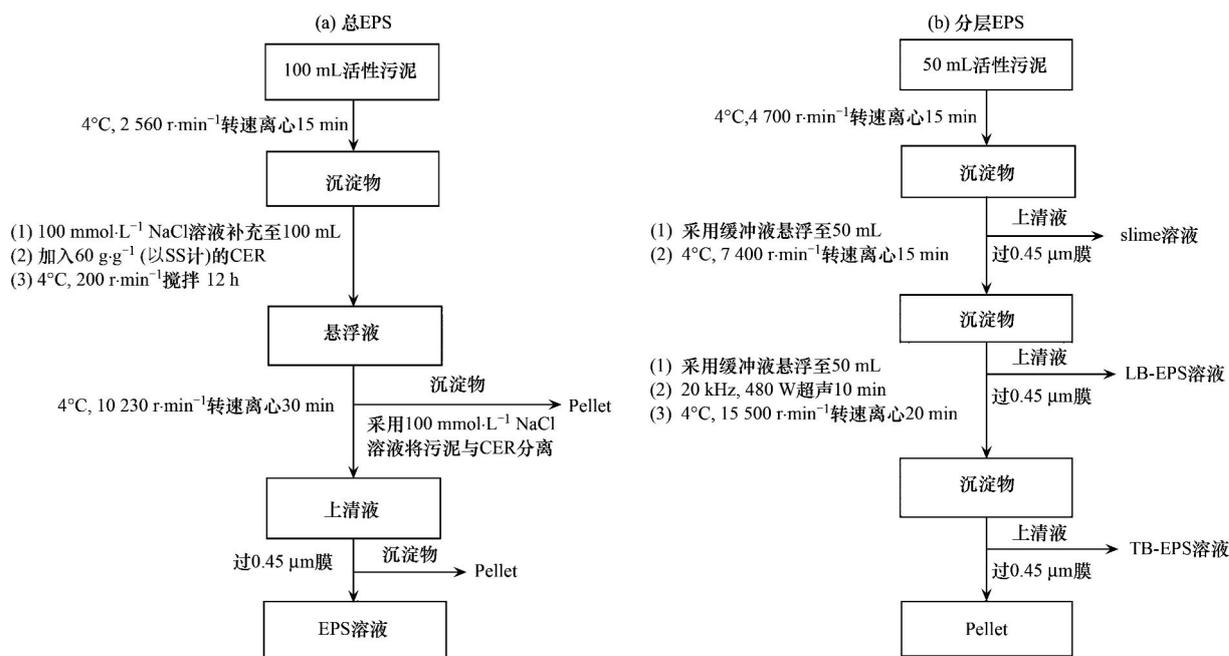


图 2 EPS 的提取过程

Fig. 2 EPS extraction protocol

1.2.2 溶液条件对 EPS 理化性质的影响

分别调节各种 EPS 溶液的 pH、离子强度 (采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 溶液), 分析不同溶液条件下各种 EPS 溶液的 Zeta 电位、电导率和表观黏度的变化规律. 测定 $20 \sim 60^\circ\text{C}$ 下各种 EPS 溶液的表观黏度, 探讨温度对 EPS 溶液黏性的影响.

1.3 分析方法

1.3.1 剩余活性污泥性质

活性污泥的 pH 采用 PB-10 型 pH 计 (Sartorius, 德国) 测定; 电导率采用北京康高特科技有限公司 EC215 型电导率仪测定; TSS、VSS 均采用标准方法测定.

1.3.2 EPS 化学组分

EPS 中的多糖 (polysaccharides, PS) 含量采用硫酸-蒽酮法测量 (标准物质为葡萄糖); 蛋白质 (proteins, PN) 含量采用修正的 Folin-酚法测量 (标准物质为牛血清蛋白); DNA 采用二苯胺法进行测量 (标准物质为 2-脱氧-D-核糖). 其中 EPS 总量为 PS、PN 与 DNA 之和, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (以 VSS 计).

所有测试结果为重复 3 次的平均值.

1.3.3 EPS 理化性质

EPS 溶液的 Zeta 电位采用 Zetasizer Nano Z 型 Zeta 电位分析仪 (Malvern Instrument, 英国) 分析测定; 表观黏度由 DV-III Ultra 表观黏度计 (Brookfield, 美国) 测定, 设定转子为 ULA0# 转子, 转速 $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 测试过程中保持温度 20°C ; EPS 亲疏水性的测定方法见文献^[20, 22], 且 EPS 的疏水特征采用疏水性 EPS 占提取 EPS 的质量分数来表征.

2 结果与讨论

2.1 EPS 的分层组分与亲疏水性

2.1.1 各层 EPS 的化学组分

依照 1.2.1 节中的方法程序对 3 号和 5 号污泥样品进行了总 EPS 的提取, 其化学组分分析结果见表 2. 不同时间采集的污泥总 EPS 中的 PN、PS、DNA 含量差异均较大. 其中, DNA 含量比例分别为 3%、8%. Liao 等^[8]认为 EPS 提取后, 若 DNA 在总

EPS 中的比例为 2% ~ 15% 之间时, 可以认为细胞没有在提取过程中发生严重破裂. 据此可知, 本研究中的 CER 法并没有引起严重的细胞破裂. 此外, 相关研究表明^[5], 总 EPS 中 PS/PN(以重量计)一般为 0.2 ~ 5, EPS/TSS 最高可达 15%, 本研究结果正处于上述范围之内.

表 2 总 EPS 含量

Table 2 Contents of total EPS

样品编号	PN(以 VSS 计) /mg·g ⁻¹	PS(以 VSS 计) /mg·g ⁻¹	DNA(以 VSS 计) /mg·g ⁻¹
3	22.86 ± 0.07	24.36 ± 0.59	1.50 ± 0.01
5	66.38 ± 0.45	17.74 ± 0.38	7.50 ± 0.08

表 3 给出了活性污泥 EPS 分层组分的化学组成, 其中 TB-EPS 中各化学组分的含量最高, 且各层 EPS 中 PS 的含量高于 PN 和 DNA, 文献^[10]的研究也得出了类似的结果; 尽管 Yu 等^[7]的研究也表明 TB-EPS 是活性污泥 EPS 中化学组分含量最高的部分, 然而他们发现 TB-EPS 中 PN 的含量比 PS 和 DNA 高.

表 3 分层 EPS 含量的平均值

Table 3 Average contents of different EPS fractions

项目	PN(以 VSS 计) /mg·g ⁻¹	PS(以 VSS 计) /mg·g ⁻¹	DNA(以 VSS 计) /mg·g ⁻¹
slime	8.73 ± 0.32	14.11 ± 0.26	0.14 ± 0.02
LB-EPS	4.47 ± 0.10	13.44 ± 1.10	0.12 ± 0.01
TB-EPS	12.32 ± 0.36	18.26 ± 0.54	0.41 ± 0.03

2.1.2 EPS 亲疏水性

EPS 中亲水性和疏水性基团的存在使其具有两性特征. 图 3 中 5 号污泥总 EPS 和分层 EPS 的疏水比值均小于 50%, 这表明活性污泥 EPS 亲水组分的含量高于疏水性组分, 且 EPS 中 PN 疏水比大小顺序为: 总 EPS ≈ TB-EPS > slime > LB-EPS, PS 疏水比大小顺序为: LB-EPS > 总 EPS ≈ TB-EPS > slime. 对于同层 EPS 来说, PN 的疏水比总是高于 PS. 究其原因, PS 中一般含有鼠李糖、甘露糖、丰乳糖、海藻糖、糖醛酸等主要物质, 这些物质主要带有羟基、羧基和醛基等亲水性官能团^[23], 但多糖异聚物(脂多糖、糖蛋白等)也含有疏水性的官能团. 对 EPS 的 PN 来说, 其疏水性一般与半胱氨酸、异亮氨酸、丙氨酸、色氨酸、缬氨酸等物质有关^[24].

2.2 各层 EPS 理化性质的变化特征

2.2.1 pH 对 EPS 的 Zeta 电位、电导率和表观黏度影响

不同 pH 下 3 号活性污泥 EPS 溶液的 Zeta 电位变化如图 4 所示. 原始污泥 EPS 溶液的 pH 为中性,

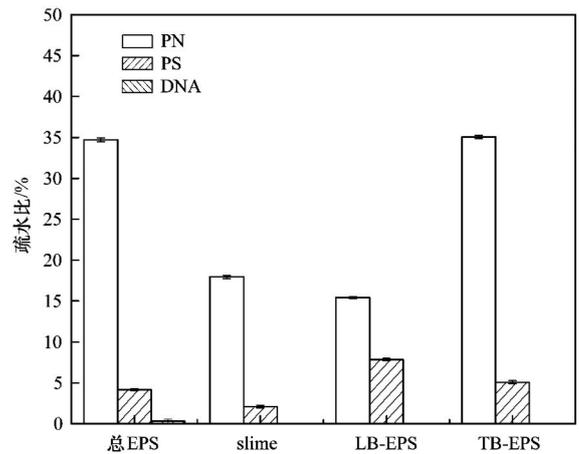


图 3 EPS 的疏水性

Fig. 3 Hydrophobicity of EPS

其 Zeta 电位均为负值, 其中, 总 EPS、slime、LB-EPS 和 TB-EPS 的 Zeta 电位依次为 -11.5、-10.9、-18.2 和 -21.4 mV. 表 4 也列出了文献中一些原始污泥 EPS 的 Zeta 电位数据, 与本研究的结果存在差异, 究其原因, 可能是由污泥的来源及 Zeta 电位测定时采用的溶液体系不同所导致.

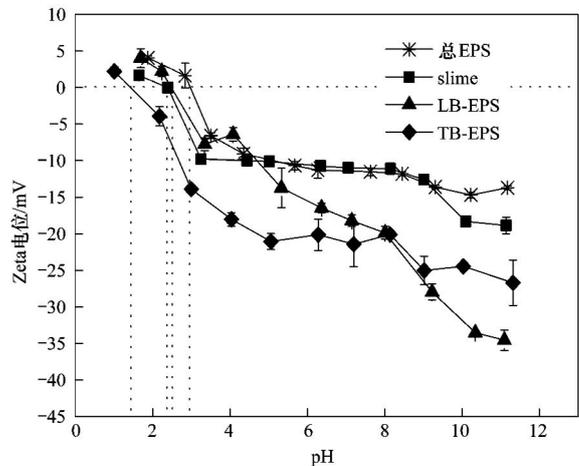


图 4 EPS 溶液的 Zeta 电位随 pH 的变化

Fig. 4 Variation of Zeta potentials of EPS solutions with pH

从图 4 可以看出, 各种 EPS 溶液的 Zeta 电位均随 pH 的增加基本呈现逐渐下降的趋势, 且存在相应的等电点, 其大小顺序为: $\text{pH}_{\text{总EPS}} (2.9) > \text{pH}_{\text{LB-EPS}} (2.3) > \text{pH}_{\text{slime}} (2.2) > \text{pH}_{\text{TB-EPS}} (1.3)$. 该原始污泥 EPS 的化学组分 PS/PN 大小顺序依次为 LB-EPS (3.0) > slime (1.6) > TB-EPS (1.5) > 总 EPS (1.1), 分层 EPS 的 PS/PN 值与相应的等电点大小顺序一致, 总 EPS 的 PS/PN 最小, 但其等电点却最高. 当溶液的 pH 小于等电点时, 对应 EPS 溶液的 Zeta 电位为正值, 其绝对值较小, 均不超过 5 mV.

表 4 不同污泥 EPS 的 Zeta 电位¹⁾

Table 4 Zeta potentials of EPS from different sludges

研究者	污泥来源	EPS 溶液体系	Zeta 电位/mV			
			总 EPS	slime	LB-EPS	TB-EPS
Yu 等 ^[7]	A ² O 曝气池	缓冲液	—	-18.1	-24.2	-18.6
	AO 曝气池	缓冲液	—	-18.4	-22.8	-18.5
龙向宇等 ^[20]	实验室 SBR	pH 平衡下的二次蒸馏水	—	—	-19.9 ~ -12.1	-18.1 ~ -12.2
Ramesh 等 ^[14]	回流污泥	$\omega(\text{NaCl}) = 0.85\%$ 溶液	-38	—	—	—

1) “—”表示未进行该项目的测定

当溶液的 pH 大于等电点时,各 EPS 溶液的 Zeta 电位呈现负值,且当 pH 达到 11 附近时,最高 Zeta 电位的绝对值可达 35 mV. 此外,在 Liu 等^[25]的研究中,活性污泥 LB-EPS 和 TB-EPS 的等电点分别为 2.55 和 2.20,与本研究结果不一致.

通过比较总 EPS 和不同层 EPS 的 Zeta 电位的变化趋势可以发现,pH 1~8 时,TB-EPS 的 Zeta 电位最低;pH 从 1 升至 4 时,各种 EPS 溶液的 Zeta 电位大小顺序为总 EPS > LB-EPS > slime > TB-EPS;pH 为 4~8 范围内时,Zeta 电位大小顺序为总 EPS \approx slime > LB-EPS > TB-EPS,且随 pH 的增大,slime 和总 EPS 的 Zeta 电位变化幅度很小;pH > 9 时,Zeta 电位大小顺序为总 EPS > slime > TB-EPS > LB-EPS. 此外,LB-EPS 的 Zeta 电位在整个研究的 pH 范围内变化较大,而 TB-EPS 的 Zeta 电位在 pH 1~5 之间发生了急剧的变化,且其变化率最大.

图 5 表示 pH 对 EPS 溶液的电导率的影响结果. 由于总 EPS 溶解于 100 mmol·L⁻¹ NaCl 溶液中,且 EPS 本身带有一定量的导电物质,因而总 EPS 溶液电导率比 100 mmol·L⁻¹ NaCl 溶液电导率稍高. 当 pH 从 1 升至 3 时,各种 EPS 溶液中酸性阳离子(譬如 H⁺)浓度的降低导致其电导率均呈直线下

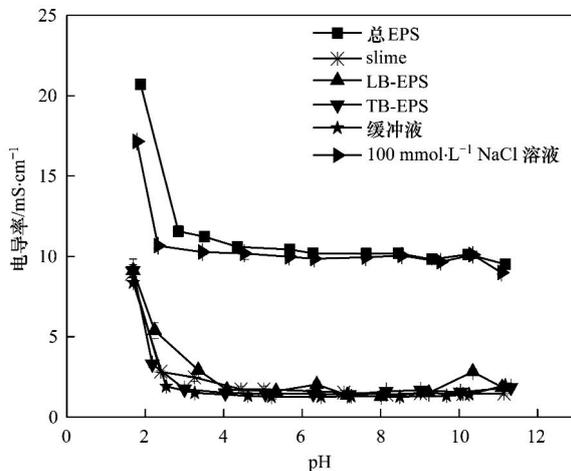


图 5 不同 pH 下 EPS 溶液的电导率变化

Fig. 5 Variation of conductivity of EPS solutions with pH

降;此后当 pH 增大时,各溶液的电导率基本稳定. 在 EPS 分层溶液中,slime 为低速离心上清液, LB-EPS 和 TB-EPS 是溶解于与原始污泥电导率一致的缓冲液中,它们的电导率随 pH 的变化趋势基本一致,但均略高于缓冲液.

不同 pH 时,2 号和 5 号污泥中提取的 EPS 溶液表观黏度均无明显变化,大致均趋于 1.10 mPa·s,接近于超纯水的表观黏度(1.00 mPa·s).

2.2.2 离子强度对 EPS 的 Zeta 电位、电导率和表观黏度影响

采用 NaCl 溶液调节 5 号污泥样品各 EPS 溶液的离子强度,其 Zeta 电位变化趋势如图 6 所示,其中横坐标表示离子强度(以外加的 NaCl 浓度计量). 可见,原始污泥总 EPS、slime、LB-EPS 和 TB-EPS 的 Zeta 电位依次为 -8.3、-12.7、-22.1 和 -12.6 mV. 随离子强度的增加,各种 EPS 溶液的 Zeta 电位先迅速上升,当离子强度增加到 10 mmol·L⁻¹后,LB-EPS 的 Zeta 电位的升高速率降低,其它 3 种 EPS 的 Zeta 电位基本保持不变. 这符合钠离子的压缩双电层过程,即随着离子浓度的增加,溶液的 Zeta 电位先急剧升高,后逐渐趋于稳定^[26],但溶液的 Zeta 电位不会变号.

同一离子强度下,各种 EPS 溶液的 Zeta 电位大小顺序为:总 EPS > TB-EPS > slime > LB-EPS. 对于该污泥样品中 EPS 的化学组分的研究发现,原始污泥各种 EPS 的 PS/PN 大小顺序为 LB-EPS(3.0) > slime(2.1) > TB-EPS(1.7) > 总 EPS(0.3),与上述 Zeta 电位大小顺序相反,这一结果表明 EPS 中 PS/PN 越大,相应的 Zeta 电位越小.

通过向 EPS 溶液中加入不同浓度的 NaCl 溶液,研究离子强度对 EPS 溶液电导率的影响. 图 7 为相应的影响结果. 随着离子强度的增加,总 EPS 溶液与 100 mmol·L⁻¹ NaCl 溶液、分层 EPS 溶液与缓冲液的电导率均直线上升且分别接近,这说明外加的 NaCl 是导致电导率变化的主要因素.

由于 EPS 溶液各组分浓度均较小,离子强度对

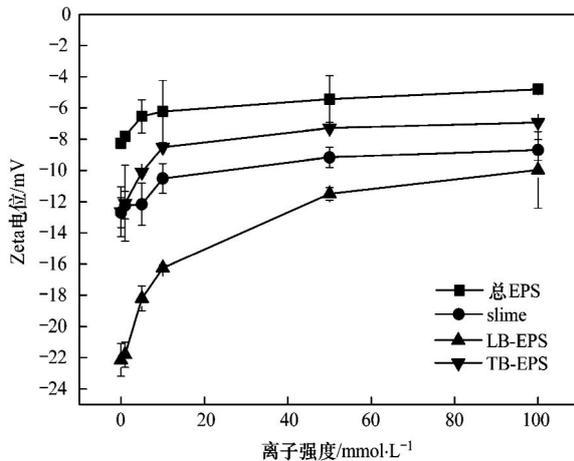


图6 离子强度对EPS溶液的Zeta电位影响

Fig. 6 Effect of ionic strength on Zeta potentials of EPS solutions

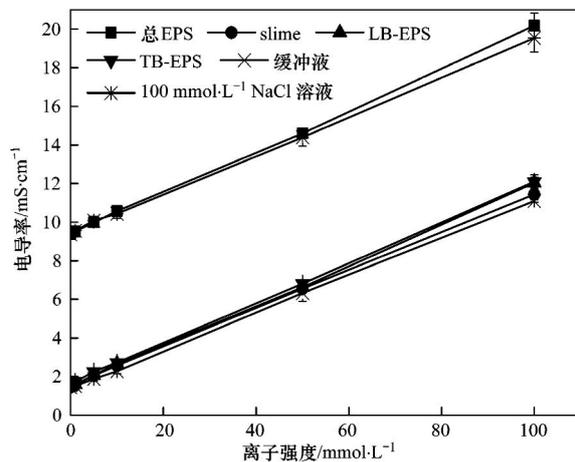


图7 离子强度对EPS溶液的电导率影响

Fig. 7 Effect of ionic strength on conductivity of EPS solutions

1 号和 5 号活性污泥总 EPS 溶液和 EPS 的分层溶液表观黏度均无显著影响. 在温度为 20℃ 时, 其表观黏度均接近于超纯水的表观黏度 (1.00 mPa·s).

2.2.3 温度对 EPS 的表观黏度影响

不同温度下, 5 号样品总 EPS 溶液和 4 号污泥分层 EPS 溶液的表观黏度变化曲线如图 8 所示. 温度为 20℃ 时, EPS 溶液的表观黏度均与超纯水 (1.00 mPa·s) 的相近. 随温度的升高, 各种 EPS 溶液的表观黏度迅速下降; 当温度达到 40℃ 后, 溶液的表观黏度基本趋于稳定. 其中 LB-EPS、TB-EPS 的表观黏度变化趋势基本一致. 一般情况下, 随着温度升高, 分子间、分子链间的运动加快, 使得 EPS 组成分子链间的缠绕降低, 分子间距增大, 可以导致 EPS 溶液表观黏度降低; 当温度升高到一定值时, 溶液中分子的构型与间距基本固定, 当温度继续上升时, 尽管可以加强分子的热运动, 但体系的表观黏

度逐渐趋于稳定. 此外, 在同一温度下, 各种 EPS 表观黏度的大小顺序为:

总 EPS > TB-EPS ≈ LB-EPS > slime. 影响黏度的因素很多, 主要包括体系中高分子物质的浓度、分子构型、温度等^[27], 这些因素的综合作用导致了上述的差异.

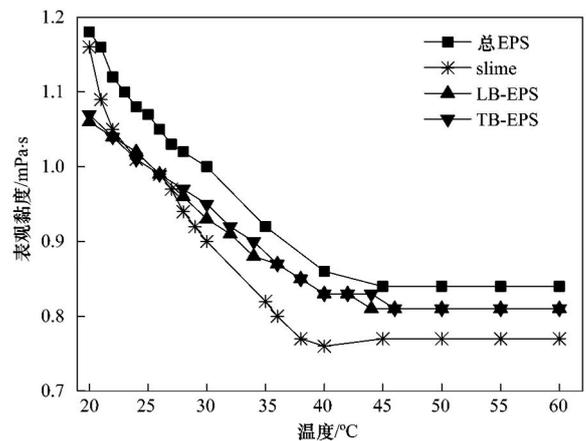


图8 温度对EPS溶液的表观黏度影响

Fig. 8 Effect of temperature on apparent viscosity of EPS solutions

3 结论

(1) 在活性污泥分层 EPS 中, TB-EPS 的含量最高, 且各化学组分的含量顺序为 PS > PN > DNA. EPS 亲水组分的含量高于疏水性组分, 同层 EPS 中 PN 的疏水比总是高于 PS.

(2) 各种 EPS 溶液的 Zeta 电位均随 pH 的增加基本呈现逐渐下降的趋势, 相应的等电点分别为 $\text{pH}_{\text{总EPS}} = 2.9$ 、 $\text{pH}_{\text{slime}} = 2.2$ 、 $\text{pH}_{\text{LB-EPS}} = 2.3$ 、 $\text{pH}_{\text{TB-EPS}} = 1.3$; 分层 EPS 中 PS/PN 越高, 对应的等电点越高; 同一离子强度下, 原始污泥各种 EPS 中 PS/PN 越高, 对应的 Zeta 电位越小; pH 1 ~ 8 时, TB-EPS 的 Zeta 电位最低; 在 pH 4 ~ 8 范围内时, slime 和总 EPS 的 Zeta 电位比较接近; 各种 EPS 溶液的电导率在 pH 1 ~ 3 范围内迅速下降, 随后基本趋于稳定.

(3) 随离子强度的增加, 各种 EPS 溶液的 Zeta 电位先迅速上升, 并在一定的离子强度下逐渐稳定; 各种 EPS 溶液的电导率随着离子强度的增加直线上升, 这主要是外加 NaCl 的影响结果.

(4) 活性污泥各种 EPS 溶液的表观黏度在 20 ~ 40℃ 之间迅速下降, 在 40 ~ 60℃ 之间时逐渐稳定; 同一温度下, 这些 EPS 的大小顺序为: 总 EPS > TB-EPS ≈ LB-EPS > slime.

参考文献:

- [1] Tian Y, Zheng L, Sun D Z. Functions and behaviors of activated sludge extracellular polymeric substances (EPS): a promising environmental interest[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, **18**(3): 420-427.
- [2] Urbain V, Block J C, Manem J. Bioflocculation in activated sludge: an analytic approach[J]. *Water Research*, 1993, **27**(5): 829-838.
- [3] Li D H, Ganczarczyk J J. Structure of activated sludge flocs[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1990, **35**(1): 57-65.
- [4] Wingender J, Neu T R, Flemming H C. Microbial extracellular polymeric substances: characterization, structure and function[M]. Berlin: Springer, 1999.
- [5] Frølund B, Palmgren R, Keiding K, *et al.* Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin[J]. *Water Research*, 1996, **30**(8): 1749-1758.
- [6] 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.
- [7] Yu G H, He P J, Shao L M. Characteristics of extracellular polymeric substances (EPS) fractions from excess sludges and their effects on bioflocculability[J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(13): 3193-3198.
- [8] Liao B Q, Allen D G, Droppo I G, *et al.* Surface properties of sludge and their role in bioflocculation and settleability[J]. *Water Research*, 2001, **35**(2): 339-350.
- [9] Sanin F D, Vesilind P A. Effect of centrifugation on the removal of extracellular polymers and physical properties of activated sludge[J]. *Water Science and Technology*, 1994, **30**(8): 117-127.
- [10] 何培培, 余光辉, 邵立明, 等. 污泥中蛋白质和多糖的分布对脱水性能的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3457-3461.
- [11] Nielsen P H, Jahn A, Palmgren R. Conceptual model for production and composition of exopolymers in biofilms[J]. *Water Science and Technology*, 1997, **36**(1): 11-19.
- [12] Rosenberger S, Kraume M. Filterability of activated sludge in membrane bioreactors[J]. *Desalination*, 2003, **151**(2): 195-200.
- [13] Lansky M. Study of activated sludge separation problems focused on biological foams formation and their suppression[D]. Prague: Czech Republic, 2003. 13-14.
- [14] Ramesh A, Lee D J, Hong S G. Soluble microbial products (SMP) and soluble extracellular polymeric substances (EPS) from wastewater sludge [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, **73**(1): 219-225.
- [15] Li X Y, Yang S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge[J]. *Water Research*, 2007, **41**(5): 1022-1030.
- [16] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al.* Extracellular proteins, polysaccharides and enzymes impact on sludge aerobic digestion after ultrasonic pretreatment[J]. *Water Research*, 2008, **42**(8-9): 1925-1934.
- [17] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al.* Stratification structure of sludge flocs with implications to dewaterability [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(21): 7944-7949.
- [18] 郑蕾, 田禹, 孙德智. pH 值对活性污泥胞外聚合物分子结构和表面特征影响研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1507-1511.
- [19] 张宝良, 王宝辉, 田禹, 等. 温度对活性污泥胞外聚合物组分的影响研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2007, **39**(8): 1331-1333.
- [20] 龙向宇, 龙腾锐, 唐然, 等. 污泥龄对胞外聚合物组分与表面性质的影响[J]. *中国给水排水*, 2008, **24**(15): 1-6.
- [21] Sheng G P, Zhang M L, Yu H Q. Characterization of adsorption properties of extracellular polymeric substances (EPS) extracted from sludge[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2008, **62**(1): 83-90.
- [22] Jorand F, Boué-Bigne F, Block J C, *et al.* Hydrophobic/hydrophilic properties of activated sludge exopolymeric substances [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(4-5): 307-315.
- [23] Antonio D B. Composition, fate and transformation of extracellular polymers in wastewater and sludge treatment processes[D]. Ithaca: Cornell University, 2000. 4-32.
- [24] Dignac M F, Urbain V, Rybacki D, *et al.* Chemical description of extracellular polymers: implication on activated sludge floc structure[J]. *Water Science and Technology*, 1998, **38**(8-9): 45-53.
- [25] Liu X M, Sheng G P, Luo H W, *et al.* Contribution of extracellular polymeric substances (EPS) to the sludge aggregation[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **44**(11): 4355-4360.
- [26] 汤鸿霄. 用水废水化学基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979.
- [27] Hoffman R L. Factors affecting the viscosity of unimodal and multimodal colloidal dispersions[J]. *Journal of Rheology*, 1992, **36**(5): 947-965.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake: A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by Fe(NO ₃) ₃ ·(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ Modified GAC in the Presence of H ₂ O ₂	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17β-estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polycrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(III) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xiu, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N ₂ O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O ₃ on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2012年10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 15, 2012

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人