

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测	黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率	李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析	杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单	孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布	李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)
济南市夏、冬季 PM _{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)
聊城冬季一重污染过程 PM _{2.5} 污染特征及成因分析	张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量	王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)
晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析	杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价	熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析	孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质	李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征	李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析	高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估	官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析	赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)
黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性	席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比	李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素	王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)
柳江盆地浅层地下水硝化型水特征和成因分析	徐进, 何江涛, 彭毅, 曾颖 (4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性	张雯, 尹琳, 周念清 (4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征	张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算	刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响	何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)
洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响	李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应	聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响	储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程	汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征	胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征	花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较	赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向	姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染减缓特性	王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)
UV 强化草酸络合 Fe ³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺	韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)
焦化废水 A/O ² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析	吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响	俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)
NaCl 盐度对 A ² /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响	张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响	陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验	孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响	安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复	李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析	宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应	罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响	李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力	谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响	周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响	韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险	李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析	靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)
《环境科学》征订启事 (3986)	《环境科学》征订简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

NaCl 盐度对 A²/O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响

张兰河¹, 田蕊¹, 郭静波², 贾艳萍¹, 张海丰¹, 李正¹, 陈子成¹

(1. 东北电力大学化学工程学院, 吉林 132012; 2. 东北电力大学建筑工程学院, 吉林 132012)

摘要: 为了提高含盐废水的生物脱氮除磷效率和生物絮凝性, 考察 NaCl 盐度对 A²/O 工艺缺氧区脱氮除磷效率的影响, 结合傅里叶变换红外光谱 (fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) 与 X 射线光电子能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 分析缺氧区活性污泥胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 组分与结构变化, 以期揭示盐度对生物絮凝性的影响. 结果表明, 当 NaCl 盐度为 0 ~ 5 g·L⁻¹ 时, A²/O 缺氧区生物絮凝性良好, 重絮凝性 (flocculation ability, FA) 约为 44%, 污泥粒径约为 45.5 μm, EPS 含量为 52.3 ~ 62 mg·L⁻¹, PN/PS 维持在 2.1 左右; 当 NaCl 盐度由 10 g·L⁻¹ 增加至 40 g·L⁻¹ 时, A²/O 缺氧区生物絮凝性显著降低, FA 由 40% 下降至 22%, 污泥粒径由 43.7 μm 减小至 32.1 μm, EPS 含量由 76.5 mg·L⁻¹ 增加至 101.0 mg·L⁻¹, PN/PS 由 1.5 下降至 1.3. 随着 NaCl 盐度的增加, 通过 FTIR 分析可知, EPS 主要组成基团未发生明显变化, 以氨基、酰胺 I 和羧基为主; 由 XPS 分析可知, EPS 和 Na⁺ 相互作用过程中部分基团 (如 C、O、N 基团) 发生电荷转移, 但其存在形态未发生变化.

关键词: A²/O 反应器; NaCl 盐度; 缺氧污泥; 胞外聚合物 (EPS); 生物絮凝性

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2018)09-4281-08 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201712162

Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A²/O Process

ZHANG Lan-he¹, TIAN Rui¹, GUO Jing-bo², JIA Yan-ping¹, ZHANG Hai-feng¹, LI Zheng¹, CHEN Zi-cheng¹

(1. School of Chemical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; 2. School of Civil and Architecture Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: In order to improve the biological removal efficiency of nitrogen and phosphorus and bioflocculation performance of salt-containing wastewater, the effect of NaCl salinity on the efficiency of denitrification and phosphorus removal in the anoxic zone of an A²/O process was investigated. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) were used to analyze the composition and structure of extracellular polymeric substances (EPS) in activated sludge of the anoxic zone, to discern the effect of salinity on bioflocculation. Results showed that when NaCl salinity was 0-5 g·L⁻¹, flocculation ability (FA) in A²/O anoxic zone was about 44% and the sludge particle size was 45.5 μm. EPS content increased from 52.3 mg·L⁻¹ to 62 mg·L⁻¹ and protein (PN)/polysaccharide (PS) remained at 2.1. When NaCl salinity increased from 10 g·L⁻¹ to 40 g·L⁻¹, bioflocculation of sludge significantly decreased. FA decreased from 40% to 22% and sludge particle size decreased from 43.7 μm to 32.1 μm. EPS content increased from 76.5 mg·L⁻¹ to 101.0 mg·L⁻¹ and PN/PS decreased from 1.5 to 1.3. Based on FTIR analysis, with increase in salinity, the main components of EPS were always amino, amide I, and carboxyl. Based on XPS analysis, increasing salinity led to charge transfer of some groups (such as C, O, and N groups) during the interaction between EPS and Na⁺, but its form did not change.

Key words: anaerobic-anoxic-oxic reactor (A²/O); NaCl salinity; anoxic sludge; extracellular polymeric substances (EPS); biological flocculation

食品加工、皮革制造和石油炼制等生产过程中常常会产生大量含盐废水^[1]. 这些含盐废水进入污水处理系统与活性污泥相接触, 影响微生物活性及絮凝性, 进而影响生物脱氮除磷效率. 胞外聚合物 (extracellular polymeric substances, EPS) 是细胞分泌的黏性固体物质, 其中, 蛋白质 (protein, PN) 与多糖 (polysaccharide, PS) 的含量之和约占 EPS 总量的 40% ~ 95%^[2]. EPS 可通过表面黏附作用形成基质结构, 影响活性污泥的稳定性、脱水性和絮凝

性等.

目前, 关于盐度对污染物去除率和活性污泥絮凝性的影响研究主要集中于: ①盐度对污染物去除率的影响. 唐海等^[3]采用接种好氧颗粒污泥的序批式反应器 (sequencing batch reactor, SBR) 处理含盐

收稿日期: 2017-12-20; 修订日期: 2018-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51678119, 51508073); 吉林省科技发展计划项目 (20180201016SF, 20170519013JH)

作者简介: 张兰河 (1971 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为污水生物脱氮除磷技术, E-mail: zhanglanhe@163.com

有机废水,在低盐度($<2\%$)下反应器运行相对稳定, COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 SS 平均去除率分别达到 87.6%、49.3% 和 69%, 在高盐度(4%~6%)下反应器运行效率分别下降至 78.4%、21.7% 和 55.6%; 但是, Zhao 等^[4]考察盐度对 SBR 污染物去除率的影响时发现, 当盐度为 2% 时, COD、BOD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 去除率均可达到 95%. Palmeiro-Sánchez 等^[5]采用 SBR 处理含盐废水时发现, 加入 NaCl(7、13、20 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)后细胞内合成的聚羟基脂肪酸(PHA)含量显著降低; 但是, She 等^[6]采用 SBR 工艺研究盐度(5~41.9 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)对部分硝化反硝化的影响时发现, 盐度在 5~37.7 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内并未影响硝化和反硝化作用. 目前, 关于盐度对脱氮除磷效率的影响研究所得结论并不一致. ②盐度对生物絮凝性的影响. Raynaud 等^[7]的研究发现, 随着 NaCl 盐度的增加, 污泥滤液浊度增加, 污泥絮体较为分散. He 等^[8]的研究表明, 盐度增加(0.15、0.3、0.4 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)导致污泥絮凝性降低, 颗粒尺寸减小, 但是盐度为 0.15 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的污泥絮体大于原始污泥. Cui 等^[9]的研究发现, 随着盐度的增大, 污泥絮体分解, 尺寸减小. Arabi 等^[10]的研究表明, 高浓度的单价阳离子(Na^+)不利于污泥絮凝. 目前, 盐度对污泥活性和絮凝性的影响机理仍不明确.

A^2/O 工艺由于具有可同步脱氮除磷、工艺流程简单、运行费用低等优点已广泛应用于城市污水处理^[11]. A^2/O 工艺缺氧区具有反硝化除磷功能, 其污泥活性和结构的变化对 A^2/O 工艺脱氮除磷效率产生重要影响. 本研究采用 A^2/O 工艺, 结合不同 NaCl 盐度下缺氧区反硝化除磷效率的变化, 考察缺氧区 EPS 和生物絮凝性的变化, 利用傅里叶红外光谱(FTIR)和 X 射线光电子能谱(XPS)对 EPS 进行组成和结构分析, 通过揭示盐度对脱氮除磷效率和生物絮凝性的影响机制, 以期对含盐污水处理厂的运行管理提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验装置

A^2/O 反应器采用有机玻璃制成, 有效容积为 48 L, 其中厌氧区和缺氧区有效容积均为 12 L, 好氧区有效容积为 24 L. 厌氧区和缺氧区均配有搅拌器, 好氧区底部装有曝气头, 采用折流方式运行. 装置内部由隔板分为 6 部分, 其中 1 为厌氧区, 2 为缺氧区, 3~6 为好氧区, 好氧区的混合液回流至缺氧区. 采用竖流式二沉池, 容积为 5 L. A^2/O 工艺连续运行, 污泥回流比为 50%, 硝化液回流比为 100%; MLSS 为 4 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HRT 为 8 h, 温度为 17~23℃. A^2/O 工艺流程如图 1 所示.

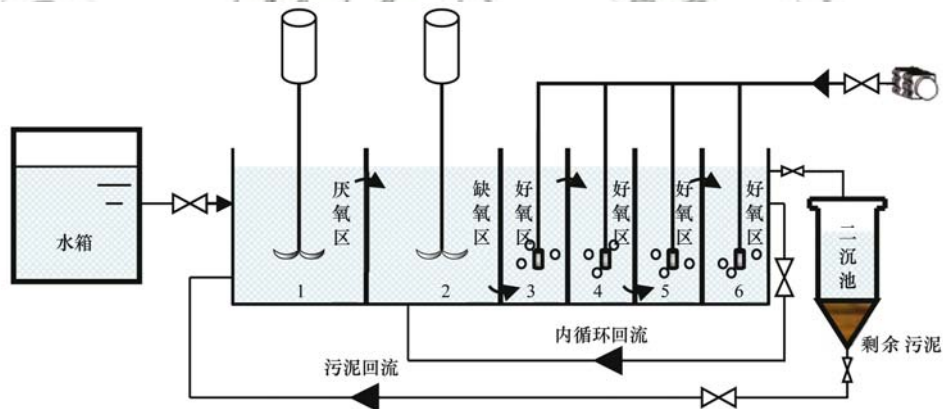


图1 A^2/O 工艺流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of A^2/O process

实验用水采用模拟城市污水, 主要成分为: 无水乙酸钠(1.2 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、氯化钠(0~40 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、氯化铵(0.26 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、磷酸二氢钾(0.05 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、硫酸镁(0.05 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、氯化钙(0.01 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). 通过投加碳酸氢钠和盐酸调节 pH 为 7.5~8.0.

1.2 分析项目和检测方法

采用 NaOH 法提取和分析 EPS, 每个盐度周期

结束时取不同区域污泥混合液, 以 6 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 弃去上清液后将所剩污泥利用 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液调节 pH 至 11, 慢速搅拌 10 min; 再将处理后的污泥以 6 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min, 利用 0.45 μm 膜过滤上清液, 过滤后液体即为 EPS, 测定时将其 pH 调节为 7.

COD、TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 均采用国

家标准方法检测. 污泥粒径采用粒径测定仪 (Ambivalue, LFC101) 进行测定. 污泥形态采用倒置生物显微镜 (Eclipse Ti-S, Nikon, 日本) 进行观察. Zeta 电位采用微电泳仪 (上海中晨数字技术设备有限公司, JS94H2) 进行测定. 接触角采用接触角测量仪 (上海中晨数字技术设备有限公司, JC2000D1) 进行分析. 温度、pH 采用梅特勒 Five Easy Plus 进行检测. EPS 总量以总有机碳 (total organic carbon, TOC) 表示, 采用 TOC 分析仪 (liquil TOC II, elementar, 德国) 测定. 采用考马斯亮蓝法和蒽酮硫酸法分别检测 PN 和 PS 含量. 采用 FTIR (Tensor 27, 德国布鲁克公司, 分辨率 0.5 cm⁻¹) 和 XPS (Thermo ESCALAB 250, X 射线源为 AlKα 1486.6 eV、MgKα 1253.6 eV) 对 EPS 进行结构分析.

1.3 批式实验

A²/O 反应器在室温下运行, NaCl 盐度分别为 0、5、10、20、30、40 g·L⁻¹, 每个盐度运行周期为 20 d, pH 为 7.5~7.9, 当每个运行周期结束时, 进行胞外聚合物提取; 同时利用 TTC 比色法进行脱氢酶活性检测^[12], 取污泥混合液经 10 min 慢速搅拌 (60 r·min⁻¹) 絮凝, 沉降 30 min, 测定 SV₃₀、SVI、MLSS^[13] 及上清液的浊度.

重新絮凝能力 (FA) 的计算^[14~16]. 取 80 mL 污泥样品置入冰水浴中, 利用超声波清洗机 (HS-10AL) 在 48 W 下超声处理 30 s, 将 10 mL 悬浮液于 1 200 r·min⁻¹ 下离心分离 2 min, 550 nm 下测量上清液吸光度 (A); 将剩余悬浮液于室温下 60 r·min⁻¹ 磁力搅拌 15 min, 取 10 mL 悬浮液于 1 200 r·min⁻¹ 下离心分离 2 min, 测量上清液吸光度 (B). FA 计算公式如下:

$$FA = \frac{A - B}{A} \times 100\% \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 NaCl 盐度对缺氧区脱氮除磷性能的影响

NaCl 盐度对 A²/O 工艺脱氮除磷效率的影响如图 2 所示. 当 NaCl 盐度低于 5 g·L⁻¹ 时, COD、总氮和磷酸盐去除率保持稳定, 分别维持在 62%、51% 和 60% 左右. 较低的盐度对硝化菌、反硝化菌和聚磷菌等微生物活性的影响较小, 微生物具有良好的代谢能力^[17, 18]. 但是, 当 NaCl 盐度为 10 g·L⁻¹ 增加至 40 g·L⁻¹ 时, 污染物去除率明显下降; COD 去除率由 60% 下降至 32%, TN 去除率由 50%

下降至 33%, PO₄³⁻-P 去除率由 57% 下降至 25%. 高盐度导致污染物去除率下降, 其原因主要有: ① 高盐度下细胞发生质壁分离, 导致微生物新陈代谢下降^[19]; ② NaCl 盐度升高, 微生物活性减弱, 导致厌氧段细胞内糖原降解速率降低, 合成 PHB 含量减少, 硝态氮电子受体不足, 反硝化除磷能力下降; ③ 盐度增加会对氨氧化细菌 (AOB) 和 PAOs 的合成产生抑制, 从而影响后续的缺氧吸磷效率^[20].

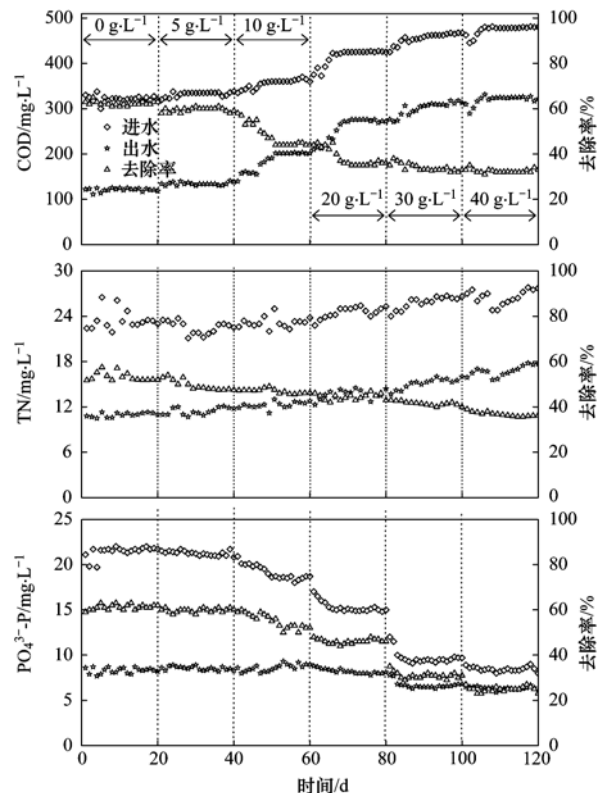


图 2 NaCl 盐度对缺氧区 COD、TN 和 PO₄³⁻-P 去除率的影响

Fig. 2 Effect of NaCl salinity on removal efficiency of COD, TN, and PO₄³⁻-P in anoxic zone

底物脱氢是微生物分解有机物的关键, 在微生物的呼吸作用下, 被脱掉的电子通过电子载体转移至最终天然电子受体, 有机物发生矿化, 通过脱氢酶活性的变化间接指示微生物的呼吸速率和生物活性的大小^[21, 22]. 不同盐度下缺氧区污泥脱氢酶的变化如图 3 所示. 当 NaCl 盐度为 0~5 g·L⁻¹ 时, 缺氧区污泥脱氢酶活性 (以 TF 计) 为 62.7~64.5 mg·(L·h)⁻¹, 微生物自身的生存环境未受到 NaCl 盐度的影响, 脱氢酶活性较高. 但是, 当 NaCl 盐度由 10 g·L⁻¹ 增加至 40 g·L⁻¹ 时, 脱氢酶活性减弱, 由 61.0 mg·(L·h)⁻¹ 下降至 27.7 mg·(L·h)⁻¹. 这是由于高盐度 (>10 g·L⁻¹) 导致部分微生物无法与外界进行正常的能量交换, 不适应环境的微生物脱

水死亡,同时生物酶结构被破坏,活性受到抑制^[23, 24].

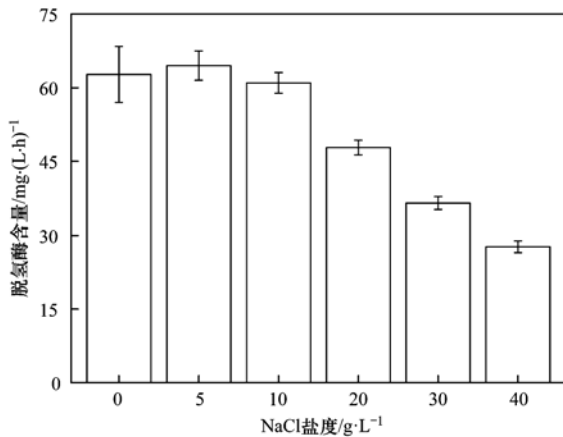


图3 NaCl盐度对缺氧区脱氢酶的影响

Fig. 3 Effect of NaCl salinity on the dehydrogenase of anoxic zone

2.2 NaCl盐度对缺氧区EPS组成及结构的影响

2.2.1 NaCl盐度对缺氧区EPS组成的影响

图4表明,随着NaCl盐度的增加,缺氧区微生物产生的PN、PS和EPS逐渐增多.当NaCl盐度为 $0\sim 5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,EPS为 $52.3\sim 62.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中PN为 $27.6\sim 30.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,PS为 $13.1\sim 14.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;当NaCl盐度由10增加至 $40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,EPS由 $76.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $101.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中PN由 $33.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $40.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,PS由 $21.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $29.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.同时,随着NaCl盐度的升高,PN/PS也发生变化.当NaCl盐度为 $0\sim 5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,PN/PS维持在2.1;但是,当NaCl盐度由 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高至 $40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,PN/PS由1.5下降至1.3,PS显著增加,其增加率达到120%.

当微生物受到高浓度含盐废水冲击时,可通过自身的渗透压调节机制平衡细胞内渗透压和保护细胞内的原生质,细胞通过聚集低分子量物质(如氨基酸、糖、甘氨酸三甲基内盐等)形成新的胞外保护层,调节自身新陈代谢^[25].Abbasi等^[26]的研究发现,NaCl盐度的增加能刺激微生物分泌更多的PS,用来抵抗渗透压升高对细胞的破坏.本研究发现,低盐度下($\text{NaCl} < 5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)微生物产生的EPS、PS和PN增长相对稳定;当NaCl盐度为 $10\sim 30\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,EPS、PN和PS均快速增加.NaCl盐度高于 $30\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,微生物难以维持自身细胞平衡,盐度加强了细胞的溶胞作用,细胞内溶物流出,PN和PS含量高^[27, 28].

2.2.2 NaCl盐度对缺氧区EPS结构的影响

不同盐度下缺氧区微生物产生的EPS的红外

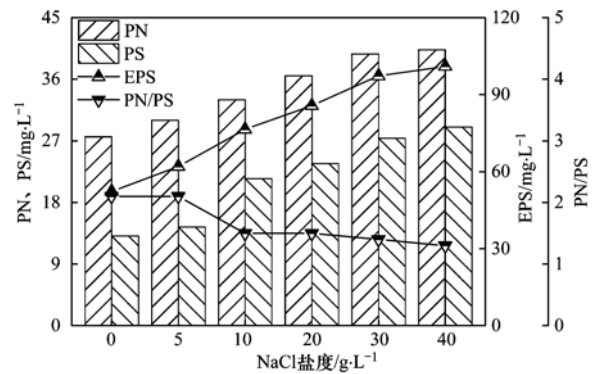


图4 盐度对缺氧区EPS、PN和PS含量的影响

Fig. 4 Effect of salinity on EPS, PN, and PS amounts in anoxic zone

光谱如图5所示. $3000\sim 3700\text{ cm}^{-1}$ 处出现的较宽吸收峰由O—H伸缩振动和N—H伸缩振动导致,基团类型为缔合—OH和氨基,其中氨基为PN主要基团; $1630\sim 1680\text{ cm}^{-1}$ 处出现 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动吸收峰,基团类型属于PN肽键中的酰胺I; $(1400\pm 10)\text{ cm}^{-1}$ 处产生吸收峰是由 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动所致,基团类型为羧基; $1110\sim 1047\text{ cm}^{-1}$ 处产生的吸收峰表示糖类; $1030\sim 1050\text{ cm}^{-1}$ 处由C—O—C伸缩振动产生,代表基团类型为PS; $<1000\text{ cm}^{-1}$ 处为指纹区^[29],其中 $600\sim 900\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰表明存在不饱和键^[30].在NaCl盐度为 $0\sim 40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下,EPS在 3400 、 1640 、 1400 、 1050 cm^{-1} 附近均存在较明显的吸收峰,氨基和糖类的伸缩振动尤其明显,证明了PN及PS类物质的存在.可以发现,随着盐度的增加,各振动吸收峰的峰位相似,氨基、酰胺I、羧基和糖类始终是EPS的主要基团,各基团相对强度增加,这与PN、PS测定

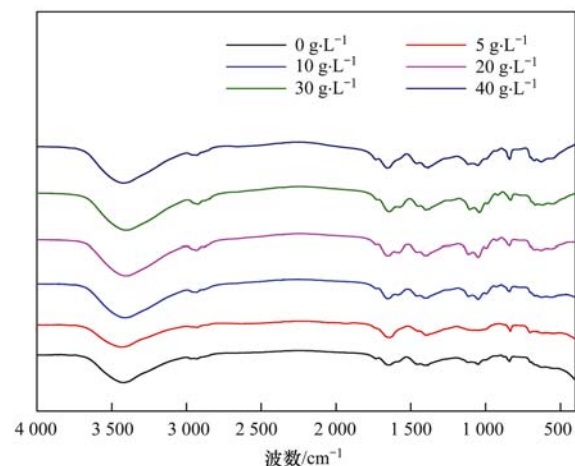


图5 不同盐度下EPS红外光谱

Fig. 5 FTIR spectra variation of EPS under different salinity conditions

结果相吻合^[31].

当 NaCl 盐度分别为 0 g·L⁻¹ 和 40 g·L⁻¹ 时, 缺氧区污泥 EPS 的 XPS 能谱的变化如图 6 所示. Na 元素的 BE 值分别为 1071.1 eV 和 1071.6 eV, Na 元素部分电荷发生变化, 但均为 1s 轨道, 表明其结合形态未发生变化. EPS 中 C1s 峰可分解为 4 个组分峰, C—(C, H) (282.1 ~ 283.0 eV)、C—(O, N) (283.6 ~ 284.3 eV)、C=O 或 O—C—O (285.0 ~ 285.6 eV)、HO—C=O 或 RO—C=O (286.5 ~ 286.9 eV); EPS 中 O1s 可分为 2 个峰, C=O (530.4 ~

531.0 eV)、O—C—O 或 O—C—H (532.6 ~ 532.9 eV). 当 NaCl 盐度由 0 增加至 40 g·L⁻¹ 时, C—(O, N) (283.6 ~ 284.3 eV)、C=O 或 O—C—O (285.0 ~ 285.6 eV) 的 BE 值降低, C=O (530.4 ~ 531.0 eV)、O—C—O 或 O—C—H (532.6 ~ 532.9 eV) 的 BE 值增加. 由 C、O、N 基团的 BE 值变化可知, EPS 与 Na⁺ 相互作用过程中发生电荷转移, 但其基团和 Na⁺ 的存在形态未发生变化. EPS 中检测出的物质均为非质子氮化合物, 表明 EPS 中酰胺和肽为主要组成部分, 这与 FTIR 的分析结果一致^[32].

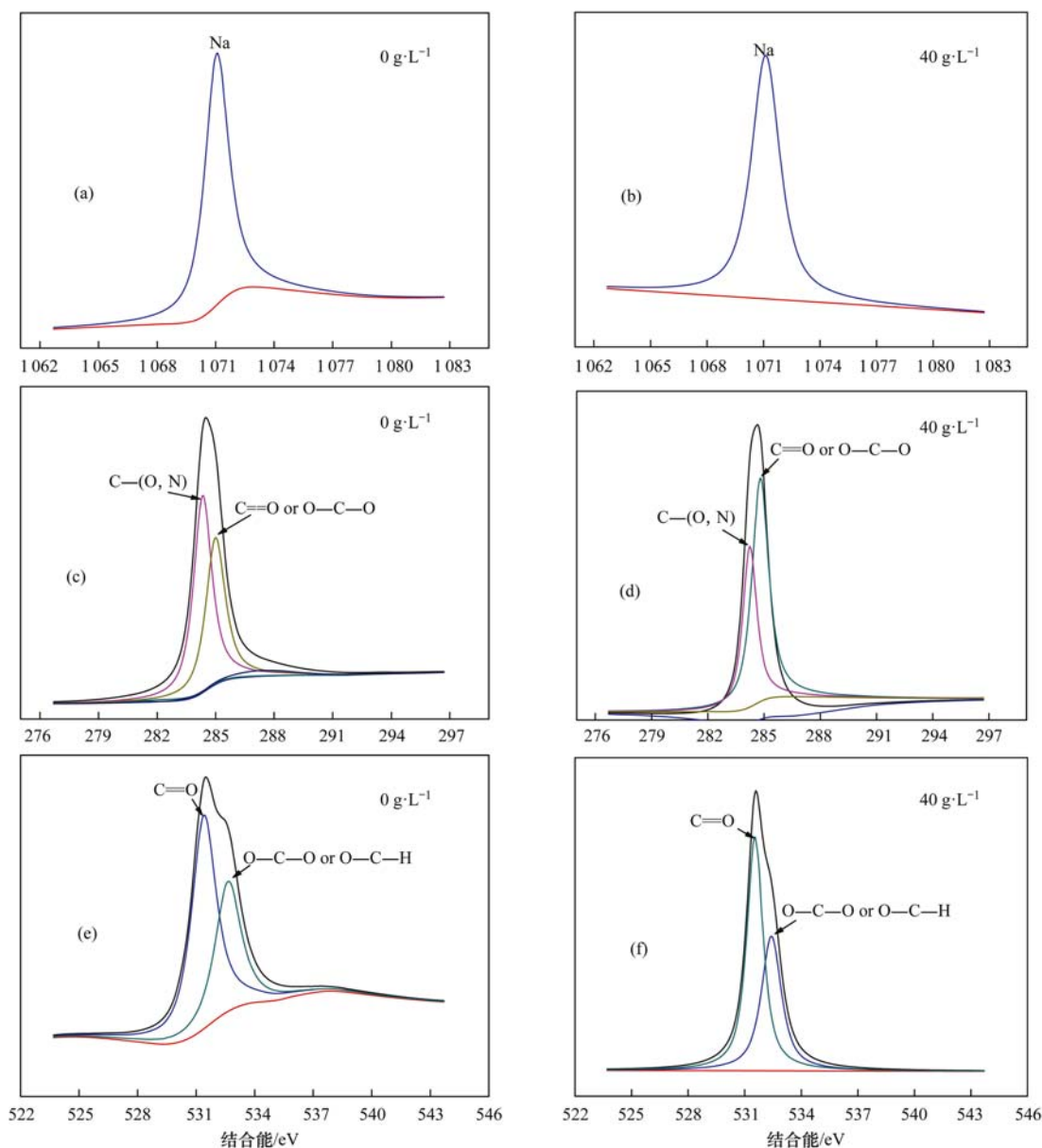


图 6 不同盐度下 EPS 的 XPS 谱图

Fig. 6 XPS spectra of EPS under different salinity conditions

2.3 NaCl 盐度对缺氧区污泥生物絮凝性的影响
Zeta 电位的变化可反映生物絮体稳定性的变

化. 由表 1 可以看出, 当 NaCl 盐度由 0 增加至 5 g·L⁻¹ 时, Zeta 电位由 -23.2 mV 升高至 -12.3

mV, 表明污泥絮体较稳定, 生物絮凝性较好. 但是, 当 NaCl 盐度由 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, Zeta 电位由 -27.6 mV 下降至 -38.2 mV , 污泥絮体表面负电荷降低, 静电斥力持续增大. 双电层理论表明, 随着负电荷的增加, 絮体表面静电斥力提高, 阻碍絮体发生絮凝, 生物絮凝性变差^[15]. Wilén 等^[14]采用 FA 描述絮凝性时认为, FA 越大, 絮凝性越强.

由图 7(a) 可以看出, 当 NaCl 盐度为 $0\sim5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SV_{30} 约为 27% , SVI 约为 $66\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 污泥粒径约为 $45.5\text{ }\mu\text{m}$, 低盐度下污泥活性有所增强. 当 NaCl 盐度由 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, SV_{30} 由 30% 增加至 38% , SVI 由 $75\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加至 $95\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 污泥粒径由 $43.7\text{ }\mu\text{m}$ 减小至 $32.1\text{ }\mu\text{m}$. NaCl 盐度的增加导致污泥絮体松散, 污泥颗粒尺

寸减小^[8, 33]. 图 7(b) 表明, 当 NaCl 盐度为 $0\sim5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, FA 维持在 44% ; 但是, 当 NaCl 盐度为 $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, FA 由 40% 下降至 22% . 图 7(c) 表明, 随着 NaCl 盐度增加, 接触角由 87.6° 减小至 56.3° , 表明污泥亲水性逐渐降低. 缺氧区污泥的形态由紧密变为疏松, 无明显聚集形态(图 8), 絮体中大量的菌体不再紧密连接, 生物絮凝性变差.

由污泥形态和性能分析可知, 低盐度 ($<5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) 对污泥沉降性和生物絮凝性具有促进作用; 高盐度 ($>10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) 导致污泥沉降性和生物絮凝性变差. 随着盐度的逐渐增大, EPS、PN 和 PS 明显增多; 但是, PN 和 PS 的结构与主要官能团未发生明显变化, EPS 总量的增加是影响生物絮凝沉降的主要原因.

表 1 盐度对 Zeta 电位的影响
Table 1 Effect of salinity on Zeta potential

NaCl 盐度/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	0	5	10	20	30	40
Zeta 电位值/mV	-23.2	-12.3	-27.6	-31.7	-37.8	-38.2

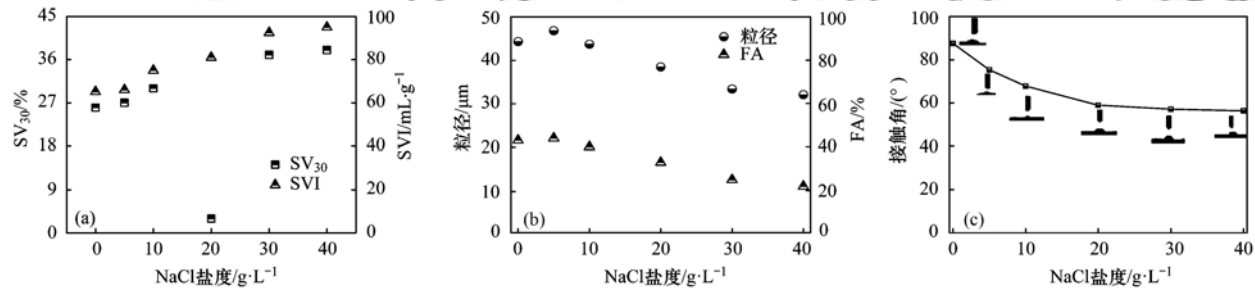


图 7 不同盐度下缺氧区污泥性质

Fig. 7 Sludge characteristics of anoxic zone under different salinity conditions

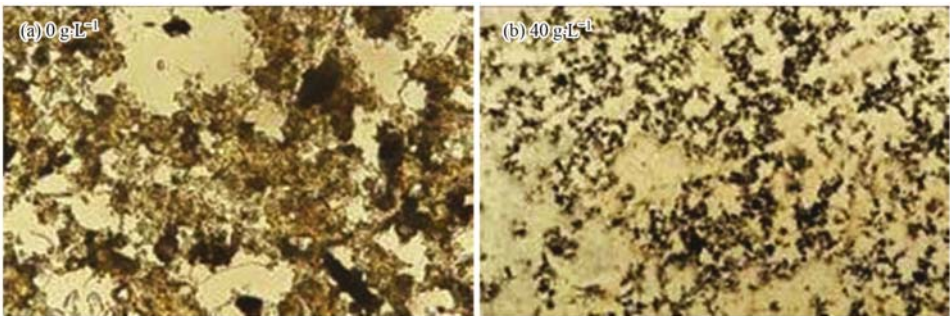


图 8 不同盐度下污泥结构和生物絮凝形态

Fig. 8 Sludge structure and flocculation under different salinity conditions

3 结论

(1) 当 NaCl 盐度为 $0\sim5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, A^2/O 工艺缺氧区脱氮除磷效率无明显变化, 总氮和磷酸盐去除率维持在 51% 和 60% ; 当 NaCl 盐度由 10 增加至

$40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, A^2/O 缺氧区脱氮除磷效率呈下降趋势, 总氮和磷酸盐去除率分别下降了 18% 和 35% , 缺氧区活性污泥在高盐度环境下脱氮除磷能力下降.

(2) 当 NaCl 盐度由 0 增加至 $5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 脱氢

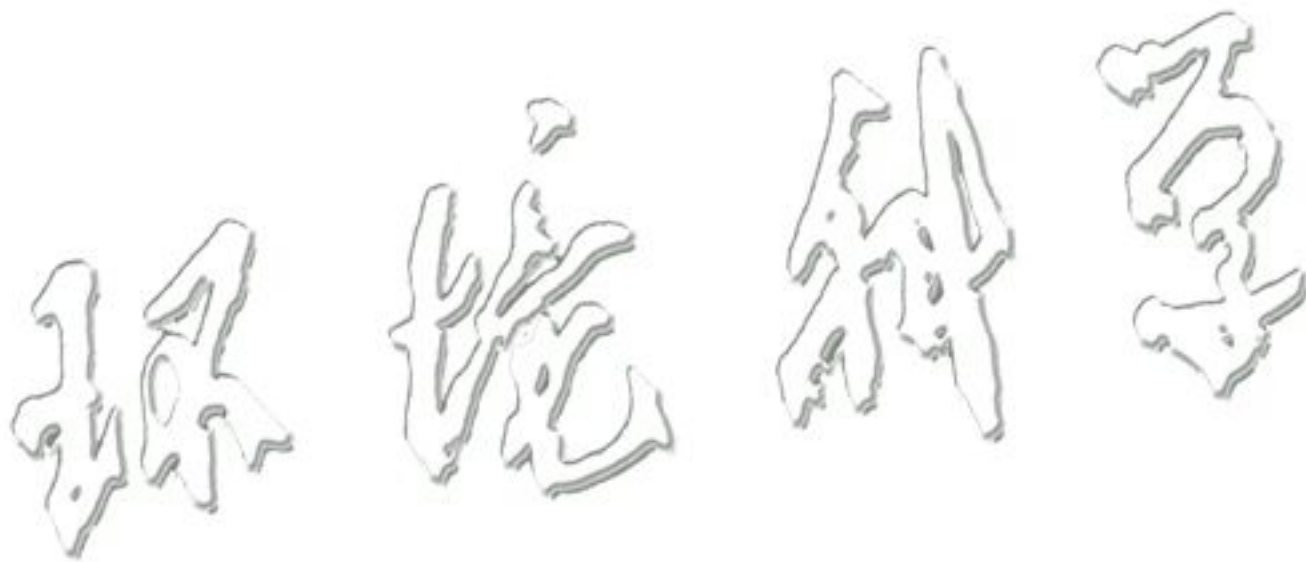
酶活性增加, Zeta 电位、污泥粒径和 FA 增大, 低盐度对污泥生物絮凝性产生促进作用; 当 NaCl 盐度高于 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 脱氢酶活性明显减弱, Zeta 电位、污泥粒径和 FA 显著减小, 高盐度对污泥生物絮凝性产生抑制作用。

(3) NaCl 盐度对 EPS 官能团的影响较小, 随着盐度的变化, 其主要基团一直为氨基、酰胺 I 和羧基; EPS 与 Na^+ 相互作用过程中发生了电荷转移, 但盐度变化对 EPS 基团和 Na^+ 存在形态无影响, EPS 总量的增多是抑制生物絮凝的主要因素。

参考文献:

- [1] 王子超, 高孟春, 魏俊峰, 等. 盐度变化对厌氧污泥胞外聚合物的影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(9): 3273-3281.
Wang Z C, Gao M C, Wei J F, *et al.* Effect of salinity on extracellular polymeric substances of anaerobic sludge[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(9): 3273-3281.
- [2] 刘子森, 肖恩荣, 张丽萍, 等. EPS 及其测定方法分析[J]. 膜科学与技术, 2015, **35**(4): 103-109, 122.
Liu Z S, Xiao E R, Zhang L P, *et al.* Analysis on the determination methods of EPS [J]. *Membrane Science and Technology*, 2015, **35**(4): 103-109, 122.
- [3] 唐海, 刘桂中. 好氧颗粒污泥 SBR 处理实际含盐废水的研究[J]. 工业水处理, 2013, **33**(7): 33-35.
Tang H, Liu G Z. Research on the treatment of real salt-containing wastewater by SBR seeded with aerobic granular sludge [J]. *Industrial Water Treatment*, 2013, **33**(7): 33-35.
- [4] Zhao Y Y, Park H D, Park J H, *et al.* Effect of different salinity adaptation on the performance and microbial community in a sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **216**: 808-816.
- [5] Palmeiro-Sánchez T, Fra-Vázquez A, Rey-Martínez N, *et al.* Transient concentrations of NaCl affect the PHA accumulation in mixed microbial culture [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, **306**: 332-339.
- [6] She Z L, Zhao L T, Zhang X L, *et al.* Partial nitrification and denitrification in a sequencing batch reactor treating high-salinity wastewater [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **288**: 207-215.
- [7] Raynaud M, Vaxelaire J, Olivier J, *et al.* Compression dewatering of municipal activated sludge: effects of salt and pH [J]. *Water Research*, 2012, **46**(14): 4448-4456.
- [8] He D Q, Zhang Y J, He C S, *et al.* Changing profiles of bound water content and distribution in the activated sludge treatment by NaCl addition and pH modification [J]. *Chemosphere*, 2017, **186**: 702-708.
- [9] Cui Y W, Su H, Chen Y F, *et al.* Mechanism of activated sludge floc disintegration induced by excess addition of NaCl [J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2015, **43**(8): 1197-1206.
- [10] Arabi S, Nakhla G. Impact of cation concentrations on fouling in membrane bioreactors [J]. *Journal of Membrane Science*, 2009, **343**(1-2): 110-118.
- [11] Hwang K L, Bang C H, Zoh K D. Characteristics of methane and nitrous oxide emissions from the wastewater treatment plant [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **214**: 881-884.
- [12] 刘振超. 胞外聚合物对活性污泥沉降性能影响机制研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015. 11-12.
Liu Z C. Mechanism study on the effect of extracellular polymer substance to the settleability of activated sludge [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2015. 11-12.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第 4 版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 200-281.
- [14] 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.
- [15] 何志江, 赵媛, 张源凯, 等. 活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响 [J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 3135-3143.
He Z J, Zhao Y, Zhang Y K, *et al.* Influence of activated sludge surface properties on flocculating settling and effluent suspended solid [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3135-3143.
- [16] 张兰河, 李军, 郭静波, 等. EPS 对活性污泥絮凝沉降性能与表面性质的影响 [J]. 化工学报, 2012, **63**(6): 1865-1871.
Zhang L H, Li J, Guo J B, *et al.* Effect of EPS on flocculation-sedimentation and surface properties of activated sludge [J]. *CIESC Journal*, 2012, **63**(6): 1865-1871.
- [17] Chen Y J, He H J, Liu H Y, *et al.* Effect of salinity on removal performance and activated sludge characteristics in sequencing batch reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **249**: 890-899.
- [18] Corsino S F, Capodici M, Morici C, *et al.* Simultaneous nitrification-denitrification for the treatment of high-strength nitrogen in hypersaline wastewater by aerobic granular sludge [J]. *Water Research*, 2016, **88**: 329-336.
- [19] Uygur A, Kargı F. Salt inhibition on biological nutrient removal from saline wastewater in a sequencing batch reactor [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2004, **34**(3-4): 313-318.
- [20] Wang Z W, Van Loosdrecht M C M, Saikaly P E. Gradual adaptation to salt and dissolved oxygen: Strategies to minimize adverse effect of salinity on aerobic granular sludge [J]. *Water Research*, 2017, **124**: 702-712.
- [21] Zhang Y, Li B, Xu R X, *et al.* Effects of pressurized aeration on organic degradation efficiency and bacterial community structure of activated sludge treating saline wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **222**: 182-189.
- [22] Tomska A. Influence of selected pharmaceuticals on activated sludge dehydrogenase activity [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **48**: 214-218.
- [23] Reid E, Liu X R, Judd S J. Effect of high salinity on activated sludge characteristics and membrane permeability in an immersed membrane bioreactor [J]. *Journal of Membrane Science*, 2006, **283**(1): 164-171.
- [24] Hong J M, Li W B, Lin B, *et al.* Deciphering the effect of salinity on the performance of submerged membrane bioreactor for aquaculture of bacterial community [J]. *Desalination*, 2013, **316**: 23-30.
- [25] 文湘华, 占新民, 王建龙, 等. 含盐废水的生物处理研究进展 [J]. 环境科学, 1999, **20**(3): 104-106.
Wen X H, Zhan X M, Wang J L, *et al.* Review of the biological treatment of salinity wastewater [J]. *Environmental Science*, 1999, **20**(3): 104-106.

- [26] Abbasi A, Amiri S. Emulsifying behavior of an exopolysaccharide produced by *Enterobacter cloacae* [J]. African Journal of Biotechnology, 2008, **7**(10): 1574-1576.
- [27] 崔有为, 王淑莹, 宋学起, 等. NaCl 盐度对活性污泥处理系统的影响[J]. 环境工程, 2004, **22**(1): 19-21, 35.
Cui Y W, Wang S Y, Song X Q, *et al.* Effects of NaCl salinity on activated sludge treatment system [J]. Environmental Engineering, 2004, **22**(1): 19-21, 35.
- [28] 赵昕, 倪晋仁, 叶正芳. 盐度对固定化曝气生物滤池中微生物的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1553-1559.
Zhao X, Ni J R, Ye Z F. Effect of salinity on immobilized microorganisms in biological aerated filter (BAF) [J]. Environmental Science, 2007, **28**(7): 1553-1559.
- [29] Zhu L, Qi H Y, Lv M L, *et al.* Component analysis of extracellular polymeric substances (EPS) during aerobic sludge granulation using FTIR and 3D-EEM technologies [J]. Bioresource Technology, 2012, **124**: 455-459.
- [30] Hu X W, Chen K, Lai X K, *et al.* Effects of Fe(III) on biofilm and its extracellular polymeric substances (EPS) in fixed bed biofilm reactors[J]. Water Science and Technology, 2016, **73**(9): 2060-2066.
- [31] 崔飞剑. 垃圾渗滤液生物处理过程污泥胞外聚合物的变化及对污泥特性的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2016. 24-27.
Cui F J. The changes of extracellular polymeric sludge and their effects on the characteristics of the sludge in the process of biological treatment of landfill leachate[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. 24-27.
- [32] Badireddy A R, Chellam S, Gassman P L, *et al.* Role of extracellular polymeric substances in biofloculation of activated sludge microorganisms under glucose-controlled conditions[J]. Water Research, 2010, **44**(15): 4505-4516.
- [33] 邹小玲, 丁丽丽, 赵明宇, 等. 高盐度废水生物处理研究[J]. 工业水处理, 2008, **28**(9): 1-4.
Zou X L, Ding L L, Zhao M Y, *et al.* Study on the treatment of wastewater with high salinity[J]. Industrial Water Treatment, 2008, **28**(9): 1-4.



CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	 ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin	XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	 ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	 ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	 LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extracton on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	 XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	 LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)