

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.6
第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征 张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思 (2493)

北京城郊 PM_{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价 徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘水桥, 赵清 (2501)

上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响 高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹 (2510)

天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析 徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文 (2519)

典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征 赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰 (2526)

垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征 余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲 (2533)

天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾 (2540)

霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测 杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚 (2546)

宁东能源化工基地大气 PM_{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险 刘攀亮, 剧媛丽, 毛满萱, 黄韬, 高宏, 马建民 (2556)

2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 污染的健康效益评估 韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹 (2565)

1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型 刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄 (2572)

北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析 王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊 (2582)

江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征 徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮 (2595)

亚热带稻区大气 NO₂、HNO₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降 欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水 (2607)

长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源 汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富 (2615)

基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建 梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林 (2624)

青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征 罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民 (2631)

鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征 刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹 (2639)

三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析 江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮 (2647)

水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响 范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪睿容 (2657)

水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示 张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江 (2667)

崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价 周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯 (2675)

云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析 张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽 (2686)

鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征 陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓 (2696)

合流制面源污染传输过程与污染源解析 房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛 (2705)

强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果 段进凯, 李田, 张佳炜 (2715)

水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响 邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静 (2722)

巢湖十五里河沉积物磷吸附潜力及对外源碳的响应 李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈志 (2730)

金盆水库沉积物磷的来源及分布特征 毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡 (2738)

水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征 王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋 (2745)

不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系 王慎, 张思思, 许允, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏 (2753)

表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律 朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平 (2764)

针铁矿改性生物炭对砷吸附性能 朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷 (2773)

改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制 史月月, 单锐, 袁浩然 (2783)

厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性 闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国 (2793)

污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除 王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激 (2800)

碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响 王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun (2807)

活性污泥物理结构对呼吸过程的影响 郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳 (2813)

好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性 廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔 (2821)

快速城市化区河流温室气体排放的时空特征及驱动因素 刘婷婷, 王晓锋, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽 (2827)

生物炭对潜流人工湿地污染物去除及NO_x排放影响 邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚 (2840)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田N₂O排放的影响及其微生物机制 吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳 (2847)

不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响 胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉 (2858)

典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价 何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌 (2869)

西南高镉地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征 刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕 (2877)

基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析 白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞 (2885)

喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价 汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰 (2895)

黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓁 (2904)

秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳 (2912)

生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响 阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇 (2920)

稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氮氧化过程 刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军 (2930)

纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氮氧化速率的影响 伍玲丽, 张旭, 舒昆慧, 张丽, 司友斌 (2939)

农田沟道土壤中锰氨氧化(Mn-ANAMMOX)过程的探究 陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮琛, 陈志浩 (2948)

污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响 吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳 (2954)

《环境科学》征订启事(2929) 《环境科学》征稿简则(2947) 信息(2646, 2656, 2857)

活性污泥物理结构对呼吸过程的影响

郭耀¹, 李志华^{1*}, 杨成建¹, 王慧娟², 李亚明¹, 姜阳¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 2. 新疆大学建筑工程学院, 乌鲁木齐 830047)

摘要: 物理性能和生物活性是活性污泥法中两个重要的关注方面, 为解决运行控制中这两方面的矛盾, 对不同活性污泥系统中的污泥物理结构和呼吸过程进行分析. 利用7个不同活性污泥系统中的污泥, 对其粒径、分形维数、压缩沉降性能、吸附性能和呼吸图谱等方面进行研究分析. 结果表明, 物理性能指标和呼吸速率之间存在较好的相关关系, 其中污泥粒径(d)与内源比呼吸速率($SOUR_e$)和最大比呼吸速率($SOUR_t$)呈指数负相关($R^2 > 0.9$); 分形维数(D_f)与 $SOUR_e$ 和 $SOUR_t$ 呈线性负相关($R^2 > 0.8$); 压缩指数(SCI)和污泥指数(SVI)与 $SOUR_e$ 呈对数正相关($R^2 > 0.9$); 平衡吸附量(Q_{max})与准内源比呼吸速率($SOUR_q$)和 $SOUR_e$ 呈线性负相关($R^2 > 0.9$). 从而得出活性污泥正常运行条件下的最佳物理性能和活性范围: SVI为50~120 mL·g⁻¹, $SOUR_e$ 为6.27~7.55 mg·(g·h)⁻¹, d 为205.80~228.12 μm, D_f 为1.56~1.60, $R_{v/t}$ 为0.02~0.03, Q_{max} 为508~636 mg·g⁻¹.

关键词: 活性污泥; 物理结构; 比呼吸速率; 生物活性; 吸附性能

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2813-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201812138

Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes

GUO Yao¹, LI Zhi-hua^{1*}, YANG Cheng-jian¹, WANG Hui-juan², LI Ya-ming¹, JIANG Yang¹

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. College of Architectural and Civil Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: Physical properties and bioactivity are two important aspects of the activated sludge process. To solve the contradiction between these two aspects in the operation control process, the physical structure and respiration processes of sludge in different activated sludge systems were analyzed. Sludge from seven different activated sludge systems was used for the experiments, and the particle size, microscopic morphology, fractal dimension, compression settling performance, adsorption performance, and respirogram were studied and analyzed. The results showed that the correlations between physical performance indicators and respiration rate were very good. Sludge particle size (d) was negatively correlated with the endogenous specific respiration rate ($SOUR_e$) and maximum specific respiration rate ($SOUR_t$) ($R^2 > 0.9$); fractal dimension (D_f) was linearly and negatively correlated with $SOUR_e$ and $SOUR_t$ ($R^2 > 0.8$); sludge compression index (SCI) and sludge volume index (SVI) were positively correlated with $SOUR_e$ ($R^2 > 0.9$); equilibrium adsorption (Q_{max}) was linearly and negatively correlated with the quasi-endogenous specific respiration rate ($SOUR_q$) and $SOUR_e$ ($R^2 > 0.9$). In addition, the optimal physical properties and bioactivity range of activated sludge under normal operating conditions were obtained as follows: SVI of 50-120 mL·g⁻¹, $SOUR_e$ of 6.27-7.55 mg·(g·h)⁻¹, d of 205.80-228.12 μm, D_f of 1.56-1.60, $R_{v/t}$ of 0.02-0.03, and Q_{max} of 508-636 mg·g⁻¹.

Key words: activated sludge; physical structure; specific respiration rate; bioactivity; adsorption performance

活性污泥法中, 反应池对污泥的活性具有较高的要求, 较高的污泥活性可以保证较高的处理效率^[1]; 二沉池对污泥的物理性能, 尤其是沉降性能有着较高的要求, 良好的沉降性能能确保二沉池泥水分离和出水效果^[2]. 通常在反应池增大生物活性来保证污水的去除效果, 但也导致污泥沉降性能变差, 在沉淀池又会采用投加无机化学药剂等方法来改善污泥的沉降性能, 这样不仅增加了污水厂的运营成本, 还对污水处理产生了一定的负面影响^[3]. 污泥无法同时具备良好的活性和沉降性能, 因此, 如何确定活性和物理性能之间的平衡点对污水厂的运行至关重要, 同时, 探究活性污泥物理结构和生物活性之间的关系对活性污泥法的运行控制和工艺

改进具有指导作用.

沉降性能是活性污泥物理性能的重要体现, 污泥的活性和沉降性能的关系在一些研究中被关注. 对于一个活性污泥系统而言, 不同沉降速度的部分, 具有不同的污泥活性, 较小的尺寸和较低的密度使离散细菌絮凝体沉降速度较低, 却有较高的活性^[4]. 即使在污泥的培养过程中, 污泥的活性和沉降性能也呈现出相反的变化规律^[5,6]. 粒径分布和

收稿日期: 2018-12-17; 修订日期: 2019-01-03

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2018ZDXM-SF-025); 陕西省水利科技项目(2017slkj-10); 西安市科技计划项目(2016063SF/SF09); 国家自然科学基金项目(5187839)

作者简介: 郭耀(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为废水生物处理理论与技术, E-mail: fukuokaxa@qq.com

* 通信作者, E-mail: lizihua@xauat.edu.cn

分形维数是活性污泥的重要参数, 粒径可以表示颗粒的大小, 但对颗粒的属性、形状和空间结构的表示, 需要基于分形维数^[7]. 粒径和分形维数与活性污泥的速度梯度、VSS/SS、EPS 含量及 Zeta 电位等具有相关关系^[8]. 活性污泥的吸附作用对污水处理效果至关重要, 污水处理中, 絮体的吸附性能应该被考虑进去, 污染物的去除主要依赖吸附和生物降解^[9, 10].

物理结构和生物活性作为活性污泥两个重要方面, 单一方面的关系在一些研究中被提及到, 但是全面地对两者之间的关系, 尤其是物理结构对生物活性的影响研究很少. 本研究中, 利用粒径、分形维数、沉降曲线以及吸附性能等指标来表示活性污泥的物理结构特征, 利用呼吸图谱来对活性污泥的活性进行表征^[11, 12]. 通过对活性污泥物理结构对呼吸过程影响的研究, 获得各物理指标和不同呼吸速率之间的关系, 以及活性污泥的最佳参数范围, 以期为污水处理厂的运行管理提供理论支持.

1 材料与方法

1.1 样品及运行条件

实验样品取自实验室 7 个 SBR 反应器, 出水取自反应器出水口, 活性污泥取自好氧段末端. G1 和 G2 是絮体污泥, D1 和 D2 是颗粒化絮体污泥, Y1、Y2 和 Y3 是颗粒污泥. 7 个反应器有着不同的设计参数、运行工况和进水情况. 各反应器的运行概况如表 1.

G1 和 G2 的运行周期是 6 h (包括 10 min 进水, 120 min 厌氧搅拌, 180 min 曝气, 30 min 沉降, 15 min 排水和 5 min 闲置). 但是 G2 的进水根据一定比例分成 3 段, 同时厌氧搅拌和曝气被平均分为 3 段. D1 和 D2 的运行周期也是 6 h (包括 5 min 进水, 120 min 厌氧混合, 180 min 曝气, 40 min 沉降, 15 min 排水). Y1、Y2 和 Y3 同样有着相同的运行周期, 为 4 h (包括 5 min 进水, 200 min 曝气, 15 min 沉降, 5 min 排水和 15 min 闲置). G1、G2、D1 和 D2 的运行温度控制在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ (D1 运行中有降温冲击), Y1、Y2 和 Y3 的运行温度控制在 $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$.

反应器进水均为模拟生活污水, COD 使用不同基质 (以 COD 计, G1 和 G2: 淀粉量 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 乙酸钠 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, D1 和 D2: 乙酸钠 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Y1: 乙酸钠 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 丙酸钠 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Y2: 乙酸钠 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 丙酸钠 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Y3: 乙酸钠 $75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 丙酸钠 $75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 淀粉 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), TN 使用氯化铵 (以 N 计, G1 和 G2: $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, D1 和 D2: $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Y1、Y2 和 Y3: $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), TP 使用磷酸二氢钾 (以 P 计, G1 和 G2: $4.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, D1 和 D2: $8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Y1、Y2 和 Y3: $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 同时添加微量元素 ($0.15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ H}_3\text{BO}_3$, $0.03 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $0.18 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KI}$, $0.12 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $0.06 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $0.12 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $0.15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $1.54 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和 $12.74 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ EDTA}$).

表 1 7 个反应器的运行参数

Table 1 Operational data for the seven reactors

反应器	进水条件			反应器运行参数					
	COD $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NH_4^+-N $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	周期/h	SRT/d	进水方式	高径比	交换比	温度/ $^\circ\text{C}$
G1	400	50	4.5	6	13	集中	2	0.25	20 ± 1
G2	400	50	4.5	6	13	三段	2	0.25	20 ± 1
D1 ¹⁾	400	30	8	6	15	集中	7	0.5	20 ± 1
D2	400	30	8	6	15	集中	7	0.5	20 ± 1
Y1	200	20	6	4	20	集中	16	0.5	22 ± 1
Y2	600	20	6	4	20	集中	16	0.5	22 ± 1
Y3	200	20	6	4	20	集中	16	0.5	22 ± 1

1) D1 运行温度控制在 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, 但运行中有降温冲击

1.2 实验方法

分别对 7 个反应器的样品进行独立实验. 首先, 取各反应器进、出水各 20 mL 进行水质测定, 来对比各反应器的处理情况. 然后, 取各反应器好氧段末端的活性污泥 200 mL, 测定活性污泥的物理指标 (粒径、分形维数、压缩沉降性能和吸附性能等). 同时, 各取 300 mL 污泥样品, 进行活性污泥

呼吸过程测定 (呼吸图谱). 实验重复进行 3 次, 以避免误差和确保实验规律的普遍性.

1.3 实验分析

1.3.1 分形维数

本研究所采用的分形维数计算方法是图像法, 根据投影面积和周长的关系确定活性污泥的二维分形维数. 通过使用 Image J 对显微镜照片处理并测

得絮体的投影面积 A 和周长 P . 基于分形理论, 根据公式(1)将 $\ln(A)$ 拟合到 $\ln(P)$, 得到活性污泥絮凝体的二维分形维数 (D_f)^[13].

$$A \propto P^{D_f} \quad (1)$$

式中, D_f 是絮体的二维分形维数, A 是絮体的面积 (μm^2), P 是絮体的周长 (μm).

则分形维数可由下式计算^[14]:

$$D_f = \frac{\ln(A)}{\ln(P)} \quad (2)$$

1.3.2 沉降实验

从各反应中取 100 mL 污泥, 搅拌 1 min, 分别倒入 100 mL 量筒中, 记录不同时间的污泥体积, 并获得污泥沉降曲线. 根据数据计算得出 SV_5 、 SV_{30} 和 SVI 等数据. 活性污泥的沉降过程可分为 4 个部分: ①自由沉降, ②区域沉降, ③过渡沉降和 ④压缩沉降^[15]. 对沉降曲线进行微分获取各拐点坐标, 得出各部分沉降量 ΔSV . 本研究中对污泥压缩性能表征使用压缩指数 (SCI), 该指标的定义采用类比的方法, 通常污泥指数 (SVI) 表示为:

$$SVI = SV/MLSS \quad (3)$$

则, 污泥压缩指数可表示为:

$$SCI = \Delta SV/MLSS \quad (4)$$

1.3.3 吸附实验

本研究以亚甲基蓝 (MB) 为原料, 评价活性污泥的最大吸附能力^[11]. 分别将 5 mL 活性污泥与 20 mL 的亚甲基蓝 (100、200、400、800、1 200、1 600 和 2 400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 混合在锥形烧瓶中, 使混合物的 pH 值维持在 6.8 ± 0.1 . 锥形瓶在 25°C 水浴中振荡 2 h. 通过 $0.45 \mu\text{m}$ 过滤器过滤混合液, 然后使用紫外可见分光光度计在 655 nm 波长下进行测定. 可通过下式计算吸附 MB (q_e , $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 的量:

$$q_e = \frac{(c_0 - c_e)V}{m} \quad (5)$$

式中, c_0 和 c_e 是亚甲基蓝的初始和平衡浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), V 是用于吸附的亚甲基蓝溶液的体积 (L), m 是用于吸附的活性污泥的质量 (g).

则, 平衡吸附量 (Q_{\max}) 可使用 Langmuir 吸附模型进行计算:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q_{\max}K_1} \cdot \frac{1}{c_e} + \frac{1}{Q_{\max}} \quad (6)$$

式中, Q_{\max} 代表平衡吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), K_1 是一个吸附系数.

1.3.4 污泥呼吸过程

呼吸过程通过测定呼吸图谱进行分析. 呼吸图谱通过污水处理智慧运行工作站 (WBM450, 西安绿标水环境科技有限公司) 获取, 该工作站由 1.3 L

的有机玻璃恒温反应器 [内置曝气头, 外加恒温水浴层, 温度设定为 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 、溶解氧探头、pH 探头、加药系统、PLC 控制系统和软件分析系统] 等组成. 工作站可在线连续采集 DO 和 pH 值数据, 经软件分析系统计算获得活性污泥的呼吸速率^[11, 12]. 为了消除污泥浓度的影响, 本研究中采用比呼吸速率 (SOUR).

通过呼吸图谱可以获得 4 个重要的呼吸速率: $SOUR_q$ 代表活性污泥的准内源比呼吸速率; $SOUR_e$ 代表活性污泥的内源比呼吸速率; $SOUR_t$ 代表活性污泥的最大比呼吸速率; $SOUR_n$ 代表活性污泥中自养菌比呼吸速率.

1.3.5 其他指标测定

活性污泥的粒径采用激光粒度分布仪测定 (LS230/SVM+, 美国贝克曼库尔特有限公司). 活性污泥的微观形态采用生物显微镜进行观察和拍摄 (Nikon 50i, 日本尼康公司). COD 的测定采用快速消解分光光度法, NH_4^+ -N 的测定采用纳氏试剂分光光度法, NO_2^- -N 的测定采用 N -(1-萘基)-乙二胺比色法, NO_3^- -N 的测定采用紫外分光光度法, TN 的测定采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法, TP 的测定采用过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法, 污泥浓度的测定采用烘干称重法^[16].

2 结果与讨论

2.1 粒径对呼吸过程的影响

颗粒粒径是决定活性污泥性质的重要参数, 它与污泥的所处状态、物理性能和生物活性等重要过程密切相关^[17]. 由图 1 可以看出, 粒径 (d) 和活性污泥的呼吸速率具有良好的相关性.

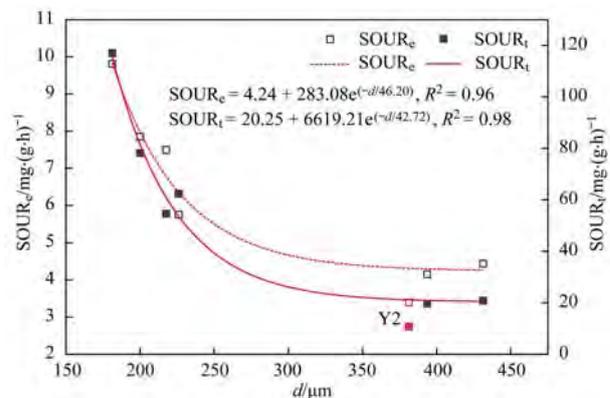


图 1 粒径和呼吸速率的关系

Fig. 1 Relationship between the particle size and respiration rate

图 1 中, 随着粒径的增加, $SOUR_e$ 和 $SOUR_t$ 均存在下降并有趋于稳定的趋势. 颗粒污泥 Y2 的粒径和呼吸速率出现离群现象, 但整体上差距不大,

是由于 Y2 运行过程中, 进水负荷较高, 污泥稳定性略差. 粒径从 181.3 μm 增加到 431.3 μm , SOUR_e 则由 9.8 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 降到 4.4 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, SOUR_i 则由 117.0 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 下降到 20.8 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$. 粒径较小的活性污泥具有较高的活性, 随着粒径的增加, 活性污泥传质受到限制, 活细胞只出现在边缘区, 而死细胞则向内扩散, 污泥活性下降^[18].

2.2 分形维数对呼吸过程的影响

分形维数在一定程度上可以表示污泥絮体或颗粒的密实程度、微观结构以及不规则性等, 而这些因素和活性污泥的压缩沉降性能密切相关. 含有大量絮状物和大量丝状物的污泥, 对应着较低的分形维数值, 表现出较差的可压缩性和沉降性^[19]. 图 2 中, 随着分形维数的增加, SOUR_e 和 SOUR_i 均呈现下降趋势. 其中 G2 的呼吸速率出现了明显偏差, G2 为多段进水工艺, 运行状况不稳定, 呼吸速率略高. 分形维数 D_f 从 1.556 增加到 1.671, SOUR_e 则由 7.9 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 降到 3.4 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, SOUR_i 则由 78.2 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 下降到 10.7 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$.

SOUR_e 和 SOUR_i 作为两个重要的呼吸速率指标, 能够较好地表示活性污泥的呼吸特征, 存在理论和实验上的最小值和最大值, 分形维数作为一个重要的物理指标, 同样存在理论和实验上的最小值和最大值. 根据图 2 中的关系, 可以对 D_f 和 SOUR 的上、下限进行理论计算. 当 D_f 为 1 时, 求得 SOUR_e

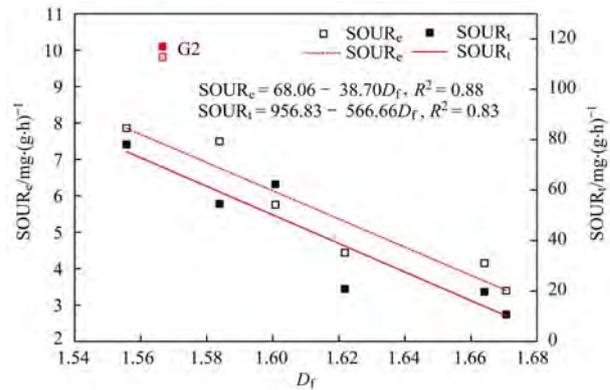


图 2 分形维数和呼吸速率的关系

Fig. 2 Relationship between the fractal dimension and respiration rate

为 390.17 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 当 D_f 为 2 时, 求得 SOUR_i 为 $-176.49 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 当 $\text{SOUR}_i = \text{SOUR}_e$ 时, D_f 为 1.683, $\text{SOUR}_i = \text{SOUR}_e = 2.91 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$. 通常情况下, 图像法获取二维的分形维数无法达到上下限 1 和 2, 已有研究中最小能达到 1.07, 最大能达到 1.73^[13, 20]. 则, 当 D_f 为 1.09 时, 求得 SOUR_i 为 339.17 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; 当 D_f 为 1.73 时, 求得 SOUR_i 为负值, 可视为 0 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$.

如表 2 所示, 已有研究中 SOUR_i 最大值为 300 $\sim 330 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 加絮凝剂的情况下可达 400 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 最小值为 2.87 $\sim 5 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 和计算数值基本吻合. 则可进一步说明分形维数和呼吸速率之间关系的合理性和可靠性.

表 2 文献报道的 SOUR_i 最大值和最小值/ $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$

Table 2 Maximum and minimum values of SOUR_i in literature reports/ $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$

项目	文献								
	[21]	[22]	[23]	[24]	[25]	[26]	[6]	[27]	[27]
SOUR_{min}	50	7.5	5	2.87	91.67	10	9.4	—	—
SOUR_{max}	160	15	14	19.05	300	100	18.8	330	400

2.3 压缩沉降性能对呼吸过程的影响

活性污泥的压缩沉降性能和絮体结构具有密切的关系, 是结构疏松程度的重要表现. 图 3 中, 随着 SCI 和 SVI 的增加, SOUR_e 逐渐增加, 并趋于稳定. SCI 从 0 增加到 101.3 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, SVI 从 25.0 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到 151.9 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, SOUR_e 则由 3.4 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 增加到 7.9 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$. 由此可以发现, 沉降性较好, 压缩性较差的污泥, 具有较差的生物活性, 而沉降性较差, 压缩性较好的活性污泥, 具有较高的生物活性. 其中, G2 为多段进水工艺, 运行状况不稳定, 呼吸速率略高, 略有偏差. 其中, 颗粒污泥具有较好的沉降性能, 较差的压缩性, 以及较低的活性, 这与颗粒污泥培养过程中添加无机絮凝剂密切相关, 使得颗粒污泥趋近于无机

颗粒, 无法具有较高的生物活性. 同时, 由于传质受限, 颗粒污泥的生物活性进一步被弱化. 而沉降性较差的活性污泥, 由于疏松的结构, 使其同时具备较好的压缩性. 同时, 由于具有较多的悬浮质, 沉降性较差的活性污泥的生物活性明显高于沉降性较好的污泥^[4].

活性污泥的压缩沉降性能和 $\text{SOUR}_n/\text{SOUR}_i$ ($R_{n/i}$) 同样存在相关关系, 其中 $R_{n/i}$ 可以表征活性污泥菌落中自养菌的比例(或活性污泥中自养菌的活性)^[28]. 图 4 中, 随着 $R_{n/i}$ 增大, 污泥中自养菌比例增加, 污泥沉降、压缩性能有增强并趋于稳定的趋势. 通过显微镜观察发现, G1 絮体松散, 有少量丝状菌^[29], 所以沉降性能较差, 丝状菌作为“菌床”使自养菌附着, 从而获得较高的 SOUR_n ; D1 也

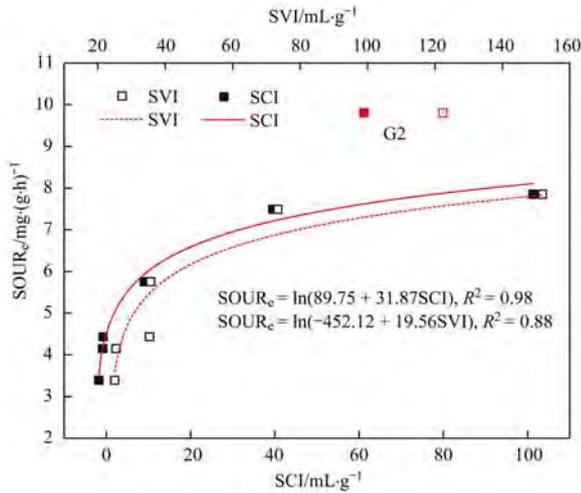


图3 沉降、压缩性能和呼吸速率的关系

Fig. 3 Relationship between the sedimentation performance, compression performance, and respiration rate

有丝状菌出现，但污泥有颗粒化趋势，丝状菌难以使自养菌附着。 $R_{n/i}$ 从 0.006 增加到 0.230，SVI 则由 $122.4 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 下降到 $25.0 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ ，SCI 则由 $61.2 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 下降到 $0 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 。 $R_{n/i}$ 值为 0.09 时，曲线基本趋于稳定，自养菌含量不再是沉降性能的限制性因素。有研究证明自养污泥的沉降性能优于异养污泥^[30, 31]，则自养菌的比例可以表示自养菌对活性污泥沉降、压缩性能的贡献。因此， $R_{n/i}$ 值越大，说明活性污泥中自养菌比例越大，自养菌对活性污泥沉降性能、压缩性能的贡献越大，对压缩性能的贡献越小。

2.4 吸附性能和呼吸过程的关系

活性污泥法污水处理工艺中，污染物的去除通常是由于微生物的降解作用和悬浮固体的吸附作用。首先有机污染物被活性污泥吸附到絮体表面，然后再作为营养物质和能量被微生物消耗，吸附在废水生物法处理工艺中占据重要的地位，生物吸附和生物降解是相互作用^[32]。同时，吸附性能是活性污泥的物理结构，尤其是微观孔道的一种外在表

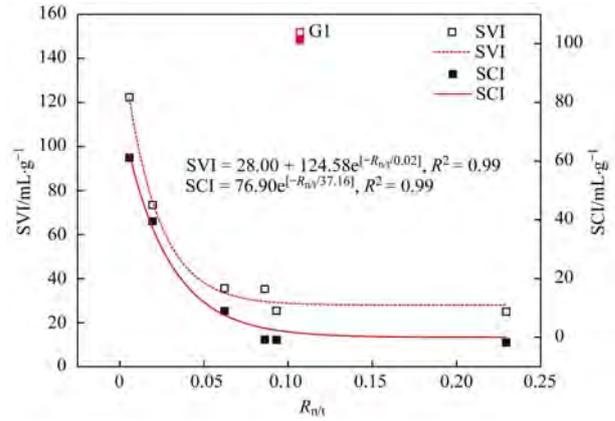


图4 自养菌比例和沉降、压缩性能的关系

Fig. 4 Relationship between the proportion of autotrophic bacteria and sedimentation performance and compression performance

现。本研究中，活性污泥的吸附性能和呼吸速率的关系如图 5 所示。

图 5 (a) 中，平衡吸附量 Q_{max} 与 $SOUR_q$ 和 $SOUR_e$ 均呈正相关。 Q_{max} 由 $142.8 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到 $654.5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ， $SOUR_q$ 由 $4.8 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 增加到 $11.0 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ ， $SOUR_e$ 由 $3.4 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 增加到 $9.8 \text{ mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。 D1 存在一定的丝状菌，呼吸速率偏高^[29]，出现明显离群。本课题组在前期研究中曾发现活性污泥的吸附性能和呼吸过程有关，尤其是 $SOUR_q$ 和 $SOUR_e$ ；由于 $SOUR_e$ 通常发生在没有任何其他基质可利用时，活性污泥对内部存储物质的利用，而 $SOUR_q$ 通常表示活性污泥对细胞自身吸附的部分基质利用^[33]。同时平衡吸附量 Q_{max} 和 $SOUR_e$ 的关系，可以说明活性污泥的物理吸附和生物活性存在协同作用。

图 5 (b) 中，同时平衡吸附量 Q_{max} 和 $SOUR_e/RI$ 呈指数负相关。 Q_{max} 由 $142.8 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到 $654.5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ， RI 则由 0.32 下降到 0.11。 RI 是判断活性污泥稳定性的一个重要指标，通常情况下，当污泥系统受到冲击时，RI 会有明显提升，吸

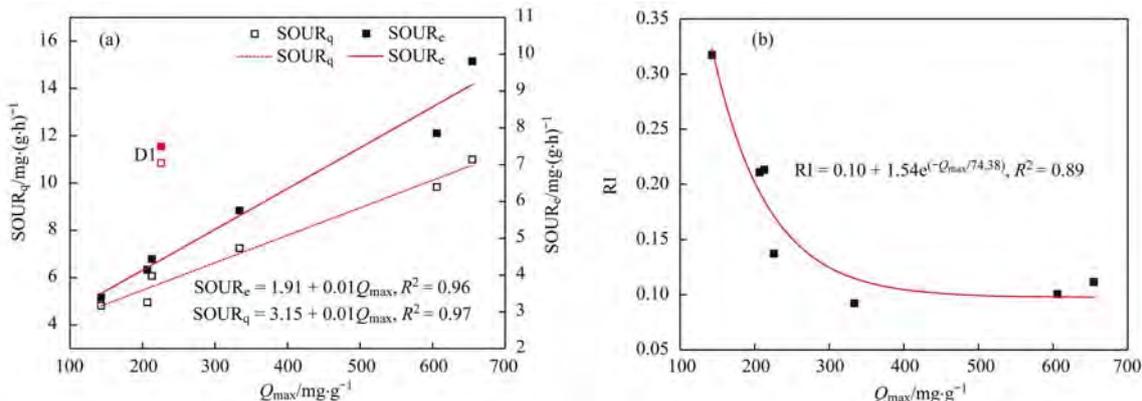


图5 吸附性能和呼吸速率的关系

Fig. 5 Relationship between the adsorption performance and respiration rate

附量也会有响应提升^[11, 12]；而在稳定运行的污泥系统中，当 RI 指标较高时(颗粒污泥)，活性污泥具有较低的吸附能力，当 RI 指标较低时(絮体污泥)，活性污泥具有较高的吸附能力。因此，物理吸附是活性污泥稳定性的一种表现，稳定状态的活性污泥具有较好地吸附性能。

2.5 活性污泥的物理和生物性能评价

良好的活性污泥 SVI 常在 50 ~ 120 mL·g⁻¹ 之间，SVI 值过低，说明污泥活性不够，活性污泥趋近于无机固体，SVI 过高的污泥，说明可能发生污

泥膨胀。根据图 3，可以获得良好状态下活性污泥对应的污泥活性 SOUR_e 范围 6.27 ~ 7.55 mg·(g·h)⁻¹，通过图 1、图 2、图 4 和图 5 可以获得粒径、分形维数、自养菌含量和平衡吸附量等值的最佳范围，结果如表 3 所示。

本研究中，为了多不同类型的活性污泥的性能进行评价，将物理性质指标分形维数、压缩指数、粒径，以及比呼吸速率 SOUR_e、SOUR_t，5 个指标进行对比分析，建立雷达图坐标系(图 6)，可对 7 种活性污泥进行状态分析。

表 3 活性污泥物理性能和活性指标的最佳计算范围

Table 3 Best calculation range for physical properties and activity indicators of activated sludge

指标	SVI/mL·g ⁻¹	SOUR _e /mg·(g·h) ⁻¹	d/μm	D _f	R _{n/t}	Q _{max} /mg·g ⁻¹
上限	50	6.27	228.12	1.60	0.03	508
下限	120	7.55	205.80	1.56	0.02	636

其中，由于 SVI 是采用 30 min 的沉降实验数据，对于沉降性较好的活性污泥而言，无法准确地表示不同污泥之间的差异；而 SCI 是根据完整的沉降曲线获得，更能表现出不同污泥之间的差异，特

别是对沉降性能较好的颗粒污泥而言。同时，活性污泥的压缩性能和吸附性能有着密切的联系，所以压缩指数 SCI 在建立评价指标时被采用。图 6(a)中可以看出，絮体污泥的生物活性占主导，同时具有

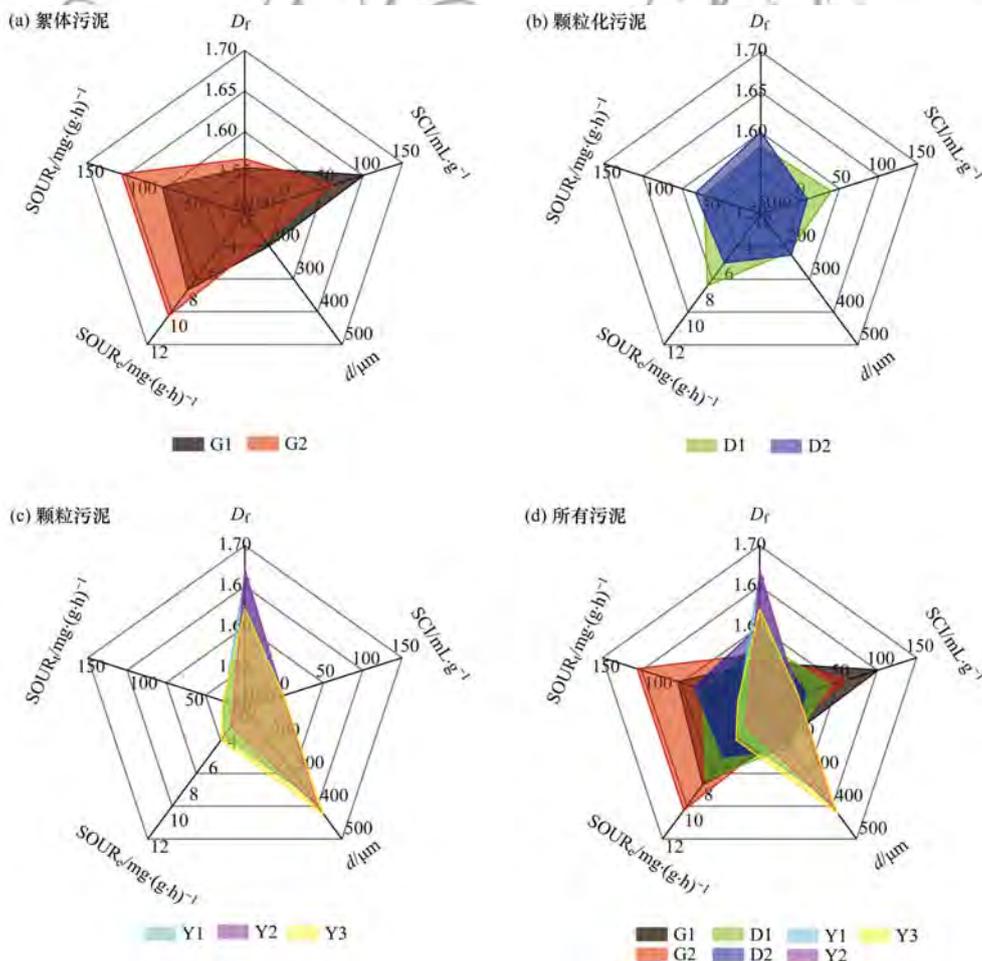


图 6 活性污泥的物理和生物性能评价指标

Fig. 6 Evaluation indexes for the physical and biological properties of activated sludge

较高的压缩指数,但从侧面可以反映出其沉降性能较差.图6(b)中可以看出,颗粒化的活性污泥的生物作用和物理作用适中.而图6(c)中,颗粒污泥的生物活性进一步弱化,物理特性占主导,活性污泥不再具有压缩性能,但具备了良好的沉降性能.由图6(a)~6(c)可以看出明显的差异,随着絮体污泥向颗粒污泥过渡, $SOUR_e$ 和 $SOUR_i$ 以及压缩指数逐渐降低,而粒径和分形维数逐渐增加.这种变化规律反映出不同类型活性污泥生物活性和物理性能之间的差异,同时可以反映出活性污泥从絮体态向颗粒态变化的过程,是一个物理性能强化,生物活性弱化的过程.

3 结论

(1)活性污泥的物理性能参数和呼吸速率存在很好的相关关系.粒径与 $SOUR_e$ 和 $SOUR_i$ 呈指数负相关, R^2 分别为0.96和0.98.分形维数与 $SOUR_e$ 和 $SOUR_i$ 呈线性负相关, R^2 分别为0.88和0.83.SVI和SCI与 $SOUR_e$ 呈对数正相关, R^2 分别为0.98和0.88. Q_{max} 与 $SOUR_i$ 和 $SOUR_e$ 呈线性负相关, R^2 分别为0.97和0.96.此外, $R_{n/t}$ 与活性污泥的压缩沉降性能同样存在负相关关系.

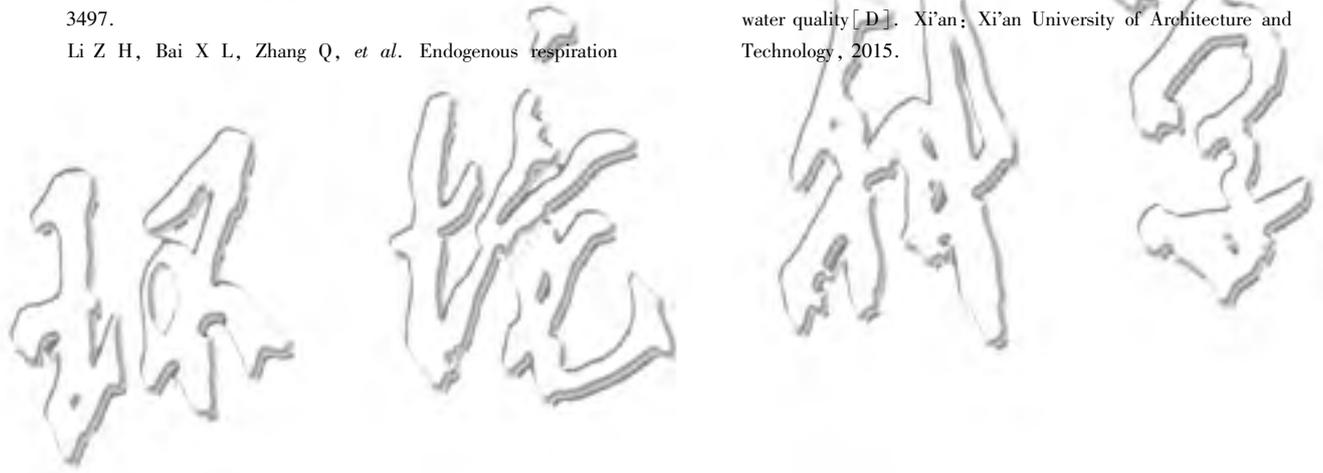
(2)物理吸附和生物作用之间存在协同作用.随着平衡吸附量 Q_{max} 的增加, $SOUR_i$ 和 $SOUR_e$ 均同步提升.同时,物理吸附是活性污泥稳定性的一种表现,稳定状态的活性污泥具有较好地吸附性能.

(3)本研究中,当活性污泥处于良好状态时,SVI为50~120 mL·g⁻¹, $SOUR_e$ 为6.27~7.55 mg·(g·h)⁻¹, d 为205.80~228.12 μm, D_f 为1.56~1.60, $R_{n/t}$ 为0.02~0.03, Q_{max} 为508~636 mg·g⁻¹.

参考文献:

- [1] Van De Moortel N, Van Den Broeck R, Degève J, et al. Comparing glow discharge plasma and ultrasound treatment for improving aerobic respiration of activated sludge [J]. *Water Research*, 2017, **122**: 207-215.
- [2] 陈立爱, 侯红勋, 陈金兰. 二沉池污泥沉降特征参数探讨及泥位动态仿真[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(7): 135-140.
Chen L A, Hou H X, Chen J L. Parameterizations of sludge settle ability and dynamic simulation of sludge blanket level for secondary clarifier [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(7): 135-140.
- [3] 刘垚. 微丝菌型活性污泥膨胀的影响因素与调控方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
Liu Y. Study on the influence factors and control strategies for activated sludge bulking by *Microthrix parvicella* [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [4] Sears K, Alleman J E, Barnard J L, et al. Density and activity characterization of activated sludge flocs [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, **132**(10): 1235-1242.
- [5] Bernard S, Gray N F. Aerobic digestion of pharmaceutical and domestic wastewater sludges at ambient temperature [J]. *Water Research*, 2000, **34**(3): 725-734.
- [6] Wang L H. Use of short SRT biological processes to recover energy and phosphorus from municipal wastewater [D]. Guelph: University of Guelph, 2014.
- [7] Kuśnierz M, Wiercik P. Analysis of particle size and fractal dimensions of suspensions contained in raw sewage, treated sewage and activated sludge [J]. *Archives of Environmental Protection*, 2016, **42**(3): 67-76.
- [8] 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.
Li Z L, Zhang D J, Lu P L, et al. Influencing factors of floc size distribution and fractal dimension of activated sludge [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(10): 3975-3980.
- [9] Zhang X C, Li X R, Zhang Q R, et al. New insight into the biological treatment by activated sludge: the role of adsorption process [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **153**: 160-164.
- [10] Martínez-Alcalá I, Guillén-Navarro J M, Fernández-López C. Pharmaceutical biological degradation, sorption and mass balance determination in a conventional activated-sludge wastewater treatment plant from Murcia, Spain [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **316**: 332-340.
- [11] Li Z H, Zhu Y M, Zhang J, et al. Evaluation of robustness of activated sludge using calcium-induced enhancement of respiration [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **253**: 55-63.
- [12] Li Z H, Ma Z B, Yu H Q, et al. Respiration adaptation of activated sludge under dissolved oxygen and hypochlorite stressed conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **248**: 171-178.
- [13] Zheng H L, Zhu G C, Jiang S J, et al. Investigations of coagulation-flocculation process by performance optimization, model prediction and fractal structure of flocs [J]. *Desalination*, 2011, **269**(1-3): 148-156.
- [14] Fan H T, Liu X H, Wang H, et al. Oxygen transfer dynamics and activated sludge floc structure under different sludge retention times at low dissolved oxygen concentrations [J]. *Chemosphere*, 2017, **169**: 586-595.
- [15] Sekine T, Tsugura H, Urushibara S, et al. Evaluation of settleability of activated sludge using a sludge settling analyzer [J]. *Water Research*, 1989, **23**(3): 361-367.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] Shao L M, He P P, Yu G H, et al. Effect of proteins, polysaccharides, and particle sizes on sludge dewaterability [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(1): 83-88.
- [18] Toh S K, Tay J H, Moy B Y, et al. Size-effect on the physical characteristics of the aerobic granule in a SBR [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, **60**(6): 687-695.
- [19] 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.
- [20] Wang Y L, Lu J, Du B Y, et al. Fractal analysis of polyferric chloride-humic acid (PFC-HA) flocs in different topological spaces [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(1): 41-48.
- [21] Shamas J Y, Englande A J. Use of the immediate maximum specific oxygen uptake rate as an activated sludge process control

- parameter[J]. *Water Science and Technology*, 1992, **25**(1): 123-132.
- [22] Battistoni P, Fava G, Ruello M L. Heavy metal shock load in activated sludge uptake and toxic effects[J]. *Water Research*, 1993, **27**(5): 821-827.
- [23] Huang X, Gui P, Qian Y. Effect of sludge retention time on microbial behaviour in a submerged membrane bioreactor[J]. *Process Biochemistry*, 2001, **36**(10): 1001-1006.
- [24] Sun D D, Khor S L, Hay C T, *et al.* Impact of prolonged sludge retention time on the performance of a submerged membrane bioreactor[J]. *Desalination*, 2007, **208**(1-3): 101-112.
- [25] Val del Río Á, Morales N, Figueroa M, *et al.* Effect of coagulant - flocculant reagents on aerobic granular biomass[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2012, **87**(7): 908-913.
- [26] Van Den Broeck R M R, Van Impe J F M, Smets I Y M, *et al.* Assessment of activated sludge stability in lab-scale experiments [J]. *Journal of Biotechnology*, 2009, **141**(3-4): 147-154.
- [27] Derco J, Kuffa R, Urminská B, *et al.* Influence of phosphorus precipitation on wastewater treatment processes [M]. InTech, 2016.
- [28] 李志华, 白旭丽, 张芹, 等. 基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3492-3497.
- Li Z H, Bai X L, Zhang Q, *et al.* Endogenous respiration process analysis of heterotrophic biomass and autotrophic biomass based on respiration map[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3492-3497.
- [29] 李志华, 朱珂辰. 以比耗氧速率作为丝状菌膨胀预警指标的研究[J]. *中国给水排水*, 2015, **31**(11): 39-42.
- Li Z H, Zhu K C. Using specific oxygen uptake rate as a warning index of sludge bulking[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, **31**(11): 39-42.
- [30] Hartley K J. Controlling sludge settleability in the oxidation ditch process[J]. *Water Research*, 2008, **42**(6-7): 1459-1466.
- [31] 陈瑶, 徐愿坚, 陈玉成, 等. 自养、异养和混合营养污泥沉降性能差异原因探讨[J]. *化工进展*, 2015, **34**(5): 1466-1471, 1498.
- Chen Y, Xu Y J, Chen Y C, *et al.* Investigation of the reasons for settleability differences among autotrophic, heterotrophic and mixed nutritional sludges[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, **34**(5): 1466-1471, 1498.
- [32] Ren Y X, Nakano K, Nomura M, *et al.* A thermodynamic analysis on adsorption of estrogens in activated sludge process [J]. *Water Research*, 2007, **41**(11): 2341-2348.
- [33] 柴波. 水质冲击条件下的污泥呼吸图谱特性分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- Chai B. Analysis of sludge respiration under shock condition of water quality[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.



CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust PM _{2.5} and PM ₁₀ During Spring in Tianjin Derived by Using the Quadrat Sampling Method	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHOU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jimpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹⁵ N-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonification	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)